

Markus Johannes Kratzer

»Methode zur Bewertung des Potenzials der Additiven Fertigung hinsichtlich der Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus eines Automobils«

Markus Johannes Kratzer

» Methode zur Bewertung des Potenzials der Additiven Fertigung hinsichtlich
der Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus eines Automobils «

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhans^{1,2}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer^{1,3}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke⁴

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber^{1,2}

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

² Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

³ Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

⁴ Institut für Photovoltaik (ipv) der Universität Stuttgart

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-1100
info@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2024

D 93

2024

Druck und Weiterverarbeitung:

Fraunhofer-Druckerei, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.



Dieses Werk steht, soweit nicht gesondert gekennzeichnet,
unter folgender Creative-Commons-Lizenz:
Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen
International 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

Methode zur Bewertung des Potenzials der Additiven Fertigung hinsichtlich der Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus eines Automobils

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung**

Vorgelegt von

**Markus Johannes Kratzer
aus Landshut**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jan Christian Aurich
Tag der mündlichen Prüfung: 18.01.2024

**Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
der Universität Stuttgart**

2024

Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Additive Manufacturing Campus der BMW Group in Oberschleißheim.

Meinem Doktorvater Herrn Professor Thomas Bauernhansl danke ich herzlich für die Gelegenheit zur Promotion und sein Vertrauen in meine Arbeit. Herr Professor Bauernhansl bestärkte mich stetig in der Bearbeitung des Themas. Seine wichtigen Impulse ermöglichten erst eine erfolgreiche Durchführung dieser Forschungsarbeit. Mein Dank gilt auch Herrn Professor Jan Christian Aurich für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts. Auf Seiten des Fraunhofer IPA möchte ich mich besonders bei Herrn Dr.-Ing. Patrick Kübler und Herrn Dr.-Ing. Erwin Groß bedanken. Ihre wissenschaftliche Begleitung war für das Gelingen der Arbeit essenziell. Frau Dr. Birgit Spaeth vom Fraunhofer IPA danke ich sehr für die sprachliche Überarbeitung meiner Veröffentlichungen sowie der Doktorarbeit.

Auf Seiten der BMW Group danke ich besonders Dr.-Ing. Florian Höfler und Dipl.-Ing. Torsten Burkert für die unzähligen und intensiven fachlichen Diskussionen im Rahmen der Arbeit. Außerdem möchte ich mich bei meinen Führungskräften Dr.-Ing. Maximilian Meixlsperger, Dr.-Ing. Blanka Szost und Dr. Jens Ertel bedanken. Ihr habt mich bei der Themengestaltung unterstützt, mir den für die Anfertigung der Arbeit notwendigen Freiraum gewährt und mir zahlreiche Möglichkeiten gegeben, mein Thema im Unternehmen bekannt zu machen. Auch möchte ich mich bei allen Studenten bedanken, die ich während meiner Promotionszeit betreuen durfte. Die Zusammenarbeit mit euch hat mir besonders viel Spaß gemacht.

Weiter danke ich meinen Eltern Johann und Elfriede für den Werdegang, den ihr mir ermöglicht habt und die nie endende Unterstützung während meines Studiums und der Promotion. Meiner Schwester Andrea danke ich besonders für die hilfreichen Anmerkungen in dieser Arbeit. Zu guter Letzt möchte ich meiner Partnerin Katja danken, die viel Verständnis für die Einschränkungen aufbrachte, die eine solche Arbeit mit sich bringt, sowie den Rückhalt während der gesamten Promotionszeit. Ihnen allen widme ich diese Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XXIII
Kurzfassung.....	XXV
Abstract	XXVII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problemstellung und Lösungshypothese	6
1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen	6
1.4 Wissenschaftlicher Rahmen und Gliederung der Arbeit.....	8
2 Grundlagen zu Additiver Fertigung, Produktlebenszyklus und Änderungsmanagement	15
2.1 Additive Fertigung	15
2.1.1 Einordnung der Additiven Fertigung in die Fertigungsverfahren	16
2.1.2 Verfahren und Einsatzfelder der Additiven Fertigung	17
2.1.3 Prozessablauf additiver Fertigungstechnologien	19
2.1.4 Charakterisierung der Additiven Fertigung	20
2.2 Der Produktlebenszyklus und die Rolle von Änderungen	22
2.2.1 Produktentstehung und Produktlebenszyklus im Automobilbau	23
2.2.2 Charakterisierung technischer Änderungen.....	27
2.2.3 Ablauf von Änderungsprozessen und Dokumentation von Änderungsdaten ...	29
2.2.4 Ursachen technischer Änderungen	31

2.2.5	Negative Auswirkungen technischer Änderungen	34
2.3	Trends im Automobilbau erfordern Änderungsflexibilität im Lebenszyklus.....	38
3	Empirische Studien zu technischen Änderungen im Automobilbau	41
3.1	Änderungen im PEP.....	42
3.1.1	Vorgehen und Durchführung	42
3.1.2	Ergebnisse	48
3.2	Folgen der Änderungsdauer im PEP – Negative Zusatzeffekte	60
3.2.1	Vorgehen und Durchführung.....	60
3.2.2	Ergebnisse	61
3.3	Änderungsbedarfe im Produktlebenszyklus	63
3.3.1	Vorgehen und Durchführung.....	63
3.3.2	Ergebnisse	65
3.4	Zwischenfazit.....	71
4	Anforderungen an die Methode und Stand der Wissenschaft.....	75
4.1	Anforderungen an die Methode	75
4.2	Bestehende Ansätze.....	79
4.2.1	Methoden zur Analyse komplexer Systeme	82
4.2.2	Auswirkungsanalyse technischer Änderungen	83
4.2.3	Ansätze zur präventiven Vereinfachung technischer Systeme	92
4.2.4	A-posteriori-Analyse technischer Änderungen.....	95
4.3	Zusammenfassende Bewertung bestehender Ansätze	97
5	Modellierungskonzept und Grundlagen der Methode	101
5.1	Modellierungskonzept	101

5.2	Grundlagen zu kausalanalytischer Prognose, statistischer Verteilungen, und statistischen Schätzmethoden.....	107
5.2.1	Kausalanalytische Prognose durch Regression	108
5.2.2	Reduktion der Modellkomplexität durch eine Hauptkomponentenanalyse ...	116
5.2.3	Wahrscheinlichkeitsverteilungen und statistische Schätzmethoden	118
5.3	Methoden der Kostenschätzung und Kurzkalkulation	122
6	Detaillierung der Methode.....	125
6.1	Baustein 1: Schritt 1 – Vorselektion	125
6.1.1	Reduktion auf Bauteile in Baugruppen mit häufigen Änderungen.....	126
6.1.2	Reduktion auf AM-Potenzialbauteile	129
6.2	Baustein 1: Schritt 2 – Prognose des Änderungsverhaltens der werkzeuggebundenen Bauteilversion	131
6.2.1	Spezifizieren der Untersuchungsgegenstände	133
6.2.2	Datenerhebung und Methodenauswahl zur Analyse.....	139
6.2.3	Modellbildung der Änderungswahrscheinlichkeit	142
6.2.4	Modellbildung der Änderungsintensität	144
6.2.5	Modellbildung der Änderungsanzahl	146
6.2.6	Modellbildung der Werkzeugänderungskosten.....	146
6.2.7	Modellbildung der Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung.....	148
6.2.8	Modellbildung des spätesten Änderungszeitpunkts.....	149
6.2.9	Modellbildung des fertigungsspezifischen Anteils an der Änderungsdauer....	151
6.2.10	Modellbildung der Änderungsdauer	151
6.2.11	Gesamtmodell zur Bewertung des Änderungsverhaltens.....	153
6.3	Baustein 1: Schritt 3 – Prognose der Änderungsflexibilität einer AM-Bauteilversion	161

6.3.1	Methodenüberblick und erforderliche Eingaben	161
6.3.2	Algorithmus zur Berechnung zeitabhängiger Änderungsaufwände	166
6.4	Baustein 1: Schritt 4 – Vergleich negativer Zusatzeffekte	176
6.4.1	Negative Zusatzeffekte bei Änderungen vor Serienstart.....	176
6.4.2	Negative Zusatzeffekte bei Änderungen nach Serienstart	179
6.5	Baustein 1: Gegenüberstellung aller Potenziale und vereinfachte Berechnung des Gesamtpotenzials	193
6.6	Baustein 2: Schritt 1 – Identifikation von Innovationsideen	196
6.7	Baustein 2: Schritt 2 – Auswahl von Innovationsideen	197
6.8	Baustein 2: Schritt 3 – Bauteilidentifikation und Bewertung von Umsetzungsaufwand und Nutzen	198
7	Anwendung und Validierung in der unternehmerischen Praxis	203
7.1	Anwendung und Validierung von Baustein 1.....	204
7.1.1	Schritt 1 – Vorselektion.....	204
7.1.2	Schritt 2 – Prognose des Änderungsverhaltens der werkzeuggebundenen Bauteilversion	207
7.1.3	Schritt 3 – Prognose der Änderungsflexibilität der AM-Bauteilversion	214
7.1.4	Schritt 4 – Vergleich negativer Zusatzeffekte	216
7.1.5	Gegenüberstellung aller Potenziale und vereinfachte Berechnung einer Gesamtpotenzialzahl	221
7.2	Anwendung und Validierung von Baustein 2.....	223
7.2.1	Schritt 1 – Identifikation von Innovationsideen	223
7.2.2	Schritt 2 – Auswahl von Innovationsideen.....	224
7.2.3	Schritt 3 – Bauteilidentifikation und Bewertung von Umsetzungsaufwand und Nutzen	225

7.3	Zusammenfassung der Anwendung und Zwischenfazit.....	227
8	Zusammenfassung und Ausblick	233
8.1	Zusammenfassung und kritische Reflexion	233
8.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf.....	238
9	Literaturverzeichnis.....	241
	Anhang.....	297

Abkürzungsverzeichnis

*	neues Bauteil
%	Prozent
$\pi_{G\ddot{A}}$	Wahrscheinlichkeit einer geometrischen Änderung
$\pi_{\ddot{A}I}$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil mehr als zwei Änderungen hat
μ	Erwartungswert
ÄA	Änderungsanzahl
AA	Risiko für akustische Auffälligkeiten
ÄD	Änderungsdauer in der Serienfertigung
AG	Aktiengesellschaft
ÄI	Änderungsintensität
AM	Additive Manufacturing
AV	Arbeitsvorbereitung
AVÄK	Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung
ÄZP	Änderungszeitpunkt
CR	Crashrelevanz
DR	Designrelevanz
fAÄD	fertigungsspezifischer Anteil an der Änderungsdauer
FK	funktionale Komplexität
FKS	Funktion Korrosionsschutz
FV	funktionale Verknüpfung
GÄ	geometrische Änderung

GS	Großserienprojekt
GV	geometrische Verknüpfung
GwK	Gewährleistungskosten
HR	Homologationsrelevanz
m	Masse
n	Anzahl
N	Neuheitsgrad
OEM	Original Equipment Manufacturer
PCA	Principle Component Analysis
PEP	Produktentstehungsprozess
PG	Prognosegüte in der virtuellen Absicherung
PK	Produktkosten
RM	Montagerisiko
UV	unabhängige Variable
WZÄK	Werkzeugänderungskosten
WZK	Werkzeugkosten
ZV	Zielvariable
α	Signifikanzniveau
σ	Standardabweichung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Eigene Auswertung zu Änderungsanträgen mit Auswirkung auf Werkzeugkosten	3
Abbildung 1.2: Bedarf an Änderungsflexibilität	4
Abbildung 1.3: Produktumfeld	5
Abbildung 1.4: Wissenschaftstheoretische Positionierung der Arbeit	9
Abbildung 1.5: Forschungsmethodisches Vorgehen	11
Abbildung 1.6: Heuristischer Bezugsrahmen	13
Abbildung 1.7: Forschungsphasen und Struktur der Arbeit	14
Abbildung 2.1: Einteilung der Fertigungsverfahren	16
Abbildung 2.2: Unterschiede additiver Verfahren und Darstellung der sieben Hauptkategorien	17
Abbildung 2.3: Einsatzfelder der Additiven Fertigung im Automobilbau und Verortung der Arbeit	19
Abbildung 2.4: Prozessablauf additiver Fertigungstechnologien	20
Abbildung 2.5: Charakterisierung der Additiven Fertigung im Abgleich mit werkzeuggebundenen Fertigungsverfahren	21
Abbildung 2.6: Stückzahlabhängige Wirtschaftlichkeit additiver Verfahren	22
Abbildung 2.7: Der Produktlebenszyklus	23
Abbildung 2.8: Der PEP	25
Abbildung 2.9: Der Änderungsprozess	29
Abbildung 2.10: Zusammenstellung von Änderungsursachen	33
Abbildung 2.11: Negative Auswirkungen von Änderungen und deren Einflussgrößen	34

Abbildung 2.12: Haupttrends im Automobilbau und Bewertung der Bedeutung für AM	39
Abbildung 3.1: Empirische Untersuchungen in Kapitel 3	41
Abbildung 3.2: Vorgehen zur Analyse des Änderungsverhaltes im Automobilbau (Studie 1)	47
Abbildung 3.3: (A) Verteilung der untersuchten geometrischen Änderungen	48
Abbildung 3.4: (B) Verteilung geometrischer Änderungen im PEP von drei Fahrzeugen	49
Abbildung 3.5: (C) Unterschiedliche Änderungsarten nach PEP-Phasen	50
Abbildung 3.6: (D) Verteilung der Geometrieänderungen in Fahrzeugbereichen	51
Abbildung 3.7: (D) Verteilung geometrischer Bauteiländerungen auf unterschiedliche Baugruppen	52
Abbildung 3.8: (E) Zusammensetzung der Änderungskosten geometrischer Änderungen	52
Abbildung 3.9: (F) Anteil der Werkzeugänderungskosten in den Bereichen im Fahrzeug	54
Abbildung 3.10: (G) Anteil der Serienwerkzeugänderungskosten in den PEP-Phasen	55
Abbildung 3.11: (J) Ursachen geometrischer Änderungen	58
Abbildung 3.12: Zusammenfassung der Studienergebnisse	73
Abbildung 4.1: Anforderungen und Bewertungskriterien an die Methode	76
Abbildung 4.2: Suchfelder der Dissertation zu technischen Änderungen	80
Abbildung 4.3: Matrix- und graphenbasierte Darstellung von DSMs, DMMs, MDMs	83
Abbildung 4.4: Change Prediction Method	85
Abbildung 4.5: Abgleich der Anforderungen mit bestehenden Ansätzen	97
Abbildung 5.1: Vorgehen zur Modell- und Methodenbildung	102
Abbildung 5.2: Gesamtmethode zur Bewertung des Potenzials von AM auf Änderungsflexibilität im Lebenszyklus	103

Abbildung 5.3: Maße zur Überprüfung von Signifikanz, Güte und Modellvoraussetzungen linearer Regressionen	110
Abbildung 5.4: Maße zur Überprüfung der Signifikanz und Güte binär logistischer Regressionen	115
Abbildung 5.5: Hauptkomponentenanalyse: Variablenauswahl, Durchführung, Faktorextraktion	117
Abbildung 5.6: Eigenschaften, Anwendungsfälle und Parameter ausgewählter stetiger Verteilungen	120
Abbildung 5.7: Bestandteile der Selbstkosten und Methoden zur Kostenschätzung und Kurzkalkulation	123
Abbildung 6.1: Baustein 1: Schritt 1 - Vorselektion	126
Abbildung 6.2: Fokussierung auf Bauteile in Baugruppen mit vielen Änderungen	128
Abbildung 6.3: Fokus auf mit AM potenziell wirtschaftlichen und technisch herstellbaren Bauteilen	131
Abbildung 6.4: Vorgehen zur empiriebasierten Prognose des Änderungsverhaltens der werkzeuggebundenen Bauteilversion	132
Abbildung 6.5: Operationalisierung der Änderungsdauer und der fertigungsspezifischen Dauer	136
Abbildung 6.6: Hypothetisches Erklärungsmodell zum Bauteiländerungsverhalten – Teil 1	137
Abbildung 6.7: Hypothetisches Erklärungsmodell zum Bauteiländerungsverhalten – Teil 2	138
Abbildung 6.8: Änderungsverhalten: Art der Datenerhebung, Stichprobe und Datenauswertung	139
Abbildung 6.9: Änderungswahrscheinlichkeit – Prüfen der In-sample-Modellgüte	144
Abbildung 6.10: Änderungsintensität – Prüfen der In-sample-Modellgüte	145

Abbildung 6.11: Anteil geometrischer Änderungen	146
Abbildung 6.12: Werkzeugänderungskosten: Gesamtmodell – Modellvoraussetzungen und Güte	148
Abbildung 6.13: Arbeitsvorbereitungsänderungskosten: Gesamtmodell – Modellvoraussetzungen und Güte	149
Abbildung 6.14: Spätester Änderungszeitpunkt: Gesamtmodell – Modellvoraussetzungen	150
Abbildung 6.15: Änderungsdauer: Gesamtmodell – Modellvoraussetzungen und Güte	152
Abbildung 6.16: Gesamtmodell zur Prognose des Änderungsverhaltens	153
Abbildung 6.17: Prognose der Wahrscheinlichkeit einer geometrischen Änderung	154
Abbildung 6.18: Prognose der Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil änderungsintensiv ist	155
Abbildung 6.19: Prognose der fertigungsspezifischen Änderungskosten – Erwartungswert	156
Abbildung 6.20: Prognose der fertigungsspezifischen Änderungskosten – Prognoseintervall	158
Abbildung 6.21: Prognose des spätesten Änderungszeitpunkts	159
Abbildung 6.22: Prognose der fertigungsspezifischen Änderungsdauer (einer Änderung nach Serienstart)	160
Abbildung 6.23: Methode zur Bewertung des AM-Änderungsaufwands	161
Abbildung 6.24: Schritt 2 – Aufnahme relevanter Abhängigkeiten in DSMs und DMMs	163
Abbildung 6.25: Schritt 3 – Aufnahme von Kosten u. Dauer der AV-Schritte	163
Abbildung 6.26: Schritt 4 – Zeitliche Einordnung der AV-Schritte	164
Abbildung 6.27: Schritt 5 – Aufnahme der direkten Vorgänger je AV-Schritt	165

Abbildung 6.28: Algorithmus zur Berechnung zeitabhängiger Änderungsaufwände – Überblick	166
Abbildung 6.29: A1 – BFS-Algorithmus zur Identifizierung betroffener Änderungsmerkmale	168
Abbildung 6.30: AK1 – Änderungskosten: Algorithmus, um betroffene AV-Schritte zu identifizieren	169
Abbildung 6.31: AK2 – Algorithmus zur Berechnung der Änderungskosten	170
Abbildung 6.32: AD1 – Änderungsdauer: Betroffene AV-Schritte identifizieren	172
Abbildung 6.33: AD2 – Änderungsdauer: Berechnen der Dauer einzelner AV-Schritte	173
Abbildung 6.34: AD3 – Änderungsdauer: Pfadbildung zur Umsetzung aller AV-Schritte	175
Abbildung 6.35: AD4 – Änderungsdauer: Berechnen der Dauer zur Umsetzung aller AV-Schritte	175
Abbildung 6.36: Erzeugen von Transparenz zu Zusatzeffekten von Änderungen vor Serienstart	177
Abbildung 6.37: Einflusses einer kürzeren Dauer darauf, dass Änderungen zu früheren Bauphasen umgesetzt werden können – Pseudocode	178
Abbildung 6.38: Bestimmen des mittleren GwK-Risikos eines produzierten Bauteils	181
Abbildung 6.39: Bewertung des maximalen GwK-Reduktionspotenzials	182
Abbildung 6.40: Bestimmen des Produktkosten-Reduktionspotenzials durch schnelle Änderungen	183
Abbildung 6.41: Bewertung des maximalen PK-Reduktionspotenzials	183
Abbildung 6.42: Bewertung des maximalen Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzials	185
Abbildung 6.43: Prognose der erforderlichen Vorproduktionsstückzahl	186
Abbildung 6.44: Bewertung des maximalen Zusatzkapazitätskosten- Reduktionspotenzials	187

Abbildung 6.45: Relevanter Mietumfang für Fläche und Standardbehälter	188
Abbildung 6.46: Berechnung der Packdichte	189
Abbildung 6.47: Bewertung des maximalen Lagerflächenkosten-Reduktionspotenzials bei Änderungen	190
Abbildung 6.48: Berechnung von Volumenverpackungskosten	191
Abbildung 6.49: Bewertung des maximalen Behälterkosten-Reduktionspotenzials bei Änderungen	192
Abbildung 6.50: Darstellung der fertigungsspezifischen Änderungskosten einer werkzeuggebundenen und einer AM-Version eines Bauteils	193
Abbildung 6.51: Vereinfachte Berechnung des Gesamtpotenzials	195
Abbildung 6.52: Identifizieren von Innovationsideen, die Änderungsflexibilität erfordern	197
Abbildung 6.53: Priorisieren von Innovationsideen über eine Nutzwertanalyse	197
Abbildung 6.54: Umsetzung der Innovationsidee technisch und wirtschaftlich bewerten	201
Abbildung 7.1: Validierung von Stufe A der Vorselektion	205
Abbildung 7.2: Validierung von Stufe B und C der Vorselektion – Durchschnittliche prozentuale Abweichung der bauteilspezifischen Volumenkosten zwischen Referenz- und Anwendungsprojekten	206
Abbildung 7.3: Prognosegüte der Änderungswahrscheinlichkeit – Ergebnis der Kreuzvalidierung	208
Abbildung 7.4: Prognose einer geometrischen Bauteiländerung bei den Anwendungsprojekten	209
Abbildung 7.5: Prognosegüte der Änderungsintensität – Ergebnis der Kreuzvalidierung	209

Abbildung 7.6: Prognose, ob die Bauteile der Anwendungsprojekte mehr als eine Änderung haben	210
Abbildung 7.7: Änderungskosten – Darstellung des Prognoseergebnisses an einem Beispiel	212
Abbildung 7.8: Änderungsdauer – Darstellung des Prognoseergebnisses an einem Beispiel	214
Abbildung 7.9: AM-Änderungsflexibilität – Darstellung des Prognoseergebnisses an einem Beispiel	215
Abbildung 7.10: Ergebnis Validierung – Negativer Zusatzeffekt einer Änderung vor Serienstart	217
Abbildung 7.11: Reduktionspotenzial von Zusatzkosten einer Änderung (Teil 1) – Darstellung des Prognoseergebnisses an einem Beispiel	219
Abbildung 7.12: Reduktionspotenzial von Zusatzkosten einer Änderung (Teil 2: Vorproduktion) – Darstellung des Prognoseergebnisses an einem Beispiel	221
Abbildung 7.13: Beurteilung der Vollständigkeit identifizierter Innovationsideen	223
Abbildung 7.14: Beurteilung der Bewertungskriterien	224
Abbildung 7.15: Beurteilung der Auswahl von Innovationsideen	225
Abbildung 7.16: Beurteilung der Machbarkeit, frühzeitig Bauteile zu identifizieren und Umsetzbarkeit von Updates, Editionen und Personalisierung zu prüfen	225
Abbildung 7.17: Anwendung von Baustein 2 – Schritt 3: Kapitalwertberechnung für Gesamtumfang und je Bauteil	226
Abbildung 7.18: Beurteilung, Änderungsflexibilität frühzeitig zu berücksichtigen	227
Abbildung 8.1: Kritische Reflexion der Methode hinsichtlich der Anforderungen	235

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Zieldimensionen der Arbeit	7
Tabelle 3.1:	(H) Mittelwerte und mittlere Ränge von Werkzeugänderungskosten nach PEP-Phasen	56
Tabelle 3.2:	(I) Mittelwerte und mittlere Ränge von Werkzeugänderungskosten in den Fahrzeugen	57
Tabelle 3.3:	(J) Anteil der Änderungsursachen in unterschiedlichen Phasen der Produktentstehung	59
Tabelle 6.1:	Änderungswahrscheinlichkeit – Koeffizientenmatrix der Faktorwerte	142
Tabelle 6.2:	Änderungswahrscheinlichkeit – Signifikanzprüfung der Einzelhypothesen mittels Wald-Test	143
Tabelle 6.3:	Logistisches Regressionsmodell zu Änderungswahrscheinlichkeit	143
Tabelle 6.4:	Änderungsintensität – Signifikanzprüfung der Einzelhypothesen mittels Wald-Test	144
Tabelle 6.5:	Logistische Regressionsmodell der Änderungsintensität	145
Tabelle 6.6:	Werkzeugänderungskosten – Signifikanzprüfung der Einzelhypothesen mittels t-Test	147
Tabelle 6.7:	Regressionsmodell logarithmierter Werkzeugänderungskosten	147
Tabelle 6.8:	Regressionsmodell logarithmierter Arbeitsvorbereitungsänderungskosten (lnAVÄK)	148
Tabelle 6.9:	Spätester Änderungszeitpunkt – Signifikanzprüfung der Einzelhypothesen mittels t-Test	149
Tabelle 6.10:	Regressionsmodell des spätesten Änderungszeitpunkts (ÄZP)	150

Tabelle 6.11:	Änderungsdauer – Signifikanzprüfung der Einzelhypothesen mittels t-Test	152
Tabelle 6.12:	Regressionsmodell Änderungsdauer (ÄD)	152
Tabelle 7.1:	Prognosegüte Werkzeugänderungskosten – Ergebnis Kreuzvalidierung	211
Tabelle 7.2:	Prognosegüte Arbeitsvorbereitungsänderungskosten – Ergebnis Kreuzvalidierung	211
Tabelle 7.3:	Prognosegüte Arbeitsvorbereitungsänderungskosten – Ergebnis Kreuzvalidierung	212
Tabelle 7.4:	Prognosegüte Änderungsdauer – Ergebnis Kreuzvalidierung	213
Tabelle 7.5:	Prognosegüte fertigungsspezifischer Anteil – Ergebnis Kreuzvalidierung	213

Kurzfassung

Die Additive Fertigung, auch Additive Manufacturing (AM) genannt, ist im Automobilbau zur Herstellung von Endprodukten noch nicht etabliert. Bauteiländerungen sind im Produktentstehungsprozess eines Automobils stark verbreitet, verursachen hohe Kosten und haben weitere negative Zusatzeffekte. Änderungsflexibilität im weiteren Produktlebenszyklus ist auch, etwa bei Updates und Personalisierungen, von Vorteil. Der Additiven Fertigung wird Änderungsflexibilität unterstellt. In der Arbeit wird eine Methode entwickelt, um das Potenzial der Additiven Fertigung hinsichtlich der Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus zu bewerten, sodass dieses Potenzial bei der Serientechnologieentscheidung eines Bauteils berücksichtigt werden kann.

Nachdem Ausgangssituation, Problemstellung sowie die Zielstellung und Forschungsfragen dargelegt wurden, werden die Grundlagen der Additiven Fertigung, des Produktlebenszyklus im Automobilbau und des Änderungsmanagements beschrieben. Anschließend wird anhand von zwei Studien zu Änderungen im Produktentstehungsprozess (Sekundärdatenbasiert und Experteninterviews) sowie einer Studie zu Potenzialen von Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus (Experteninterviews) die Relevanz des Themas bestätigt. Basierend auf den Grundlagen und den Studien werden Anforderungen an das Methodenkonzept abgeleitet. Die Methode besteht aus zwei Bausteinen, um das Potenzial der Additiven Fertigung als Serientechnologie hinsichtlich der Änderungsflexibilität von Bauteilen im Produktentstehungsprozess und im weiteren Produktlebenszyklus a priori zu bewerten. Zur Bewertung des Änderungsbedarfs und der Änderungsflexibilität eines werkzeuggebundenen Bauteils im Produktentstehungsprozess wurden Prognosemodelle entwickelt, die auf Sekundärdaten beruhen. Zur Bewertung der Änderungsflexibilität einer AM-Version wurden expertenbasierte Prognosemodelle entwickelt, da bei AM zum heutigen Stand keine Änderungsdaten vorliegen. Um Bauteile zu identifizieren, die Änderungsflexibilität im Lebenszyklus nach Serienstart benötigen, werden Innovationsideen auf Grundlage aktueller Trends identifiziert und darauf basierend Bauteile ausgewählt. Die Funktionsfähigkeit der Methode konnte anhand von Anwendungsbeispielen bestätigt werden.

Abstract

Today, Additive Manufacturing is not yet established in automotive end products. The technology is assumed to be flexible to engineering changes. Today, in automotive engineering, changes in the product development process are very common, they cause high costs and have additional negative effects. Furthermore, change flexibility is advantageous in the product life cycle, e.g. for updates and personalizations. The aim of the dissertation is to assess the influence of Additive Manufacturing on changes in the entire product life cycle, in order to consider this in the series technology decision of a component.

After the initial situation, the problem, the objectives, and the research questions have been outlined, the basic principles of Additive Manufacturing, the product life cycle in automotive engineering and change management are described. Subsequently, the relevance of the topic is confirmed based on two studies on engineering changes in the product development process (secondary data-based and expert interviews) and a study on the change flexibility potential in the product life cycle (expert interviews). Based on the derived requirements, a method consisting of two components is developed to assess engineering change flexibility in the product development process and in the further product life cycle. To evaluate the need for engineering changes and engineering change flexibility of a tool-bound component in the product development process, prediction models based on secondary data have been developed. Expert-based models were developed to evaluate the change flexibility of an AM version since change data is not available for AM yet. In order to identify components that require change flexibility in the life cycle, innovation ideas are identified based on current trends in automotive engineering and components are selected on this basis. The functionality of the method could be confirmed by application examples.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die gestiegenen Kundenanforderungen nach qualitativ hochwertigen Produkten führen zu einer zunehmenden Wettbewerbsorientierung produzierender Unternehmen (Heindorf 2010, S. 1; Picot et al. 2020, S. 2). Der Wettbewerb zwischen den Unternehmen wird durch die Globalisierung weiter verstärkt (Koch 2017, S. 4). Ein globaler Markt verändert sich schneller und treibt technologische Entwicklungen voran, was die Produktzyklen verkürzt (Heindorf 2010, S. 1). VOLPATO ET AL. liefern mit ihrer Auswertung von 212 Fahrzeugmodellen im Zeitraum zwischen 1970 und 2006 einen empirischen Nachweis abnehmender Modelllaufzeiten in der Automobilindustrie (Volpato et al. 2008, S. 3). Diese liegen zwischen 1998 und 2006 durchschnittlich bei 5,6 Jahren, verglichen mit 10,6 Jahren im Zeitraum zwischen 1970 und 1983, was eine Abnahme um 47,2 % bedeutet (Volpato et al. 2008, S. 6). Während beim VW Golf die erste Generation mit Serienstart im Jahr 1974 neun Jahre verkauft wurde, waren es bei der sechsten Generation weniger als fünf Jahre (Sabadka et al. 2019, S. 1298). Gemäß KAMPKER ET AL. dauert der klassische Produktlebenszyklus in der Automobilindustrie heute sieben Jahre, was aufgrund der rasanten Weiterentwicklung von Technologien noch immer zu lange ist (Kampker et al. 2017b, S. 136). Die Anforderung nach verkürzten Produktlebenszyklen bestätigen auch andere Autoren (Braun et al. 2020, S. 144; Dombrowski et al. 2021, S. 19). SABADKA ET AL. führen zudem eine Halbierung der durchschnittlichen Entwicklungszeit innerhalb der letzten Dekade auf (Sabadka et al. 2019, S. 1295). ULRICH ET AL. verweisen darauf, dass in der Automobilindustrie jeder Tag Verzögerung in der Fahrzeugentwicklung mehrere Hunderttausend Dollar kostet (Ulrich et al. 2020, S. 281). So müssen Automobilhersteller immer komplexer werdende Fahrzeuge in kürzerer Zeit entwickeln und auf den Markt bringen (Heindorf 2010, S. 1; Kampker et al. 2017b, S. 137).

Bedarf an Flexibilität bei Änderungen in der Produktentstehung

Im Zuge fortschreitender Komplexität in der Produktentstehung gewinnt der effiziente Umgang mit technischen Änderungen an Bedeutung (Jania 2004, S. 131; Reichwald et al. 2012, S. 217; Wickel 2017, S. 2). Bei der Entwicklung innovativer Produkte sind Änderungen unvermeidbar (Ullah et al. 2016, S. 25; Yeasin et al. 2020, S. 869). In einer der umfassendsten Analysen zu Änderungen im Automobilbau wurden innerhalb der Lieferketten von Ford, GM und DaimlerChrysler etwa 350.000 Änderungsanträge in einem Jahr gezählt (Wasmer et al. 2011, S. 534). Technische Änderungen sind nicht nur eine Chance für Innovation, sondern auch Aufwandstreiber (Ullah et al. 2016, S. 25; Yeasin et al. 2020, S. 869). Bezugnehmend auf eine Analyse bei der Daimler Chrysler AG betragen die durchschnittlichen Kosten einer Änderung zwischen 20.000 € und 50.000 € (Wasmer et al. 2011, S. 534). Empirische Studien zeigen, dass in der produzierenden Industrie ein hoher Anteil der Arbeitszeit für Änderungen aufgewendet wird (22 % der Zeit im Werkzeugbau, bis zu 50 % der Entwicklungszeit und 18 % der Zeit für Arbeitsvorbereitung) (Reichwald et al. 2012, S. 37; Yeasin et al. 2020, S. 869). Andere Autoren weisen darauf hin, dass aufgrund des bestehenden Zeitdrucks in der Produktentwicklung eine höhere Umsetzungsgeschwindigkeit von Änderungen vorteilhaft ist (Deubzer et al. 2005, S. 8; Sharafi 2013, S. 143). Eine schnelle Umsetzung kann zu positiven Folgeeffekten beitragen, beispielsweise indem eine mögliche Kosteneinsparung des Änderungsvorschlags eher realisiert wird oder spätere Änderungen in Folge einer früheren Produktreife vermieden werden können (Conrat Niemerg 1997, S. 152–160; Deubzer et al. 2005, S. 11). Späte Änderungen verursachen besonders hohe Kosten und Zeitverzögerungen (Reichwald et al. 2012, S. 30; Feldhusen et al. 2013b, S. 93; Ehrlenspiel et al. 2020, S. 14). Verglichen mit Änderungen in der Konzeptphase steigen die Kosten einer Änderung in der Produktionsphase um den Faktor fünf bis zehn (Wasmer et al. 2011, S. 534). Dies liegt auch daran, dass Fertigungsverfahren wie etwa das Gießen mit bauteilspezifischen Werkzeugen arbeiten (Kumke 2018, S. 237–241). Während Änderungen vor Erstellung der Versuchswerkzeuge konstruktiven Aufwand erfordern, führen Änderungen danach zu einer Anpassung der Versuchs- und Serienwerkzeuge (Terwiesch et al. 1999, S. 164). Derartige späte Änderungen sind keine Seltenheit. In empirischen Studien konnte gezeigt werden, dass bei

westlichen OEMs ca. 18 % der Änderungen innerhalb der Vorserienphase respektive ca. 40 % erst ab der Nullserienphase bzw. während des Serienanlaufs stattfinden (Gemmerich 1995, S. 87–92; Aßmann 2000, S. 57; Milling et al. 2008, S. 71; Kratzer et al. 2022). Eine eigene Auswertung bei einem europäischen Automobilhersteller zeigt eine anhaltend hohe Anzahl von Änderungen mit Auswirkung auf Versuchs- oder Serienwerkzeuge. Abbildung 1.1 zeigt, dass von 2012 bis 2020 jährlich mehr als 6.000 Änderungsanträge gestellt wurden.

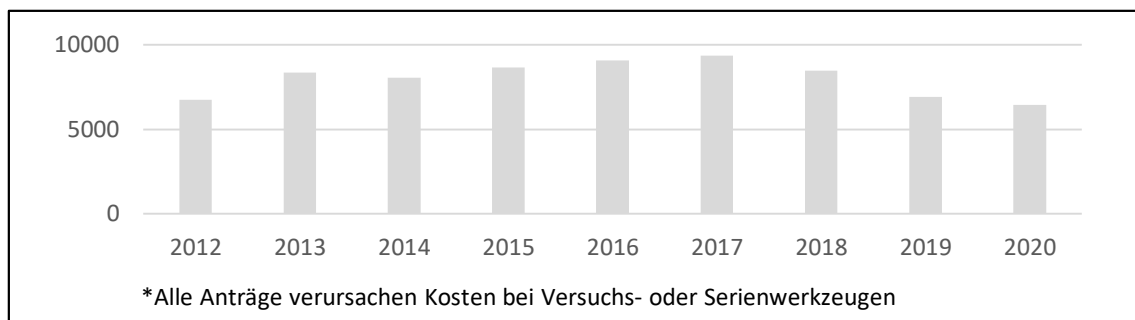


Abbildung 1.1: Eigene Auswertung zu Änderungsanträgen mit Auswirkung auf Werkzeugkosten

Bedarf an Flexibilität bei Änderungen im Produktlebenszyklus

Aufgrund der schnellen Technologieentwicklung in Bereichen wie der Konnektivität oder der Elektromobilität sind Produktlebenszyklen heute mit etwa sieben Jahren noch zu lang, um die Wettbewerbsfähigkeit eines Fahrzeugs über den gesamten Zyklus zu gewährleisten (Kampker et al. 2017b, S. 136). In besonders turbulenten Märkten sind Zeit und Flexibilität die entscheidenden Wettbewerbsfaktoren, um rasch und kostengünstig auf eine sich ändernde Nachfrage zu reagieren (Picot et al. 2020, S. 2). Die Anforderung des Kunden nach aktuellster Technologie in den Fahrzeugen erfordert eine Ergänzung häufigerer Updates zu den üblichen einmaligen Face-Lifts im Produktlebenszyklus (Kampker et al. 2017b, S. 137). Zudem besteht der Wunsch nach Individualisierung. Dieser wird heute häufig mit kundenindividueller Massenproduktion (engl. „Mass Customization“) adressiert (Wang et al. 2017, S. 311). Dabei kombiniert der Kunde standardisierte Module individuell miteinander (Koren et al. 2015, S. 66). Die Kombinationsmöglichkeiten sind durch vordefinierte Produktbaukästen bereits festgelegt, was zu einer endlichen Angebotsvielfalt führt (Schuh et al. 2018, S. 68–72). Eine Weiterentwicklung ist die Massenpersonalisierung, bei der Kunden stärker in das finale Produktdesign involviert werden (Koren et al. 2015, S. 66). Updates und Personalisierung

erzeugen so, gemäß PORTER, ein erhöhtes Leistungsversprechen (1985, S.3). Dadurch entstehen potenzielle Wettbewerbsvorteile.

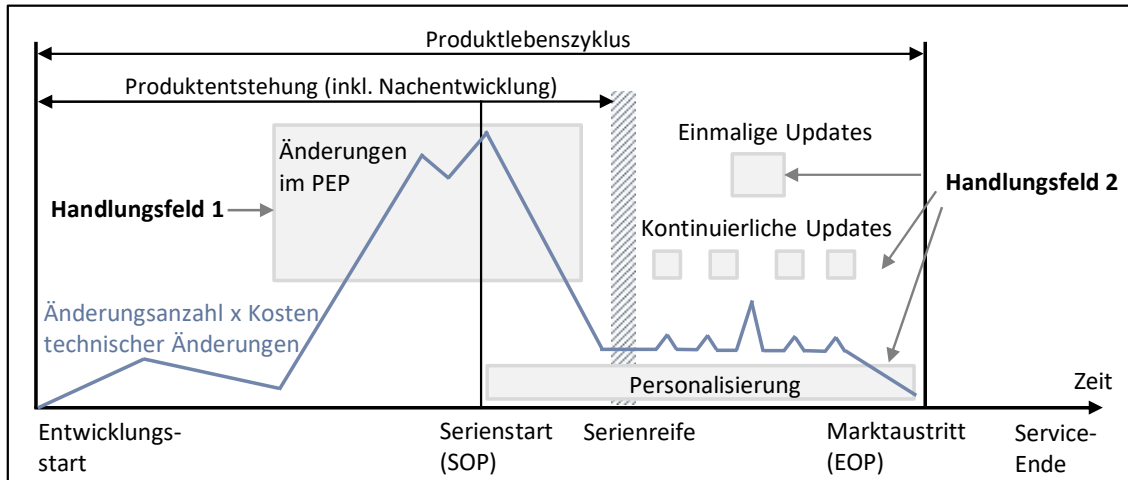


Abbildung 1.2: Bedarf an Änderungsflexibilität (in Erweiterung zu Conrat Niemerg 1997, S. 96)

Einsatz der Additiven Fertigung

Bereits in der Planung eines neuen Produkts werden, so NAUNHEIMER ET AL., Aspekte aus dem Produktumfeld berücksichtigt. Wie Abbildung 1.3 zeigt, gehören hierzu neben Wettbewerbsprodukten, Gesetzgebung und Kundenwünschen auch neue Fertigungsverfahren (Naunheimer et al. 2019b, S. 719).

In der Additiven Fertigung, auch Additive Manufacturing (AM) genannt, werden keine bauteilspezifischen Formen oder Werkzeuge verwendet (Feldhusen et al. 2013b, S. 94; Kumke 2018, S. 237–241). Das zu fertigende Endprodukt wird element- oder schichtweise aufgebaut (VDI 3405, S. 3). Daraus resultiert eine hohe Flexibilität, sodass Änderungen schnell und kostengünstig umgesetzt werden könnten (Chimento et al. 2011, S. 387; Feldhusen et al. 2013b, S. 94; Eyers et al. 2018, S. 2326). AM wird in der Luft- und Raumfahrt und der Medizintechnik bereits in Endprodukten eingesetzt (Zeyn 2017, S. 157). Die Automobilindustrie verwendet AM überwiegend für Prototypen – die Verbreitung von additiv hergestellten Endprodukten ist aufgrund bisher fehlender Wirtschaftlichkeit noch auf Kleinserien begrenzt (Feldhusen et al. 2013b, S. 89; Schmidt 2016, S. 36; Wohlers Associates 2018, S. 179; Lachmayer et al. 2020, S. 25). In einigen wenigen Fahrzeugen, etwa der Marke

Rolls Royce, werden bereits erste AM-Serienbauteile verbaut (BMW GROUP 2020).

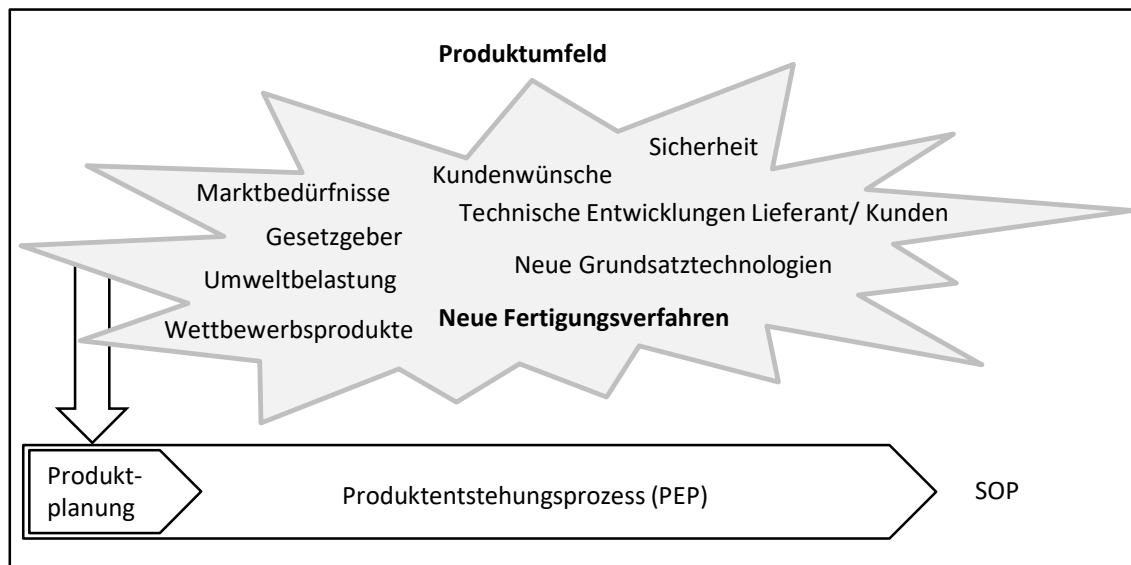


Abbildung 1.3: Produktumfeld (in Anlehnung an Naunheimer et al. 2019b, S. 719)

Zusammenfassend gilt: Änderungen treten meist spät im Produktentstehungsprozess (PEP) auf (Milling et al. 2008, S. 71; Kratzer et al. 2022). Daher sind oft bereits Werkzeuge vorhanden, deren Änderung einen hohen zeitlichen und kostentechnischen Aufwand verursacht (Milling et al. 2008, S. 71; Wasmer et al. 2011, S. 534; Kratzer et al. 2022). Außerdem ist Änderungsflexibilität zur Umsetzung von Updates im Lebenszyklus und zur Personalisierung notwendig (Koren et al. 2015, S. 66; Kampker et al. 2017b, S. 237; Picot et al. 2020, S. 2). Die konstruktive Gestaltungsfreiheit in der Additiven Fertigung führt dazu, dass Änderungen und Updates schneller und kostengünstiger umsetzbar sind und die Personalisierung von Bauteilen erleichtert wird (Feldhusen et al. 2013b, S. 94; Hu 2013, S. 4; Lachmayer et al. 2020, S. 2). Die Technologie ist derzeit aber aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit noch nicht im Automobilbau etabliert (Feldhusen et al. 2013b, S. 89–94; Lachmayer et al. 2020, S. 25). Das Potenzial zur effizienteren Umsetzung von Änderungen (Reichwald et al. 2012, S. 30), die Updatefähigkeit (Kampker et al. 2017b, S. 137) und Personalisierbarkeit (Feldhusen et al. 2013b, S. 94) müssen bereits zur Produktplanung berücksichtigt werden. Werden Änderungsbedarfe nach der Entscheidung für ein Fertigungsverfahren und dem Tätigen von Investitionen in Werkzeuge identifiziert, ist ein

nachträglicher Technologiewechsel als nicht effizient anzusehen und wird daher nicht betrachtet (Terwiesch et al. 1999, S. 164).

1.2 Problemstellung und Lösungshypothese

Nach POPPER beginnt die „Erkenntnis [...] nicht mit Wahrnehmungen oder Beobachtungen oder der Sammlung von Daten [...], sondern sie beginnt mit Problemen“ (Popper 1962, S. 234). Diese entstehen in den angewandten Wissenschaften im Praxiszusammenhang (Ulrich 1981, S. 179). Die der Arbeit zugrundeliegende Problemstellung lässt sich folgendermaßen beschreiben: **Nach heutigem Stand kann im vornhinein nicht hinreichend bewertet werden, welchen Einfluss die Wahl von AM als Serienfertigungstechnologie auf das Änderungsverhalten von Bauteilen im Produktlebenszyklus hat.**

Daher kann das wirtschaftliche Potenzial der Änderungsflexibilität bei der Entscheidung der Fertigungstechnologie nicht berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich die Lösungshypothese:

„Die Möglichkeit flexibler Änderungen kann zu einer Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von additiv gefertigten gegenüber werkzeuggebundenen Serienbauteilen beitragen, wenn die Bewertung dieses Vorteils in den Vergleich von Serientechnologien integriert wird.“

1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen

Ziel der Dissertation ist die Entwicklung einer Methode, die bei der Entscheidung zwischen Fertigungstechnologien unterstützt, indem sie bewertet, welchen Einfluss die Wahl von AM als Serienfertigungstechnologie auf die wirtschaftliche Änderungsflexibilität eines Bauteils im Produktlebenszyklus hat.

Die Zieldimensionen sind in Tabelle 1.1 aufgeführt. Einsatzfeld ist der Automobilbau. Als Stellhebel zum verbesserten Umgang mit Änderungen soll die Additive Fertigung mit dessen

geometrischer Änderungsflexibilität genutzt werden. Die Bewertung soll a priori erfolgen, d.h. bevor die Entscheidung für die passende Fertigungstechnologie eines Bauteils getroffen wurde. Ein, gemäß PORTER, erhöhtes Leistungsversprechen und damit eine erhöhte Wettbewerbsfähigkeit von additiven Serienbauteilen soll dadurch erreicht werden, dass der Vergleich von Herstellungskosten zwischen werkzeuggebundenen und additiven Verfahren um die Bewertung der Änderungsflexibilität ergänzt wird (Porter 1985, S. 3).

Tabelle 1.1: Zieldimensionen der Arbeit

Anwendungsdimension	<ul style="list-style-type: none"> • Automobilbau, Bauteile von zukünftigen Serienfahrzeugen • Einbeziehen der AM-Änderungsflexibilität • A-priori-Betrachtung • Zur Entscheidungsunterstützung für die passende Fertigungstechnologie
Gestaltungsdimension	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteiländerungen im Produktlebenszyklus
Ergebnisdimension	<ul style="list-style-type: none"> • Methodische Bewertbarkeit des Potenzials der AM-Änderungsflexibilität

Forschungsfragen

Aus der beschriebenen Zielstellung sowie allen handlungsleitenden Dimensionen ergibt sich die folgende zentrale Forschungsfrage der Dissertation: **„Wie lässt sich das wirtschaftliche Potenzial der Additiven Fertigung hinsichtlich Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus eines Automobils bewerten, um dieses Potenzial bei der Entscheidung für die geeignete Serienfertigungstechnologie eines Bauteils zu berücksichtigen?“**

Zur Beantwortung wird die zentrale Forschungsfrage in Teilforschungsfragen unterteilt.

1. Wie kann das Änderungsverhalten werkzeuggebundener Bauteile inklusive der dabei entstehenden Effekte im PEP, a priori bewertet werden?
2. Wie kann die Änderungsflexibilität von additiv gefertigten Bauteilen a priori bewertet werden, und wie kann so der Einfluss, den die Wahl der Fertigungstechnologie auf Änderungen im PEP hat, beurteilt werden?
3. Wie kann beurteilt werden, bei welchen Bauteilen Änderungsflexibilität im Lebenszyklus nach Serienstart erforderlich ist und AM daher die passende Fertigungstechnologie darstellt?

1.4 Wissenschaftlicher Rahmen und Gliederung der Arbeit

Der in dieser Arbeit vorhandene Sachzusammenhang adressiert ein in der industriellen Praxis vorhandenes Problem (siehe Abschnitt 1.2) und wurde in der angewandten Wissenschaft noch nicht angemessen behandelt und gelöst, siehe Stand der Wissenschaft in Kapitel 4. Ziel der Arbeit ist es daher, die vorhandene Problemstellung mit wissenschaftlichen Methoden adäquat zu bearbeiten.

Die wissenschaftstheoretische Positionierung der Arbeit nach ULRICH ET AL. ist in Abbildung 1.4 veranschaulicht. ULRICH ET AL. unterscheiden in Formal- und Realwissenschaften (Ulrich et al. 1976, S. 305). Die Formalwissenschaften, zu denen Philosophie, Logik und Mathematik gehören, konstruieren einerseits Zeichensysteme und legen andererseits Regeln fest, um die Zeichensysteme zu verwenden (Ulrich et al. 1976, S. 305). Die Formalwissenschaften schaffen dadurch einen wissenschaftlichen Handlungsrahmen für die Realwissenschaften (Ulrich et al. 1976, S. 306). Die Realwissenschaften werden, abhängig davon, ob ein theoretisches oder praktisches Ziel verfolgt wird, in die reinen Grundlagenwissenschaften und die angewandten Handlungswissenschaften eingeteilt. Während das vorwiegende Ziel der Grundlagenwissenschaften ist, Erklärungsmodelle zu bilden, wird bei angewandten Handlungswissenschaften die Analyse menschlicher Handlungsalternativen zur Gestaltung sozialer und technischer Systeme fokussiert. Vordergründiges Ziel ist es daher, Entscheidungsmodelle oder Entscheidungsprozesse zu entwickeln (Ulrich et al. 1976, S. 305). Die Ingenieur- und Betriebswissenschaften werden den angewandten Handlungswissenschaften zugeordnet (Ulrich et al. 1976, S. 306). Im Sinne der wissenschaftstheoretischen Positionierung nach ULRICH ET AL. ist die vorliegende Arbeit aufgrund des hohen Praxisbezugs und der methodischen Unterstützung des menschlichen Handelns den Handlungswissenschaften, genauer, den Ingenieurwissenschaften zuzuordnen.

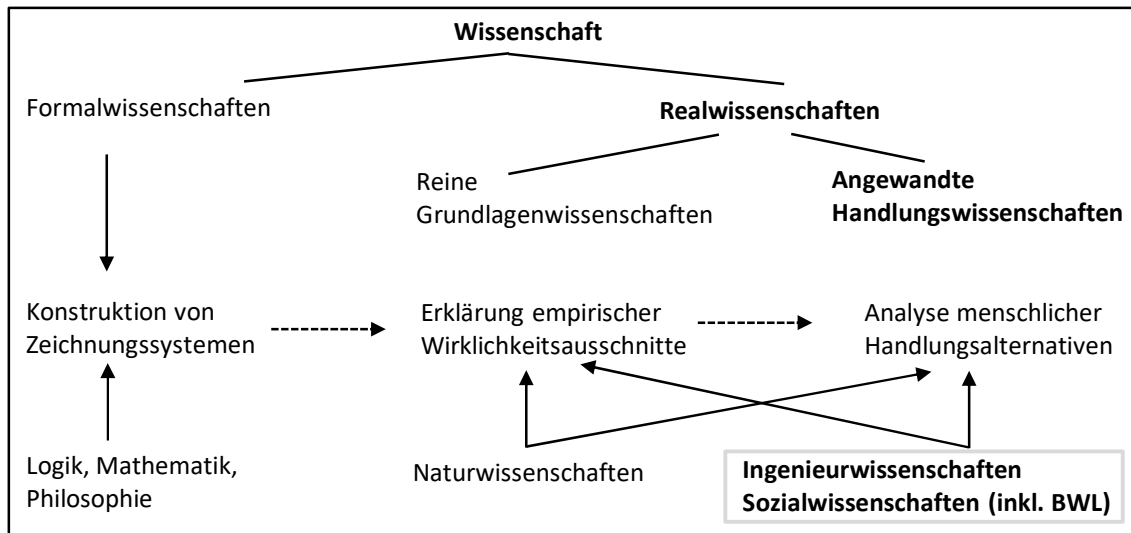


Abbildung 1.4: Wissenschaftstheoretische Positionierung der Arbeit (in Anlehnung an Ulrich et al. 1976, S. 305)

Da jeder Forscher aufgrund seiner individuellen Erfahrungen und seinem persönlichen Wissen über ein eigenes Glaubenssystem verfügt, welches durch Vorurteile unweigerlich den Forschungsprozess beeinflusst, (Guba et al. 1994, S. 107) sind Methoden erforderlich, die die Objektivität der Forschung sicherstellen (Ulrich et al. 1976, S. 306). Ulrich empfiehlt, die Subjektivität durch Beobachtungsregeln zu kontrollieren und Interessenbezüge durch Wertfreiheitsregeln zu vermeiden oder zumindest offenzulegen. Zudem sind "wissenschaftliche Erkenntnisse, die nicht [...] in präzisen Begriffen ausgedrückt werden können, [...] wertlos" (Ulrich et al. 1976, S. 306). Dieses Kommunikationsproblem der Wissenschaft ist durch präzise Sprache zu adressieren. Zudem wird Unschärfe erzeugt, wenn konkrete Erkenntnisse in abstrakte, verallgemeinerbare Aussagen überführt werden. Daher wird der Abstraktionsprozess durch Induktionsregeln kontrolliert, die die Verallgemeinerungsfähigkeit einzelner Erkenntnisse bewusst begrenzen (Ulrich et al. 1976, S. 306). Die beschriebenen Problematiken werden durch Festlegen des Entdeckungs-, des Begründungs- und des Verwendungszusammenhangs adressiert (Ulrich et al. 1976, S. 306).

Der Entdeckungszusammenhang ist der gedankliche Bezugsrahmen des Forschungsprozesses. Er umfasst die Abgrenzung des Objektbereichs, die Definition der konkreten Problemstellung, die notwendigen Grundbegriffe und Variablen und die Aufstellung und Systematisierung von Arbeitshypothesen (Ulrich et al. 1976, S. 306).

Im Begründungszusammenhang wird anschließend der gedankliche Bezugsrahmen empirisch überprüft. Über Induktion können aus einzelnen Beobachtungen allgemeingültige Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden (Ulrich et al. 1976, S. 306). In diesem Zusammenhang sei das Induktionsproblem erwähnt, das besagt, dass aus Beobachtungen der Vergangenheit kein logischer Schluss auf zukünftige Fälle gemacht werden könne. Als Grund wird angeführt, dass die Annahme der „Ähnlichkeit von Vergangenheit und Zukunft“ nicht logisch zu rechtfertigen ist (Steminger 2011, S. 185). Dennoch sind induktive Methoden zum Erlangen wissenschaftlicher Erkenntnisse weit verbreitet (Popper 1959, S. 3). Nach REICHENBACH sind induktive Schlüsse sogar bestens geeignet, um Aussagen über zukünftige Ereignisse zu machen (Reichenbach 1930, S. 177). Über den Wahrheitsgehalt wird anhand der induktiven Wahrscheinlichkeit entschieden (Reichenbach 1930, S. 180). Eine Alternative zur Schaffung des Begründungszusammenhangs ist die Deduktion, bei der vorhandene Gesetzmäßigkeiten überprüft werden. Diese Dissertation beinhaltet sowohl induktive Methoden wie den Erkenntnisgewinn aus qualitativen empirischen Studien als auch deduktive Methoden, d.h. das Erlangen neuer Erkenntnisse durch quantitativ empirisches Überprüfen von zuvor formulierten Hypothesen.

Im dritten Aspekt, dem Verwendungszusammenhang wird überprüft, inwieweit eine „[...] gesellschaftliche Relevanz von Wissenschaft [...]“ und den im Forschungsprozess entstandenen Erkenntnissen vorliegt (Ulrich et al. 1976, S. 307). Der Automobilbau ist von gesellschaftlicher Relevanz (Bratzel 2014, S. 94; Ambos et al. 2020, S. 6). Die in dieser Dissertation erarbeiteten Erkenntnisse liefern einen Beitrag, änderungsflexible Fertigungstechnologien im Automobilbau zu etablieren. Ein verstärkter Einsatz resultiert, wenn erkennbare Vorteile entstehen – entweder durch ein erhöhtes Leistungsversprechen oder durch einen aufgrund gesteigerter Wirtschaftlichkeit niedrigeren Preis bei gleicher Leistung (Porter 1985, S.3). Beides sind denkbare Resultate der Arbeit.

Angesichts der Einordnung der Arbeit in die Handlungswissenschaften wird übergreifend die explorative Forschungsmethodik gewählt (vgl. Abbildung 1.5). Diese beschränkt sich nicht auf die Überprüfung von theoriegeleiteten Hypothesen, sondern ermöglicht die Entwicklung theoretischer Aussagen (d.h. neuer Hypothesen) auf Grundlage systematischen

Erfahrungswissens (Kubicek 1977, S. 13). Nach Kubicek werden in der explorativen Forschung wissenschaftliche Aussagen über einen „geleiteten und auf systematischem Erfahrungswissen basierenden Lernprozess“ [...] entwickelt, „der sowohl die Gewinnung von Erfahrungswissen als auch seine kreative Umsetzung in theoretischen Aussagen problematisiert“. Den Mittelpunkt explorativer Forschung bildet ein heuristischer Bezugsrahmen – ein provisorisches Erklärungsmodell, „das den Forschungsprozess steuert und Orientierungshilfen für die Lösung praktischer Probleme liefern soll“ (Tomczak 1992, S. 84). Das forschungsmethodische Vorgehen (vgl. Abbildung 1.5) ist dabei geprägt vom theoretischen Vorwissen des Autors und seinen persönlichen Erfahrungen als Angestellter am Additive Manufacturing Campus der BMW Group.

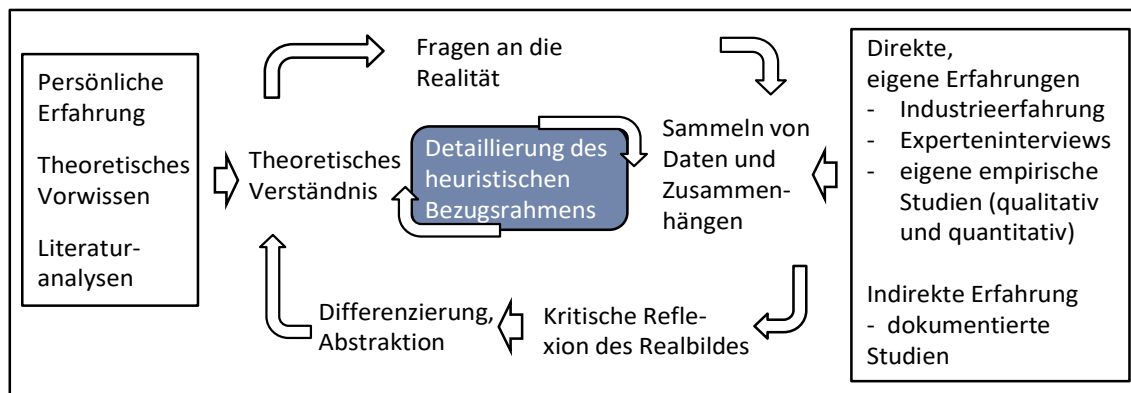


Abbildung 1.5: Forschungsmethodisches Vorgehen (in Anlehnung an Kubicek 1977, S. 14; Tomczak 1992, S. 84)

Ausgangspunkt der Forschung war die Doktorandentätigkeit in der Vorentwicklung am Additive Manufacturing Campus. Dadurch war eine enge Vernetzung mit Prozessspezialisten additiver Fertigungstechnologien gegeben. In Gesprächen mit den Experten zeigte sich, dass die Potenziale der Technologie bis dato noch nicht hinreichend bekannt sind. Weiter wurde die Ausrichtung der Forschung durch das Forschungsprojekt IDAM beeinflusst, an welchem der Autor beteiligt war. Dabei forschten ein Konsortium aus kleinen und großen Unternehmen sowie diverse Forschungseinrichtungen an der Industrialisierung der Additiven Serienfertigung (BMW GROUP 2022). Der Fokus auf den Serieneinsatz der Additiven Fertigung wurde weiter bestärkt durch das Mitwirken in der Projektrunde „Ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbewertung von additiv gefertigten Serienbauteilen“. Die entsprechende

Projektarbeit erfolgte von 2019 bis 2022. Im Zuge dessen wurden unterschiedliche Potenziale additiver Serienbauteile bewertet. Das Projektteam bestand aus Wissenschaftlern verschiedener Universitäten sowie Angestellten aus den Bereichen Additive Fertigung, Einkauf, Karosserieentwicklung und Gesamtfahrzeugentwicklung. So wurde die Perspektive des Autors auf praktische Problemstellungen im Automobilbau erweitert. Der heuristische Bezugsrahmen konnte währenddessen durch umfangreiche Recherchen und das Studieren forschungsrelevanter Literatur kontinuierlich weiterentwickelt werden. Die Betreuung studentischer Abschlussarbeiten vertieften das Fachwissen zur Thematik. Anhand dieser Erfahrungen konnten die Potenziale der Additiven Fertigung mit den praktischen Problemstellungen während der Produktentstehung und des Lebenszyklus eines Automobils vernetzt werden. Im Zuge der Dissertation wurden Interviews mit Experten aus Entwicklung, Einkauf, Produktion und Vertrieb sowie empirische Studien unter Leitung des Autors durchgeführt. Diese sind sowohl qualitativ explorativer Natur als auch quantitativ konfirmatorischer Natur. Die Ergebnisse dienen der Datensammlung, und stellen darüber hinaus Zusammenhänge her, die wiederum den heuristischen Bezugsrahmen detaillieren. Dadurch wird die explorative Forschung, welche den Rahmen der Arbeit darstellt, iterativ um hypothesenprüfende Untersuchungen ergänzt. Der heuristische Bezugsrahmen ist in Abbildung 1.6 zusammengefasst. Aufgrund des Tätigkeitsfeldes des Autors umfasst dieser Bezugsrahmen den Automobilbau. Forschungsschwerpunkt innerhalb der Branche sind Änderungen im Produktlebenszyklus, welche gemäß der Literaturrecherchen und der Praxiserfahrungen eine große Herausforderung im Automobilbau darstellen. Als Instrument für einen verbesserten Umgang mit Änderungen wird die Additive Fertigung betrachtet. Aus den Projektaktivitäten und dem Austausch mit Entwicklungsingenieuren und Prozessspezialisten der Additiven Fertigung kristallisierte sich die Änderungsflexibilität als Potenzial heraus. Es soll daher untersucht werden, inwiefern die der Additiven Fertigung, in der Literatur unterstellte, Änderungsflexibilität in der Praxis einen positiven Einfluss hat. Erfolgt diese Bewertung, bevor die Entscheidung für ein Serienfertigungsverfahren getroffen wird, kann die Wettbewerbsfähigkeit additiv gefertigter Serienbauteile mutmaßlich verbessert werden.

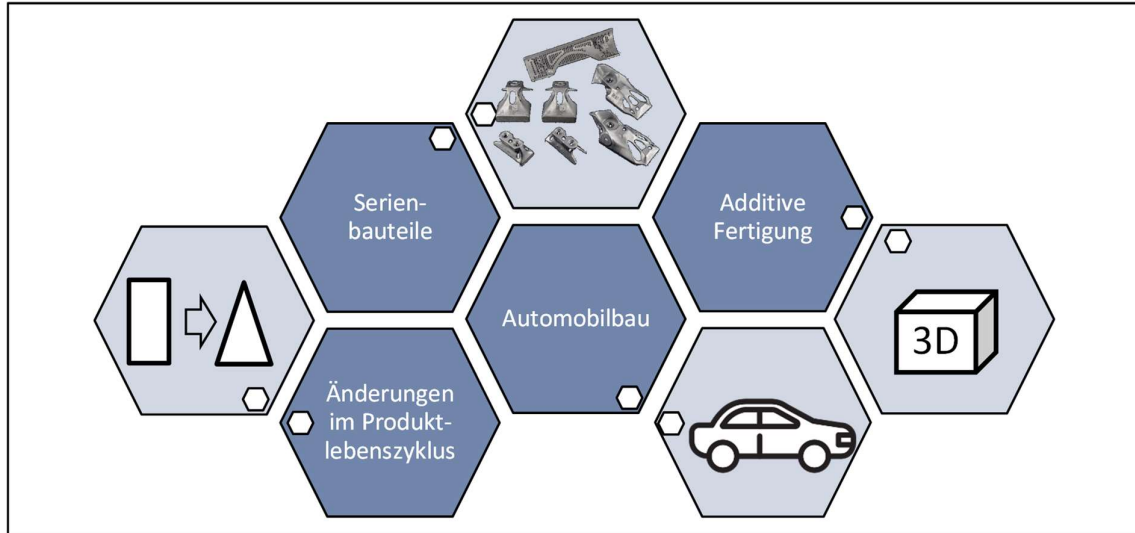


Abbildung 1.6: Heuristischer Bezugsrahmen (Serienbauteile, von CC-Lizenz ausgenommen BMW GROUP 2020)

Die Struktur der Arbeit, dargelegt in Abbildung 1.7, orientiert sich an den sieben Phasen der angewandten Forschung nach ULRICH (Ulrich 1981, S. 201). Demnach soll [...] „ein anwendungsorientiertes Forschungsvorhaben von vornherein auf in der Praxis festgestellte Problemsituationen ausgerichtet sein [...], eine Hauptaufgabe in der Untersuchung des relevanten Anwendungszusammenhangs [...]“ liegen, und die erarbeiteten Regeln und Modelle auf deren Konsequenzen im Anwendungszusammenhang geprüft werden (Ulrich 1981, S. 221).

In **Kapitel 2** werden dem Leser problemrelevante Grundlagen vermittelt, die für die Einordnung der Arbeit erforderlich sind. Dabei werden Charakteristika der Additiven Fertigung erläutert, der Produktlebenszyklus im Automobilbau dargestellt und die Rolle von Änderungen darin beschrieben. Außerdem werden Trends im Automobilbau behandelt, die mutmaßlich den Bedarf an Änderungsflexibilität steigern. In **Kapitel 3** werden eigene empirische Studien zu geometrischen Änderungen im PEP sowie eine Studie zu Bedarfen nach Änderungsflexibilität im Lebenszyklus ab dem Serienstart von Fahrzeugen vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird der relevante Anwendungszusammenhang der Arbeit erfasst. In **Kapitel 4** werden die Anforderungen und Bewertungskriterien an die zu entwickelnde Methode dargelegt. Diese ergeben sich aus den in Kapitel 2 vorgestellten Grundlagen sowie aus den in Kapitel 3 durchgeführten empirischen Studien. In Kapitel 4 werden zudem die für

das Forschungsziel relevanten vorhandenen Ansätze beschrieben und hinsichtlich der Anforderungen überprüft. Dadurch wird gezeigt, dass die Forschungsfragen mit bestehenden Methoden nicht allumfassend beantwortet werden können. In **Kapitel 5** wird das Modellierungskonzept vorgestellt und es werden die notwendigen methodischen Grundlagen vermittelt. Im nachfolgenden **Kapitel 6** werden die einzelnen Bestandteile der entwickelten Methode ausgestaltet und detailliert. Die Methode wird in **Kapitel 7** anhand von Anwendungsbeispielen aus der Automobilindustrie veranschaulicht und validiert. In **Kapitel 8** werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst, kritisch reflektiert und der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

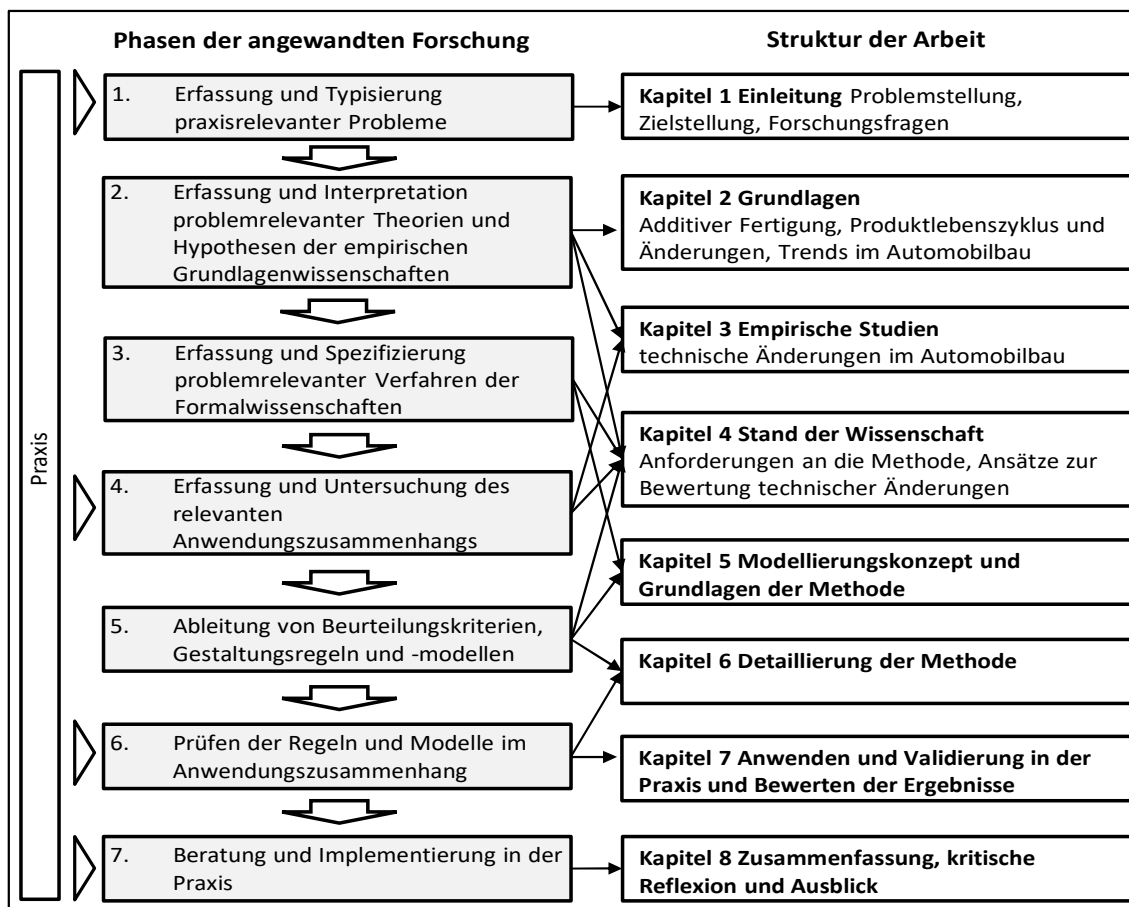


Abbildung 1.7: Forschungsphasen und Struktur der Arbeit, abgeleitet von (Ulrich 1981, S. 201)

2 Grundlagen zu Additiver Fertigung, Produktlebenszyklus und Änderungsmanagement

In diesem Kapitel werden Grundlagen dargelegt, die zum inhaltlichen Verständnis notwendig sind. Dabei werden in Abschnitt 2.1 die wesentlichen Grundzüge der Additiven Fertigung (AM) erläutert, welche einen Stellhebel zum effizienteren Umgang mit Änderungen darstellt. Aus der vorliegenden Arbeit soll u.a. ein Leitfaden für einen verbesserten Umgang mit Änderungen in der automobilen Produktentstehung, respektive im weiteren Produktlebenszyklus, entstehen. Daher werden in Abschnitt 2.2 der Produktlebenszyklus eines Automobils aufgezeigt und die Rolle von Änderungen darin beschrieben. Trends sind Treiber von Veränderungen, auf die es zu reagieren gilt (McKinsey 2016). Somit ergibt sich aus Trends die Notwendigkeit einer Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus, weshalb in Abschnitt 2.3 die derzeit relevantesten Trends im Automobilbau diskutiert werden.

2.1 Additive Fertigung

In Unterabschnitt 2.1.1 erfolgt eine Einordnung der Additiven Fertigung, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu konkurrierenden Fertigungstechnologien herauszuarbeiten. Anschließend werden in Unterabschnitt 2.1.2 die Verfahren und deren vielseitige Einsatzfelder beschrieben. In Unterabschnitt 2.1.3 wird der Prozessablauf erläutert. Dadurch wird klar, dass bei der Analyse der Änderungsflexibilität von AM eine Betrachtung der Gesamtprozesskette anstelle einer Fokussierung auf den Hauptprozess notwendig ist. Abschließend werden in Unterabschnitt 2.1.4 die Stärken und Schwächen von AM den Anforderungen im Automobilbau gegenübergestellt, woraus sich Chancen und Risiken ergeben. Der Abschnitt zeigt, dass die Chance geometrischer Änderungsflexibilität und

Personalisierbarkeit den Risiken fehlender Wirtschaftlichkeit und mangelnder Bewertbarkeit vorhandener Potenziale gegenübersteht.

2.1.1 Einordnung der Additiven Fertigung in die Fertigungsverfahren

Nach DIN 8580 (vgl. Abbildung 2.1) werden als Fertigungsverfahren „alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern bezeichnet.“ Dies beinhaltet die „Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand,“ [...] „die Veränderung dieser Form sowie“ [...] die „Veränderung der Stoffeigenschaften“ (DIN 8580, S. 4). Es werden die sechs Hauptgruppen Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaften ändern unterschieden (DIN 8580, S. 7). Eine vollständige Gruppierung der Fertigungsverfahren inklusive Beschreibung der Wirkprinzipien sowie explizite Verfahrensbeispiele mit Gruppenzuordnung sind in DIN 8580 nachzulesen. Eine umfassende Darstellung der im Automobilbau verbreiteten Fertigungsverfahren ist bei KUMKE zu finden (Kumke 2018, S. 237–241).

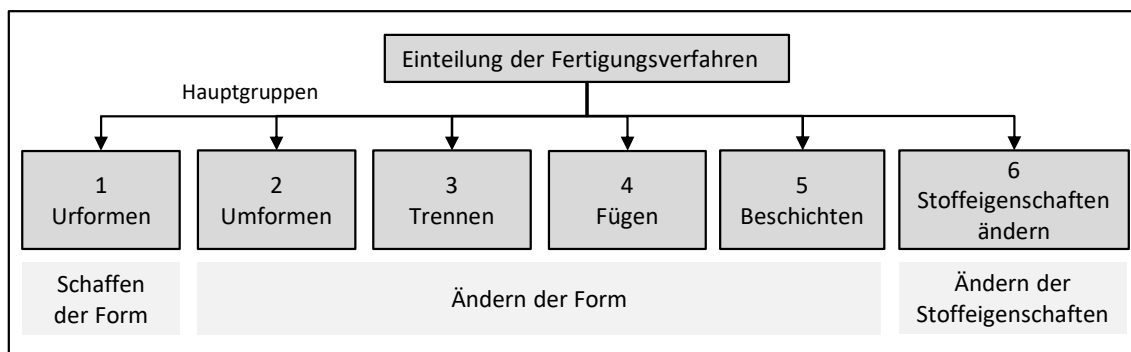


Abbildung 2.1: Einteilung der Fertigungsverfahren (in Anlehnung an DIN 8580, S. 7)

Eine eindeutige Einordnung der Additiven Fertigung in die DIN 8580 ist aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Wirkprinzipien (siehe Abschnitt 2.1.2) nicht möglich (Kumke 2018, S. 9). Einige Autoren ordnen AM in die Gruppe der urformenden Verfahren ein (Fritz et al. 2018, S. 116; Lachmayer et al. 2020, S. 2). Manche Wirkprinzipien, wie das Verschmelzen oder Verkleben sowie das physikalische oder chemische Auftragen einzelner Schichten lassen eine Zuordnung zur Hauptgruppe Fügen oder Beschichten zu (Berger et al. 2017, S. 10). Alternativ

werden im englischsprachigen Raum additive (Erzeugung einer bestimmten Geometrie durch Aneinanderfügen von Volumenelementen) von subtraktiven (Erzeugen der Geometrie durch Abtragen definierter Bereiche) und formativen (das Werkstück wird bei konstantem Volumen in die gewünschte Geometrie umgeformt) Fertigungstechnologien abgegrenzt (Gebhardt 2016, S. 1–2; ISO/ASTM 52900). Aus Sicht des Autors ist die Abgrenzung von AM zu subtraktiven und formativen Fertigungstechnologien geeignet. Das Schaffen einer Form durch Aneinanderfügen von Volumenelementen ist ein erster Hinweis auf geometrische Gestaltungsfreiheit und dadurch auf die Änderungsflexibilität.

2.1.2 Verfahren und Einsatzfelder der Additiven Fertigung

Im folgenden Unterabschnitt werden die Vielseitigkeit additiver Verfahren und mögliche Einsatzfelder von AM im Automobilbau aufgezeigt. ISO/ASTM 52900 unterteilt additive Verfahren in sieben Kategorien, vgl. Abbildung 2.2.

Prozessstufen	Ausgangsmaterial	Zustand Ausgangsmaterial	Materialverteilung	Bindemechanismus
Einstufig	Kunststoff	Pulver	Pulverbett	Direktes thermisches Verschmelzen: Laser, Elektronenstrahl, Lichtbogen
Mehrstufig	Metall	Pellets	Abscheidüse	Verschmelzen über Binder
	Keramik	Platten/ Folien	Plattenstapel	
	Verbundwerkstoff	Strang/ Draht	Behälter/ Wanne	
		Flüssigkeiten	Pressling/ Grünling	Aushärten mittels UV

BJT Binder Jet Technology	VPP VAT Poly- merisation	DED Direct Energy Deposition	MEX Material Extrusion	MJT Material Jetting	PBF Powder Bed Fusion	SHL Sheet Lamination
----------------------------------------	---------------------------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------

Abbildung 2.2: Unterschiede additiver Verfahren und Darstellung der sieben Hauptkategorien (in Anlehnung an Lachmayer et al. 2020, S. 11–12; ISO/ASTM 52900)

Dabei erfolgt eine Differenzierung nach der Anzahl der Prozessstufen, dem verwendeten Ausgangsmaterial, dem Zustand des Ausgangsmaterials und der Art und Weise wie Material in der AM-Maschine verteilt wird (Lachmayer et al. 2020, S. 12; ISO/ASTM 52900). Außerdem unterscheidet sich die Methodik, wie die Schichten erzeugt und miteinander verbunden werden, was das Endergebnis wesentlich beeinflusst (Gibson et al. 2015, S. 2–3). Für eine detaillierte Verfahrensbeschreibung sei auf ISO/ASTM 52900 verwiesen. Allen aufgeführten Verfahren liegt ein schichtweiser Aufbau zugrunde (Lachmayer et al. 2020, S. 1; ISO/ASTM 52900, S. 1–20). Für die Dissertation ist zunächst keine Einschränkung auf bestimmte Verfahren notwendig und gewünscht. Lediglich die Anwendungsbeispiele beruhen auf den derzeit im Automobilbau verbreiteten pulverbettbasierten Verfahren (PBF).

Die Herstellung von Prototypen ist heute das Haupteinsatzfeld additiver Fertigungsverfahren im Automobilbau (Sarvankar et al. 2019). Über Rapid Prototyping werden Konzept-, Geometrie-, und Funktionsprototypen hergestellt (Fritz et al. 2018, S. 116). Anders als bei einem technisch identischen Prototyp weichen diese hinsichtlich Material und Oberflächenqualität vom Endprodukt ab (Fritz et al. 2018, S. 116). Darüber hinaus werden über Rapid Tooling komplexe und aufwändige Formen und Werkzeuge gefertigt (Zäh 2013, S. 10; Zeyn 2017, S. 174–175; Fritz et al. 2018, S. 116). Auch werden erste Serienbauteile über Rapid Manufacturing hergestellt (Fritz et al. 2018, S. 116; BMW GROUP 2022). Die BMW Group produziert seit dem Jahr 2018 eine Befestigung für die Halterung des Cabrio-Verdecks im i8 Roadsters über selektives Laserstrahlschmelzen (Jacqueline O 2018). Mini bietet im Bereich After Sales Personalisierung über AM an (Wohlers Associates 2018, S. 179). Bei dem Modell Copen Roadster von Daihatsu kann der Kunde Front- und Heckschürzen mit aufwändigen geometrischen Mustern in verschiedenen Farben auswählen (Babel et al. 2017, S. 78). Zudem werden Ersatzteile, insbesondere solcher älterer Baureihen, additiv oft wirtschaftlicher hergestellt, da eine Langzeitbevorratung entfällt (Zeyn 2017, S. 174). Verkürzte Lieferketten einer dezentralen AM-Produktion verbessern die Wirtschaftlichkeit weiter (Sarvankar et al. 2019). So bietet Daimler für einige große LKWs additiv gefertigte Ersatzteile an (Wohlers Associates 2018, S. 23).

Diese Arbeit adressiert den Einsatz von AM für Serienbauteile inklusive damit verbundener Prototypen in späten Phasen der Produktentstehung. Im Bereich After Sales kann die mit AM einhergehende Änderungsflexibilität genutzt werden, um Bauteile zu personalisieren.

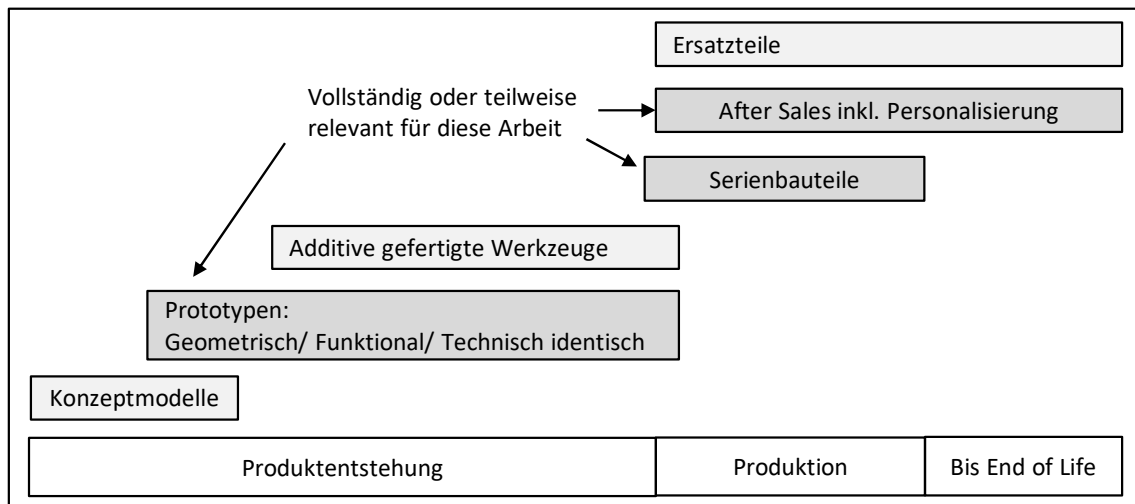


Abbildung 2.3: Einsatzfelder der Additiven Fertigung im Automobilbau und Verortung der Arbeit (Darstellung in Anlehnung an Feldhusen et al. 2013b, S. 52; Zeyn 2017, S. 174; Fritz et al. 2018, S. 116; Sarvankar et al. 2019)

2.1.3 Prozessablauf additiver Fertigungstechnologien

Ein additives Bauteil wird in drei Prozessstufen, dem Pre-, In-, und Post-Prozess hergestellt, vgl. Abbildung 2.4 (VDI 3405, S. 6–7). Zunächst wird im CAD eine 3D-Repräsentation des Bauteils erzeugt (Gibson et al. 2015, S. 4). Dieses wird über Triangulation und Polygonisierung in ein Facettenmodell konvertiert (VDI 3405, S. 25). Das Bauteil wird dann im verfügbaren Bauraum der Maschine angeordnet und es werden – sofern notwendig – Hilfsgeometrien für den Bauprozess erzeugt (Gibson et al. 2015, S. 5). Je nach Bauteilgröße und Prozess werden mehrere Bauteile einem Baujob im verfügbaren Bauraum zugeordnet (Zeyn 2017, S. 133). Im Anschluss werden die Schichtdaten für den Fertigungsprozess erzeugt und an die Maschine transferiert (Gibson et al. 2015, S. 5). Nach der physischen Anlagenvorbereitung wird das Bauteil automatisiert hergestellt (Feldmann et al. 2016, S. 7). Auf die Entnahme des Bauteils folgen Nachbehandlungsschritte, wie etwa das Entfernen von Stützgeometrie und Restpulver, die abhängig von der Geometrie und dem AM-Verfahren sind (Feldmann et al. 2016, S. 7;

Kratzer et al. 2021a). Zudem existieren Nachbehandlungsverfahren, um die geforderten Eigenschaften hinsichtlich Oberflächengüte, Mechanik oder Haptik zu erreichen, bevor das Bauteil verwendet werden kann (VDI 3405, S. 7; Gibson et al. 2015, S. 6).

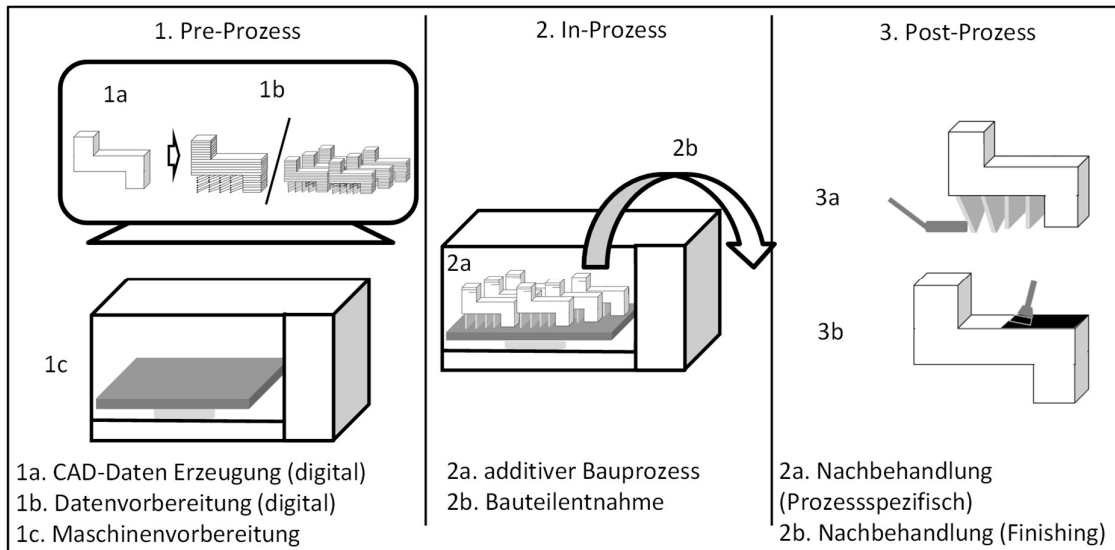


Abbildung 2.4: Prozessablauf additiver Fertigungstechnologien (in Anlehnung an Gibson et al. 2015, S. 4; Gebhardt 2016, S. 25; Kumke 2018, S. 10)

Die Herstellung eines AM-Bauteils ist demnach nicht auf den Druckprozess begrenzt. Die übrigen Prozessschritte müssen im Rahmen der Arbeit bei der Beurteilung der geometrischen Änderungsflexibilität berücksichtigt werden, da sie diese möglicherweise einschränken.

2.1.4 Charakterisierung der Additiven Fertigung

Die nachfolgende Gegenüberstellung von Stärken und Schwächen additiver Technologien mit typischen Anforderungen im Automobilbau soll zeigen, welche Chancen und Risiken bei der Anwendung von AM vorhanden sind. Während Abbildung 2.5 eine umfassende Zusammenstellung zeigt, soll in dem Unterabschnitt nur auf die für diese Arbeit relevanten Aspekte eingegangen werden (in der Abbildung dick hervorgehoben).

Durch den schichtweisen Aufbau ohne bauteilspezifische Werkzeuge besteht eine hohe geometrische Gestaltungsfreiheit (Feldhusen et al. 2013a, S. 94; Eyers et al. 2018; Prakash et

al. 2018; (ISO/ASTM 52900, S. 1). Dadurch können kleine Losgrößen, Varianten und personalisierte Bauteile mit wenig Mehraufwand hergestellt werden (Gebhardt 2016, S. 467; Eyers et al. 2018; Prakash et al. 2018). Neben der kundenindividuellen Personalisierung geht mit der Gestaltungsfreiheit zudem eine geometrische Flexibilität in Bezug auf Änderungen einher, die im Automobilbau vorteilhaft ist (Wang et al. 2017; Eyers et al. 2018).

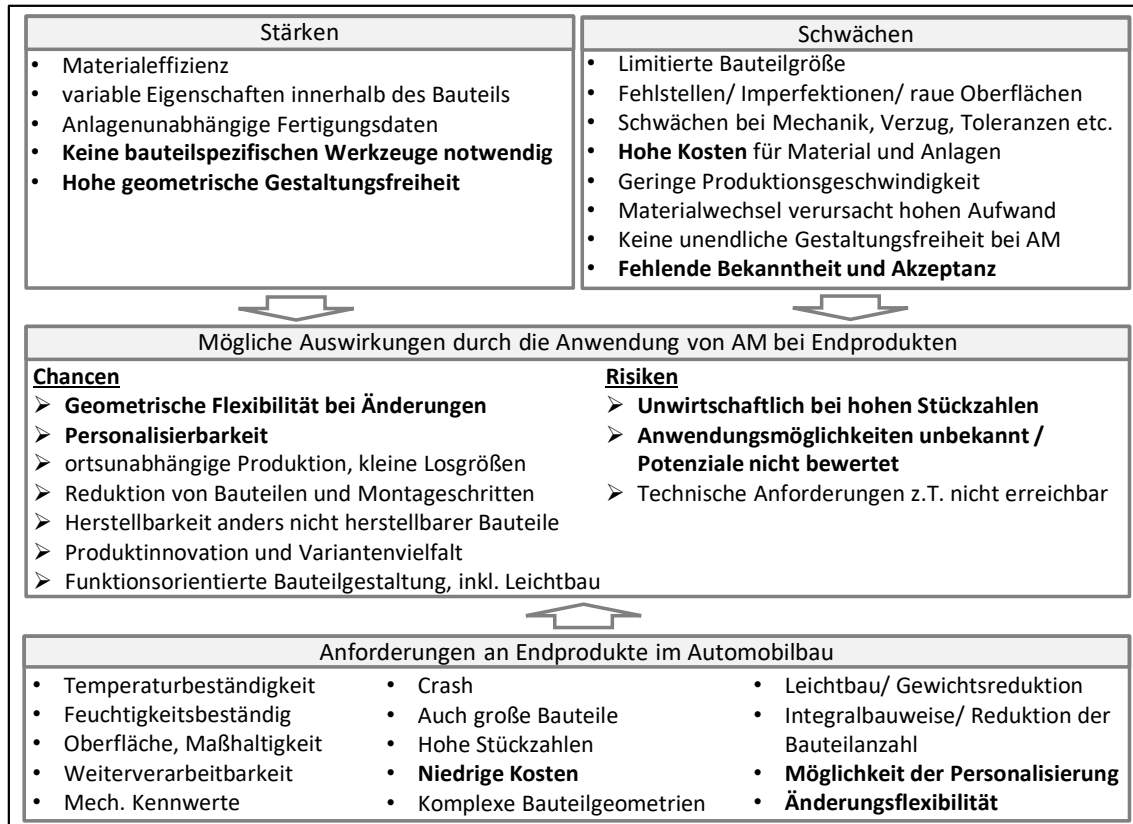


Abbildung 2.5: Charakterisierung der Additiven Fertigung im Abgleich mit werkzeuggebundenen Fertigungsverfahren (Eigene Darstellung mit Informationen aus Wasmer et al. 2011; Braess et al. 2013, S. 506–556; Feldhusen et al. 2013a; Buchmayr et al. 2015; Huang et al. 2015; Gebhardt 2016, S. 329–471; Attaran 2017; Gourav et al. 2017; Wang et al. 2017; Eyers et al. 2018; Kumke 2018, S. 19; Prakash et al. 2018; Besenfelder et al. 2019; Kratzer et al. 2021a; ISO/ASTM 52900)

Die Kosten der verwendeten Materialien und Produktionsanlagen sind hoch (Buchmayr et al. 2015; Attaran 2017; Prakash et al. 2018). Bei einer gleichzeitig geringen Produktionsgeschwindigkeit können Bauteile mit zunehmender Größe und Stückzahl nicht wirtschaftlich hergestellt werden (Buchmayr et al. 2015). Dies liegt vor allem daran, dass zwar die bauteilspezifischen Investitionen (keine Werkzeuge notwendig) gering sind, die Kosten jedoch

anders als bei werkzeuggebundenen Verfahren mit zunehmender Stückzahl nicht skalieren (vgl. Abbildung 2.6) (Buchmayr et al. 2015; Kumke 2018, S. 19).

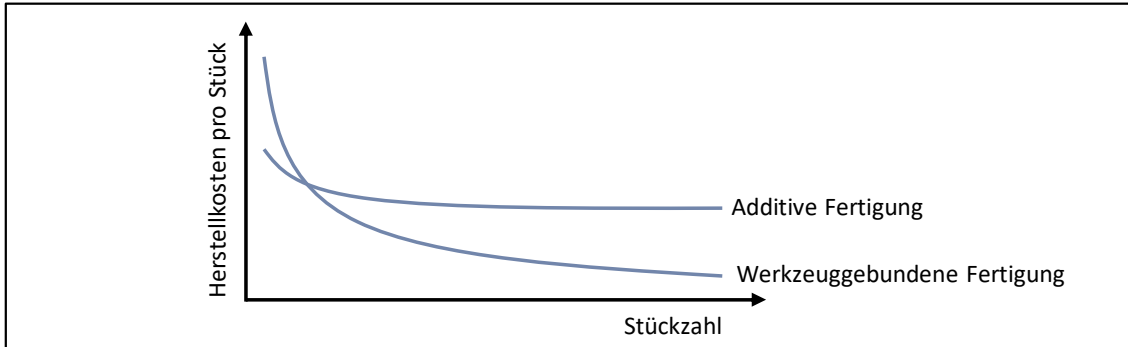


Abbildung 2.6: Stückzahlabhängige Wirtschaftlichkeit additiver Verfahren (in Anlehnung an Kumke 2018, S. 19)

Dem steht gegenüber, dass im Automobilbau viele baugleiche und zum Teil große Bauteile, wie etwa eine Türaußenhaut, benötigt werden und die Kostensensitivität im Vergleich zu anderen Branchen besonders hoch ist (Braess et al. 2013, S. 506–551; Sarvankar et al. 2019). In Bezug auf die Arbeit hervorzuheben ist, dass zum Teil Kenntnisse über die Anwendungsmöglichkeiten der Technologien fehlen und die Potenziale für viele Anwender nicht bewertbar sind (Huang et al. 2015; Gourav et al. 2017; Besenfelder et al. 2019).

Eine adäquate Bewertung der Vorteile könnte die Wettbewerbsfähigkeit von AM-Technologien erhöhen und zu einem verstärkten Einsatz im Automobilbau beitragen. Hier setzt die Arbeit an. Die Änderungsflexibilität als Stärke soll bewertet werden, um die im Automobilbau vorhandenen Anforderungen zielgerichtet zu adressieren.

2.2 Der Produktlebenszyklus und die Rolle von Änderungen

In diesem Abschnitt werden der Produktlebenszyklus im Automobilbau und die Rolle von Änderungen darin erläutert. In der vorangehenden Beschreibung des Produktlebenszyklus (Unterabschnitt 2.2.1) wird dabei ein besonderer Fokus auf den Produktentstehungsprozess gelegt. Aufbauend darauf werden in Unterabschnitt 2.2.2 technische Änderungen charakterisiert und eine Definition für die in der Arbeit relevanten geometrischen Änderungen

erarbeitet. Um herzuleiten, wie geometrische Änderungen durch die Additive Fertigung verbessert werden sollen, wird in Unterabschnitt 2.2.3 der Ablauf von Änderungsprozessen beschrieben und veranschaulicht, wie Änderungsdaten in Unternehmen dokumentiert werden. Das Aufzeigen der Ursachen technischer Änderungen in Unterabschnitt 2.2.4 soll dem Leser darüber hinaus vermitteln, weshalb heute technische Änderungen durchgeführt werden. In Unterabschnitt 2.2.5 werden die negativen Auswirkungen technischer Änderungen, wie etwa hohe Kosten und Zeitdauer, beschrieben und deren Einflussgrößen identifiziert. Daraus leiten sich Stellhebel zum verbesserten Umgang mit Änderungen ab.

2.2.1 Produktentstehung und Produktlebenszyklus im Automobilbau

Zunächst werden die Phasen des Produktlebenszyklus und der Produktentstehungsprozess (PEP), die Phase mit den meisten technischen Änderungen, charakterisiert (Conrat Niernerg 1997, S. 96; Ahmed-Kristensen et al. 2012; Kratzer et al. 2022).

Produktlebenszyklus

Der Lebenszyklus im Marktlebenszyklusmodell umfasst den Zeitraum zwischen der Markteinführung und dem Ausscheiden eines Produktes, vgl. Abbildung 2.7 (Raubold 2011; Cao et al. 2012).

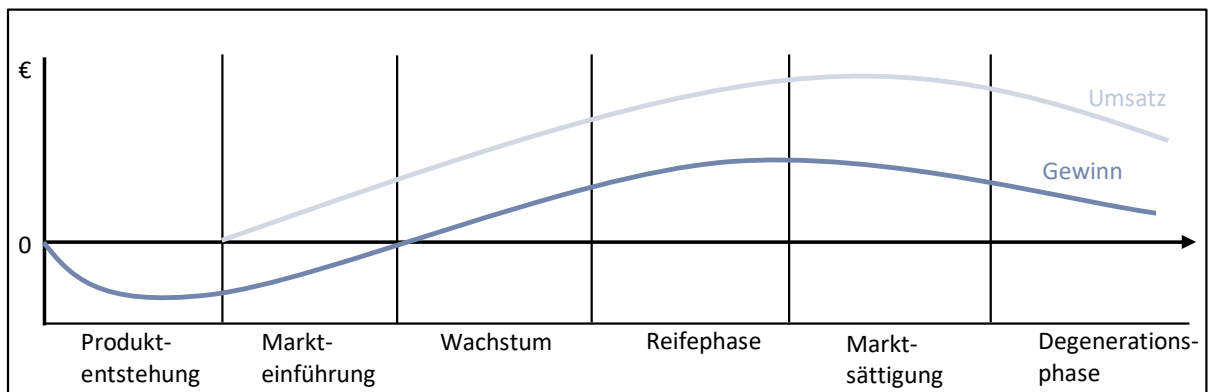


Abbildung 2.7: Der Produktlebenszyklus (in Anlehnung an Levitt 1965; Raubold 2011, S. 25; Nauenheimer et al. 2019b, S. 719)

Die typische Länge eines Produktlebenszyklus beträgt sieben Jahre (Kampker et al. 2017b, S. 136). Vor der Markteinführung entstehen Kosten für Entwicklung, Produktionsvorbereitung und Vermarktung (Raubold 2011, S. 26; Naunheimer et al. 2019a, S. 718–719). Nach erfolgreicher Markteinführung steigen in der Wachstumsphase die Umsätze und die zuvor entstehenden Kosten können allmählich gedeckt werden (Levitt 1965). In der Reifephase, der meist profitabelsten und längsten Phase, sind die Umsätze am höchsten. Aufgrund zunehmend starker Konkurrenz fallen die Gewinne (Raubold 2011, S. 27). In der Sättigungsphase gehen die Umsätze zurück, bevor die Nachfrage des veralteten Produktes in der Degenerationsphase ihren Tiefpunkt erreicht und das Produkt aus dem Markt ausscheidet (Levitt 1965). Um den Lebenszyklus zu verlängern und Gewinn und Umsatz auf hohem Niveau zu stabilisieren, empfiehlt Levitt gezielte Maßnahmen (Levitt 1965, S. 15). Diese sollen in der Produktentstehung vorgehalten werden. Technische Änderungen können den Produktlebenszyklus somit verlängern (Gille 2013, S. 70–71; Schuh et al. 2021b, S. 229). In der Automobilindustrie haben sich zum Erhalt der Produktattraktivität einmalige Face-Lifts etabliert (Kampker et al. 2017b, S. 137). Die auch unter Modellpflege bekannte Maßnahme findet bei einem heute üblichen Fahrzeuglebenszyklus von etwa sieben Jahren zur Halbzeit statt (Weber 2009, S. 9; Kampker et al. 2017b, S. 137).

Produktentstehungsprozess

Der Produktentstehungsprozess (PEP) ist dem Marktlebenszyklus vorgelagert, vgl. Abbildung 2.7 – wird aber in dieser Arbeit – gemäß der Darstellung von FELDINGER als Bestandteil des Produktlebenszyklus betrachtet (Feldinger 2018, S. 7). Der PEP ist der Kernprozess, um die strategische Vision eines Fahrzeugs in die Realität eines ersten Kundenfahrzeugs zu überführen (Weber 2009, S. 1). Der erforderliche technische Umfang und der daraus resultierende finanzielle und zeitliche Aufwand hängt vom Umfang der Neugestaltung, dem Innovationsgrad sowie der Anzahl unterschiedlicher Varianten ab (Weber 2009, S. 1). Ein Fahrzeug besteht aus Systemen, Modulen und Baugruppen (Braess et al. 2013, S. 132). Diese setzen sich aus Komponenten und Einzelteilen zusammen, deren Funktionen in Wechselwirkung zueinander stehen (DIN 6789). Ein Einzelteil ist dadurch charakterisiert, dass es nicht weiter demontiert werden kann (DIN EN ISO 10209, S. 84). Je nach Modell besteht ein

Fahrzeug – auch aufgrund zahlreicher Varianten – aus bis zu 20.000 Einzelteilen (Schedlbauer 2008, S.23; Hofacker 2015). Aufgrund der Komplexität sind neben dem OEM (Original Equipment Manufacturer) in der Wertschöpfung eine Vielzahl an Lieferanten für Gesamtsysteme (z.B. Bremssystem), Baugruppen (z.B. Cockpit), Komponenten und Einzelteile beteiligt. Die Lieferanten werden dabei meist bereits während der Produktentstehung eingebunden (Heitmann 2007, S. 131–147; Hofacker 2015). So sind nicht nur die Organisationsbereiche des OEMs, wie Entwicklung, Arbeitsvorbereitung, Prototypenbau, Qualitätssicherung, Prüf- und Betriebsmittelerstellung, Einkauf, Logistik, Produktion sowie Marketing und Vertrieb, beteiligt, sondern, je nach Wertschöpfungstiefe, auch die entsprechenden Organisationsbereiche der Lieferanten (Bullinger et al. 1995, S. 19; Feldinger 2018, S. 9–11). Die PEPs der Fahrzeughersteller weichen im Detail voneinander ab. Dennoch existieren Gemeinsamkeiten, sodass eine industrieweit akzeptierte Grundstruktur etabliert ist (Weber 2009, S. 9; Braess et al. 2013, S. 1137). In Abbildung 2.8 werden die wichtigsten Bestandteile des PEP veranschaulicht.

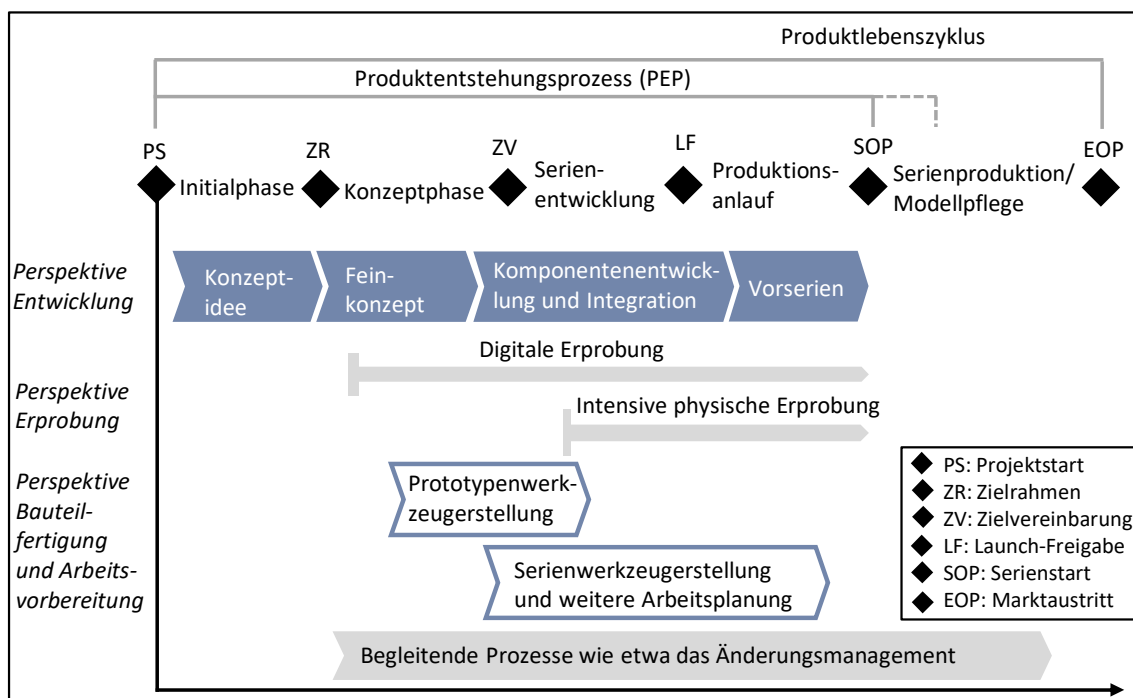


Abbildung 2.8: Der PEP (Eigene Darstellung in Anlehnung an Milling et al. 2008, S. 68; Weber 2009, S. 9; Braess et al. 2013, S. 1135; Feldhusen et al. 2013a, S. 23; Feldinger 2018, S. 9–11)

Der PEP kann in die Initialphase, die Konzeptphase, die Serienentwicklung und den Produktionsanlauf sowie die anschließende Serienproduktion eingeteilt werden (Weber 2009, S. 9; Kumke 2018, S. 39). Nachdem innerhalb der Produktstrategie festgelegt wird, welche Fahrzeuge wann auf den Markt kommen und welche Innovationen aus der Vorentwicklung in dem Fahrzeug industrialisiert werden sollen, beginnt mit Projektstart die Initialphase (Weber 2009, S. 8). Die aus der Strategie definierten Ideen, Ziele und Anforderungen werden in einen Steckbrief zusammengefasst und es wird ein betriebswirtschaftlicher Zielrahmen festgelegt (Weber 2009, S. 9; Heine 2017, S. 179). Basierend auf dem Steckbrief werden die ersten Konzeptideen im Rahmen der Konzeptentwicklung detailliert und ein Technikmodell entworfen, das die wesentlichen Funktionen abbildet (Braess et al. 2013, S. 1143). Um bereits in der Konzeptauslegung Zielkonflikte zu erkennen und zu beseitigen, werden digitale Prototypen erstellt (Rudert et al. 2015). Mit modernen Simulationstechniken können so wesentliche Fahrzeugfunktionen virtuell getestet und verbessert werden (Braess et al. 2013, S. 1154–1155; Eichhorn et al. 2017, S. 46). Neben der digitalen Erprobung wird in der Konzeptphase, basierend auf den Daten der Technikträger, ein erster physischer Fahrzeugprototyp aufgebaut, um das Fahrzeugkonzept abzusichern (Braess et al. 2013, S. 1144).

Nach Konzeptbestätigung und vollständiger Bestätigung der Ziele (Zielvereinbarung) beginnt die Serienentwicklung, bei der die einzelnen Komponenten im Detail auskonstruiert werden (Weber 2009, S. 9). Die Serienentwicklung wird von mehreren physischen Erprobungsphasen begleitet (Terwiesch et al. 1999, S. 166; Braess et al. 2013, S. 1149; Kumke 2018, S. 39). Die dafür notwendigen Bauteile entstammen zu Beginn der Serienentwicklung einem Prototypenwerkzeug, welches weniger exakt und auf geringere Stückzahlen ausgelegt ist als das spätere Serienwerkzeug (Martens 2008, S. 113; Naunheimer et al. 2019b, S. 725).

Mit der P-Freigabe beginnt in der Arbeitsvorbereitung, ausgehend von den Produktdaten, die Planung der für die Fertigung erforderlichen Prozesse (Eversheim 2002, S. 4–5; Braess et al. 2013, S. 622). Diese Prozessgestaltung umfasst die Planungsvorbereitung, Stücklistenverarbeitung, Prozess- und Operationsplanung, die Montage- und Prüfplanung, die Fertigungs- und Prüfmittelplanung (zu der auch die Entwicklung von bauteilspezifischen Serienwerkzeugen gehört), sowie die NC-Programmierung und Kostenplanung (Eversheim

2002, S. 8; Wiendahl et al. 2020, S. 166–169). Ein weiterer Bestandteil der Arbeitsplanung ist die Arbeitssystemplanung bzw. Produktionsmittelgestaltung. Diese bezieht sich auf langfristige Aufgaben mit einem Planungshorizont von fünf bis 20 Jahren, wie etwa der Planung von Fertigungsmitteln, Personal, Flächen und Gebäude, Lager- und Transport sowie der Investitionsrechnung (Eversheim 2002, S. 12; Wiendahl et al. 2020, S. 166–169).

Mit der Launch-Freigabe, etwa ein Jahr vor Serienstart, beginnt die Herstellung der Vorserienfahrzeuge (Braess et al. 2013, S. 1150). Dies erfolgt in mehreren Stufen (Bauphasen), wobei mit zunehmender Seriennähe der Reifegrad steigt. Bauteile und Gesamtfahrzeug werden dabei mit seriennahen oder Serien-Anlagen und Werkzeugen hergestellt (VDA 2009; Rudert et al. 2015).

Sowohl für den Aufbau von Fahrzeugprototypen als auch für die Vorserien werden vom OEM Teilebereitstellungstermine festgelegt, die einige Wochen vor dem Start der entsprechenden Bauphase liegen (Eichhorn et al. 2017, S. 47). Damit alle Bauteile rechtzeitig zu den Vorserien verfügbar sind, existiert, je nach Dauer der Werkzeugfertigung, eine bauteilbezogene Beschaffungsfreigabe (Eichhorn et al. 2017, S. 46). Bei Werkzeugen mit langer Anfertigungsdauer erfolgt diese entsprechend früh im PEP. Bei der Umstellung von Prototypen- auf Serienwerkzeuge ergeben sich zeitraubende Optimierungsschleifen, da bereits früher erkannte Fehler oft erst im Serienwerkzeug behoben werden (Martens 2008, S. 115). Nach erfolgreicher Typzulassung in den Märkten können Endkundenprodukte produziert werden (Wister 2004; Morche et al. 2018, S. 181). Innerhalb der Serienbetreuung nach Serienstart erfolgen zusätzlich zur erwähnten Modellpflege meist weitere Änderungen zur Qualitätsverbesserung und Kostenreduzierung (Braess et al. 2013, S. 1151).

2.2.2 Charakterisierung technischer Änderungen

Änderungen sind ein integraler Bestandteil von Produktentstehungsprozessen (Bullinger et al. 2003; Düchting 2005, S. 81; Wickel 2017, S. 9). Daher ist das Änderungsmanagement ein etablierter Begleitprozess im PEP (Feldhusen et al. 2013a, S. 23). DIN 6789-3 beschreibt eine Änderung als „vereinbarte Festlegung eines neuen anstelle des bisherigen Zustandes“. Einige

Autoren spezifizierten diese Definition und determinieren das Bauteil bzw. das Produkt als Änderungsobjekt (Wright 1997, S. 33; Huang et al. 1999, S. 21; Huang et al. 2003, S. 481; Wickel 2017, S. 10), während andere auch Zeichnungen und Software miteinbeziehen (Conrat Niemerg 1997, S. 47; Terwiesch et al. 1999, S. 160; Jarratt et al. 2011, S. 104; Shanker et al. 2012, S. 3; Hamraz et al. 2013a, S. 476). Zudem werden z.T. die mit einer Produktänderung einhergehenden Prozessänderungen als technische Änderung verstanden (Conrat Niemerg 1997, S. 47; Köhler 2009, S. 11). Es existieren Definitionen, die Art und Umfang nicht einschränken (Jarratt et al. 2011, S. 105–106; Wickel 2017, S. 10), während andere bspw. die Veränderung struktureller Merkmale wie Geometrie, Passungen, Funktionen, Material und Abmessungen als technische Änderung verstehen (Huang et al. 1999, S. 21; Huang et al. 2003, S. 481). HAMRAZ ET AL. erweitern diese Perspektive mit der Theorie zu FBS-Linkage. Änderungen sind nicht nur eine Modifikation der Struktur (Structure), sondern auch des Verhaltens (Behavior z.B. mechanische Festigkeit), der Funktionen (Function z.B. Leistung) sowie eine Modifikation der Verbindungen zwischen Funktionen und Verhalten bzw. zwischen Verhalten und der Struktur eines technischen Gegenstands (Hamraz et al. 2013a, S. 474–476). Auch hinsichtlich des betrachteten Zeitpunkts existieren Unterschiede. Dieser wird entweder auf die Produktionsphase (Wright 1997, S. 33) oder den Entwicklungsprozess eingeschränkt (Conrat Niemerg 1997, S. 97) oder auf den gesamten Produktlebenszyklus ausgeweitet (Köhler 2009, S. 11). Um sie von im kreativen Entwicklungsprozess zwingend gewünschten Iterationen zu unterscheiden, definieren einige Autoren technische Änderungen auch dadurch, dass sie an bereits freigegebenen Objekten stattfinden (Conrat Niemerg 1997, S. 47; Terwiesch et al. 1999, S. 160; Jarratt et al. 2011, S. 105; Hamraz et al. 2013a, S. 474–476; Wickel 2017, S. 10). Ziel der Dissertation ist die Entwicklung einer Methode, die bei der Entscheidung zwischen Fertigungstechnologien unterstützt, indem sie bewertet, welches Potenzial die Wahl von AM als Serienfertigungstechnologie auf ein Bauteil in Bezug auf Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus hat. Dementsprechend umfasst die neu entwickelte Definition technische Änderungen, die mutmaßlich mit werkzeuggebundenen Fertigungstechnologien höhere Aufwände erzeugen als mit der werkzeuglosen Additiven Fertigung, sodass der Einsatz der Additiven Fertigung einen Vorteil darstellt.

„Als technische Änderungen werden geometrische Veränderungen an in der Regel freigegebenen Bauteilständen verstanden, die zu jeder Phase im Produktlebenszyklus stattfinden können und Auswirkungen auf die Fertigung beziehungsweise auf die für die Herstellung eines Bauteils notwendigen Sonderbetriebsmittel (meist Werkzeuge) im Sinne von Zeit- und Kostenaufwänden haben.“

In diese Definition fallen sowohl Änderungen im PEP als auch geometrische Updates im Produktlebenszyklus sowie die Personalisierung von Bauteilen.

2.2.3 Ablauf von Änderungsprozessen und Dokumentation von Änderungsdaten

In dieser Arbeit wird der von VDA und SASIG (Strategic automotive product data standards industry group) vorgeschlagene Änderungsprozess (vgl. Abbildung 2.9) zugrunde gelegt (VDA 4965 V2.0). In der SASIG kooperieren der VDA und weitere Automobilverbände (u.a. aus den USA, Japan, Frankreich und Schweden) zum Zweck der Erstellung, dem Austausch und der gemeinsamen Verwendung von Dokumenten zu beispielsweise der Produktqualität und dem Management technischer Daten (VDA 4965 V2.0, S. 1). Ausgehend von einer Abweichung des zukünftigen Soll-Zustandes wird zunächst geprüft, inwieweit es einer technischen Änderung bedarf oder ob das Problem anderweitig adressiert werden kann (Conrat Niemerg 1997, S. 52; VDA 4965 V2.0, S. 11).

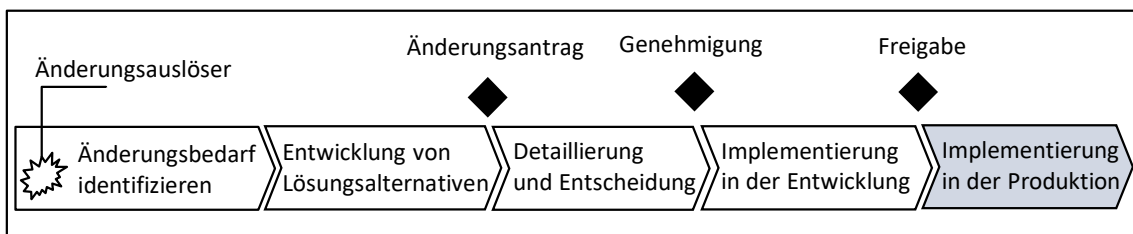


Abbildung 2.9: Der Änderungsprozess (in Anlehnung an VDA 4965 V2.0)

Im Fall eines technischen Änderungsbedarfs werden Lösungsalternativen entwickelt, aus denen mindestens eine Alternative ausdetailliert wird. Nachdem ein Änderungsantrag im Änderungsmanagementsystem erstellt wurde, wird dieser von den betroffenen Fachstellen

geprüft (Terwiesch et al. 1999, S. 165; Sharafi 2013, S. 115–116; Wickel 2017, S. 88). Hierzu gehört auch eine Auswirkungsanalyse der technischen Änderung (Jarratt et al. 2011, S. 106; Wickel et al. 2015, S. 132). Dabei wird neben den direkten Auswirkungen das Risiko bewertet, inwieweit sich die Änderung auf andere Bestandteile des Produkts auswirkt (Eckert et al. 2001). Diese Analyse der Änderungsausbreitung ist bis heute ein zentraler Forschungsschwerpunkt im Änderungsmanagement (Clarkson et al. 2004; Ullah et al. 2018; Yeasin et al. 2020). Spricht etwas gegen die Umsetzung des Änderungsantrags, kann dieser zu jeder Zeit angepasst, abgelehnt oder storniert werden (VDA 4965 V2.0, S. 16). Iterationen innerhalb der Entwicklung und Detaillierung von Lösungsalternativen sind in der Praxis normal (Elezi et al. 2011, S. 6). Um alle Auswirkungen zu bewerten, sind innerhalb der Organisation an der Bearbeitung eines Antrags mitunter Abteilungen aus Forschung & Entwicklung, Änderungsmanagement, Arbeitsvorbereitung, Werkzeugbau, Einkauf, Qualitätssicherung, Logistik, Produktmanagement, Vertrieb und Controlling beteiligt (Conrat Niemerg 1997, S. 118; Gebhardt 2018, S. 31). Am Ende dieser Bewertung steht die Genehmigung des Antrags, die in einem Änderungsauftrag resultiert (VDA 4965 V2.0, S. 11; Sharafi 2013, S. 115–116). Mit der Durchführung der Änderung in der Entwicklung werden CAD-Modelle, Zeichnungen, Stücklisten und weitere Dokumente geändert, auf Vollständigkeit geprüft und letztendlich freigegeben (Gebhardt et al. 2018, S. 26). Nach der Implementierung in der Produktion, also der Modifizierung von Produktionsprozessen, Maschinen und Werkzeugen sowie allen weiteren Prozessen innerhalb der Logistikkette, ist der Änderungsprozess nach VDA 4965 abgeschlossen (Gebhardt et al. 2018, S. 26). In anderen Modellen schließt sich eine Review Phase an, bei der analysiert wird, ob die verfolgten Ziele erreicht wurden und wie die dabei gewonnenen Erkenntnisse den Umgang mit zukünftigen Änderungen verbessern können (Jarratt et al. 2005; Wickel et al. 2015, S. 132–133).

Aufgrund der Produkthaftungs- und Nachweispflicht ist eine Dokumentation der Informations-, Prüf- und Freigabeprozesse notwendig, weshalb das Änderungsmanagement heute durch PDM- und ERP-Systeme unterstützt wird (Gausemeier 2006, S. 243–244; Köhler 2009, S. 64; Wickel 2017, S. 30). In Industrieunternehmen werden die Änderungsanträge in Workflow-Systemen erfasst, die ebenso die Steuerung des Änderungsprozesses bis zur

Genehmigung und Freigabe übernehmen (Gausemeier 2006, S. 243–244; Wickel 2017, S. 30). Erfasste Änderungsdaten sind laut REICHWALD ET AL. „alle im Rahmen der Änderungsabwicklung anfallenden Informationen“ (Reichwald et al. 2012, S. 326). Von WASMER ET AL. wurde daher ein Änderungsdatenmodell entwickelt, das sich an den Vorgaben der VDA 4965 orientiert und eine einheitliche Erfassung von Änderungsdaten ermöglichen soll (Wasmer et al. 2011, S. 545). Die im Rahmen der Änderungsbearbeitung gesammelten Änderungsdaten umfassen laut einer Analyse von WICKEL ET AL. die Attribute einer Änderung (u.a. ID, Status, Auslöser, Ursachen, Zeitpunkte), den Umfang (betroffene Bauteile, Baugruppen, Zeichnungen, Software etc.), die Organisation (Änderungsantragssteller, betroffene Abteilungen und verantwortliche Personen) sowie die Auswirkungen in Bezug auf Dauer, Kosten und Qualität (Wickel et al. 2014, S. 695–697). Bei SHARAFI ist ein ausführliches Datenmodell eines Änderungsantrags im Automobilbau dargestellt (Sharafi 2013, S. 157).

2.2.4 Ursachen technischer Änderungen

Um zu verstehen, weshalb technische Änderungen durchgeführt werden, werden im Folgenden Änderungsursachen kategorisiert und veröffentlichte Daten dazu vorgestellt.

Änderungen erfolgen aufgrund von Fehlern im Entwicklungsprozess (z.B. Konstruktionsfehler) oder aufgrund notwendiger Neuerungen (Conrat Niemerg 1997, S. 54). Die Umsetzung hat zwingende Gründe (z.B. Sicherheitsgründe) oder erzeugt wirtschaftliche Vorteile wie Kosteneinsparung oder Ertragssteigerung (Conrat Niemerg 1997, S. 53). Beauftragt wird eine Änderung aufgrund einer Ist- oder einer Soll-Abweichung. Ist-Abweichungen sind etwa Funktions-, Fertigungs- oder Montageprobleme oder Kostenüberschreitungen (Conrat Niemerg 1997, S. 52). Diese Änderungen resultieren oft aus Erprobungsergebnissen sowie Erkenntnissen aus der Fertigung (Braess et al. 2013, S. 1150). Soll-Veränderungen sind neue Anforderungen, etwa durch neue technische Lösungen, neue Kundenanforderungen oder Gesetzesvorgaben (Conrat Niemerg 1997, S. 52). In Abbildung 2.10 sind die im Unterabschnitt genannten Änderungsursachen zusammengefasst. Dabei erfolgt eine Einteilung in Änderungen aufgrund Ist- bzw. Soll-Abweichungen sowie eine Unterscheidung, ob eine

Änderungsursache primär innerhalb des Unternehmens oder extern initiiert wird. FRICKE ET AL. identifizierten in einer Fallstudie mit 13 Firmen aus unterschiedlichen Industrien acht Treiber von Änderungen (Fricke et al. 2000, S. 170–172). Genannt werden sich kontinuierlich verändernde Kundenanforderungen, Reklamationen sowie die Komplexität und der Innovationsgrad von Produkten. Außerdem führt ein hoher Vernetzungsgrad zwischen Komponenten zu Folgeänderungen. Eine unzureichende Kommunikation zwischen den Schnittstellen, die Anpassung von Anforderungen, um die Entwicklungszeit zu verkürzen sowie eine mangelhafte Entscheidungsdisziplin bei der Umsetzung von Maßnahmen sind weitere Ursachen (Fricke et al. 2000, S. 170–172). In einer industrieübergreifenden Expertenstudie von LANGER ET AL. werden als wesentliche Ursachen eine unzureichende Anforderungsdefinition, mangelhafte Kommunikation und menschliche Fehler genannt (Langer et al. 2012, S. 4). Änderungen werden von Kunden, Markttrends und F&E Abteilungen initiiert und verfolgen das Ziel, Produktfehler zu beheben (Ist-Abweichung) oder veränderte Anforderungen zu erreichen (Soll-Abweichungen) (Langer et al. 2012, S. 4). AHMED-KRISTENSEN ET AL. analysieren in einer Fallstudie 1.510 Änderungsanträge im Lebenszyklus eines Flugzeugtriebwerks und identifizierten Gewicht, Änderungen der Anforderungen, Zertifizierungen, Fertigungs- und Montageprobleme, Langlebigkeit, Kostenreduktion und Erfahrungsrückfluss aus der Nutzungsphase als Änderungsursachen (Ahmed-Kristensen et al. 2012, S. 108–109). SHANKER ET AL. analysierten 1.241 Änderungen innerhalb der Produktionsphase von Fahrzeugen. Davon wurden 77 % intern verursacht, etwa durch Fehler in der Zeichnung, Kostenreduzierung, Fertigungsprobleme, Design-Korrekturen und Problemen bei Lagerbeständen, wie etwa Materialknappheit. Die übrigen 23 % wurden außerhalb des Unternehmens durch Kostensenkungsmaßnahmen der Lieferanten oder veränderte Kundenanforderungen initiiert (Shanker et al. 2012, S. 10). ECKERT ET AL. identifizierte in Workshops Ursachen von Änderungen. Genannt werden Komplexität, Veränderungen der Anforderungen, Regulierungen, technologische Veränderungen, Wettbewerb, Unsicherheiten in der Entwicklung, Kosten, Machbarkeit, die Behebung von Problemen, sowie Upgrades (Eckert et al. 2009, S. 49–52). Sharafi analysierte standardisierte Begründungscodes von 46.392 Änderungsanträgen eines Automobilherstellers zwischen 2005

und 2010. Als Hauptursachen identifizierte er das Erreichen der Produktreife, die Steigerung des Ertrags, die Weiterentwicklung des Fahrzeugs, neue interne Vorgaben sowie Gesetzesänderungen (Sharafi 2013, S. 171–172). KRATZER ET AL. analysierten 3.561 Änderungen mit Auswirkung auf Werkzeugkosten im PEP von drei Fahrzeugen und identifizierten 15 Ursachen. Montageprobleme, Design und geometrische Konflikte stellten die häufigsten Ursachen dar (Kratzer et al. 2022).

	Ist-Abweichung	Soll-Abweichung
Primär intern initiiert	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlerhafte Funktion, Qualität, Sicherheit • Fehler in der Entwicklung (z.B. Zeichnung) • Geometrische Konflikte • Schwierigkeiten in der Produktion • Kostenüberschreitung, Ertragssteigerung • Design-Korrekturen • Gewichtsreduktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Neue technische Lösungen • Neue interne Vorgaben • Anforderungsreduktion zur Verkürzung der Entwicklungszeit • Kostenreduktion
Primär extern initiiert	<ul style="list-style-type: none"> • Erfahrungsrückfluss aus der Nutzung/ Kundenreklamation 	<ul style="list-style-type: none"> • Design • Änderungen/Updates aufgrund neuer Kundenanforderungen und Gesetzesvorgaben/ Zertifizierung • Kostensenkungsmaßnahmen der Lieferanten • Wettbewerb bringt Neuerung/ neue technische Lösungen
<p>Unterscheidung in: zwingende Gründe (z.B. Sicherheit) vs. wirtschaftliche Vorteile (Kostenreduktion) Initiatoren von Änderungen: Kunden, Markttrends, F&E Abteilungen/ Beteiligte an der Wertschöpfung Weitere Treiber sind: Produktkomplexität, Innovationsgrad, Vernetzungsgrad, unzureichende Kommunikation und Anforderungsdefinition, Entscheidungsdisziplin bei Maßnahmenumsetzung</p>		

Abbildung 2.10: Zusammenstellung von Änderungsursachen (Eigene Darstellung unter Berücksichtigung der im Abschnitt genannten Quellen)

Eine Ursachenanalyse von ausschließlich geometrischen Änderungen innerhalb der Automobilindustrie ist bis dato nicht veröffentlicht.

2.2.5 Negative Auswirkungen technischer Änderungen

Wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, haben technische Änderungen durchaus positive Auswirkungen, indem etwa Fehler beseitigt und Produkte verbessert werden (Wright 1997, S. 41). Dem entgegen stehen negative Aspekte, bezüglich etwa Dauer, Kosten und Reife, vgl. Abbildung 2.11.

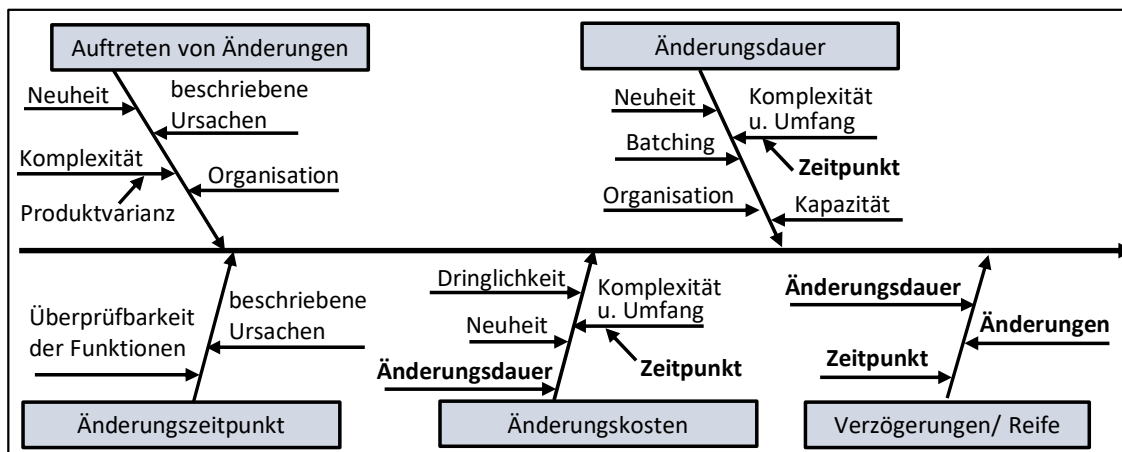


Abbildung 2.11: Negative Auswirkungen von Änderungen und deren Einflussgrößen (Eigene Darstellung unter Berücksichtigung der im Abschnitt genannten Quellen)

In der Regel führt eine Soll-Ist Abweichung oder eine Soll-Veränderung (Ursache technischer Änderung) zu einem Änderungsbedarf. Produkte, bei denen einer dieser Zustände häufiger auftritt, werden häufiger geändert. Die Komplexität kann durch Art und Anzahl der Elemente und deren Beziehungen zueinander (Vernetzungsgrad) definiert werden (Patzak 1982, S. 22; Eckert et al. 2009, S. 51). Komponenten können strukturell oder hinsichtlich ihrer Funktionen und ihres Verhaltens miteinander vernetzt sein (Hamraz et al. 2015). Da mit einem hohen Vernetzungsgrad das Risiko für Folgeänderungen zunimmt, treten insgesamt mehr Änderungen auf (Clarkson et al. 2004; Eckert et al. 2009, S. 51; Jarratt et al. 2011, S. 113; Li 2012, S. 54). Variantenvielfalt trägt durch eine erhöhte Anzahl von Komponenten zur Komplexität bei (Eckert et al. 2009, S. 49). Auch entstehen in einer komplexeren Organisation, die aus vielen unterschiedlichen Fachdisziplinen besteht und geographisch stark verteilt ist, häufiger Fehler, die zu Änderungen führen (Li 2012, S. 54). Zudem geht mit einem hohen Neuheitsgrad von Produkten und/oder Prozessen ein geringerer Wissensstand einher (Jarratt

et al. 2011, S. 115). Diese erhöhte Unsicherheit führt zu mehr Änderungen (Eckert et al. 2009, S. 51; Jarratt et al. 2011, S. 115; Li 2012, S. 54; Hinojos A et al. 2020, S. 668).

Da durch Änderungen häufig Funktionen angepasst werden (vgl. Abschnitt 2.2.4), hängt der Änderungszeitpunkt davon ab, wann die Funktionen überprüfbar sind. Somit resultieren Änderungen zum einen aus Erkenntnissen auf dem Gebiet der Fertigung, aber auch aus Erprobungsergebnissen (Gemmerich 1995, S. 87–92; Braess et al. 2013, S. 1151). KRATZER ET AL. machen daher die niedrige Prognosegüte von virtuellen Erprobungen für späte Änderungen verantwortlich. Dies wird damit begründet, dass Funktionen wie etwa die Akustik, deswegen spät geändert werden, weil Hardware zur Erprobung notwendig ist und diese später verfügbar ist als ein virtuelles Modell (Kratzer et al. 2022).

Die Änderungsdauer ist die Zeit, die benötigt wird, um eine Änderung im Sinne des Änderungsprozesses nach VDA 4965 umzusetzen (vgl. Abbildung 2.9). Da bei Änderungen komplexer Produkte oft Folgeänderungen erforderlich sind, erstreckt sich der Gesamtprozess meist über einen langen Zeitraum (Terwiesch et al. 1999, S. 167; Hinojos A et al. 2020, S. 666–668). Auch der reduzierte Wissensstand und die daraus resultierende Unsicherheit bei innovativen Produkten oder Prozessen führen zu einer erhöhten Änderungsdauer. Weitere Einflussfaktoren sind Änderungskomplexität und der Umfang der Änderung. (Li 2012, S. 55–56). Beide Faktoren steigen gemäß der Rule-of-Ten in späteren Entwicklungsphasen an, weshalb auch der Änderungszeitpunkt entscheidend ist (Fricke et al. 2000, S. 173). Zusätzlich sorgen komplexe Teilprozesse, wie eine aufwändige Genehmigung, für eine erhöhte Gesamtänderungsdauer (Terwiesch et al. 1999, S. 164–165). Die Geschwindigkeit wird auch durch die in den Entwicklungs- und Planungsabteilungen vorhandenen Kapazitäten beeinflusst (Terwiesch et al. 1999, S. 164; Li 2012, S. 55–56). Weiter können die Art und Weise, die Qualität der Kommunikation innerhalb einer Organisation und der Stellenwert einer schnellen Umsetzung, die Änderungsgeschwindigkeit beeinflussen (Terwiesch et al. 1999, S. 168–169; Li 2012, S. 55–56; Hinojos A et al. 2020, S. 666–668). Änderungen werden zum Teil in Batches zusammengefasst und gemeinsam umgesetzt, um möglichst wenig in die Standardabläufe einzugreifen (Terwiesch et al. 1999, S. 166–167; Sharafi 2013, S. 46–47). Die

resultierende Wartezeit führt zusätzlich zu einer erhöhten Gesamtänderungsdauer (Li 2012, S. 55–56; Sharafi 2013, S. 47).

Unter Änderungskosten fallen nach CONRAT NIEMERG alle „im Zusammenhang mit einer Änderung prinzipiell bewertbaren Güterverzehre“ (Conrat Niernerg 1997, S. 139). Die Kosten können unterteilt werden in Prozess- und Folgekosten des Änderungsvorlaufs (Kosten, die vor der Genehmigung entstehen), Prozess- und Folgekosten der Änderungsdurchführung sowie fallübergreifende Änderungsfolgekosten (Conrat Niernerg 1997, S. 147). Eine Aufstellung aller Kostenpositionen ist bei CONRAT NIEMERG nachzulesen (Conrat Niernerg 1997, S. 149–162). In dieser Dissertation sind die Kosten der Änderungsdurchführung relevant, welche die Fertigung betreffen. Die literaturbasierte Darstellung der Einflüsse bezieht sich, abhängig vom jeweiligen Forschungsziel, zum Teil auch auf andere Änderungskostenarten. Änderungskosten sind abhängig von der Produktkomplexität (Köhler 2009, S. 22; Hinojos A et al. 2020, S. 668), der Änderungskomplexität und dem Umfang der Änderung – darunter fällt bspw. die Sicherheitsrelevanz der Bauteile, die Anzahl an Bauteilen, Werkzeugen und Prozessen oder die Neuheit der Änderung, etwa aufgrund des Einsatzes neuer Technologien (Gebhardt et al. 2018, S. 1–19). Mit steigendem Entwicklungsgrad sind häufiger Versuchs- und Serienwerkzeuge betroffen (Terwiesch et al. 1999, S. 14), sodass auch die Änderungskosten steigen (Reichwald et al. 2012, S. 219; Feldhusen et al. 2013b, S. 93; Gille 2013, S. 74; Hinojos A et al. 2020, S. 668). Zudem laufen Prozesse bei dringlichen Änderungen unstrukturierter ab, was die Kosten erhöht (Gebhardt et al. 2018, S. 19). Die Kosten steigen auch mit der Dauer, da mit der Änderung einhergehende Rationalisierungseffekte erst nach der Umsetzung wirksam werden (Conrat Niernerg 1997, S. 159).

Die Reife beziehungsweise der Fertigstellungswert ist nach (DIN 69901-5) der Wert, „der sich bei der Abwicklung des Projekts zu einem bestimmten Stichtag ergibt und für Vorgänge, Arbeitspakete oder ein Projekt ermittelt werden kann“ (Steinhäuser 2018, S. 6). Mit dem Reifegrad wird gemessen, inwieweit die zu einem bestimmten Zeitpunkt gestellten Anforderungen an ein Objekt erfüllt werden (Helling 2009, S. 50). Änderungen, je länger sie dauern und je später im PEP sie auftreten, gefährden diese Reife umso mehr (Conrat Niernerg 1997, S. 158; Milling et al. 2008, S. 72–80). Gründe sind, dass Standardprozesse gestört und

dadurch kritische Projekttermine überschritten werden (Gemmerich 1995, S. 97; Conrat Niemerg 1997, S. 158). Durch diese Zeitverzögerungen in der Produktentstehung kann zudem der Markteinführungstermin beeinträchtigt werden (Fricke et al. 2000, S. 172; Gille 2013, S. 69). Außerdem führen Änderungen im PEP zu Informationsasymmetrien, wenn Folgeentscheidungen aufgrund veralteter Stände (noch nicht umgesetzte Änderungen) getroffen werden (Köhler 2009, S. 22). Im Serienanlauf beeinträchtigen häufige Änderungen die Prozesse sogar derart, dass Produktionsrückstände entstehen und die Kammlinie später erreicht wird (Milling et al. 2008).

Um die negativen Auswirkungen zu reduzieren, werden in der Literatur fünf Strategien vorgeschlagen: vermeidbare Änderungen reduzieren, Änderungsbedarf früher identifizieren und Änderungen vorverlagern, nur als effektiv bewertete Änderungen mit gutem Aufwand/Nutzen Verhältnis umsetzen, Änderungen effizient mit geringem Zeit- und Kostenaufwand umsetzen und die Effektivität und Effizienz durch Lernen aus vergangenen Änderungen steigern (Fricke et al. 2000, S. 173–176).

Für diese Arbeit relevant ist Folgendes: Änderungen haben negative Aspekte, ausgedrückt in Umsetzungsdauer, Kosten und Reife. Einflussgrößen darauf sind zum Teil aus der Literatur bekannt und es werden fünf Strategien zum verbesserten Umgang mit Änderungen vorgeschlagen. Für diese Arbeit sind die zwei Strategien Effizienz und Effektivität bedeutsam. So sollen aus vergangenen Änderungen Erkenntnisse gewonnen werden, um durch den Einsatz der Additiven Fertigung eine effizientere Umsetzung von Änderungen zu ermöglichen. Dies soll durch die Änderungsflexibilität der Technologie ermöglicht werden. Eine hohe Änderungsflexibilität ist nach CONRAT NIEMERG durch geringe Anpassungskosten und Zeit definiert (Conrat Niemerg 1997, S. 90). Zudem soll, etwa durch Updates und Personalisierung, die Änderungsanzahl dort im Fahrzeuglebenszyklus erhöht werden, wo ein erhöhter Bedarf besteht und der Nutzen besonders hoch ist (Strategie – Effektivität).

2.3 Trends im Automobilbau erfordern Änderungsflexibilität im Lebenszyklus

In der Ausgangssituation (vgl. Abschnitt 1.1) werden zwei Handlungsfelder genannt, bei denen eine änderungsflexible Technologie im Automobilbau ansetzen soll. Gemäß Handlungsfeld 1 besteht ein Bedarf nach Änderungsflexibilität im PEP. Handlungsfeld 2 beschreibt die Notwendigkeit eines gezielten Einsatzes von Änderungsflexibilität im weiteren Lebenszyklus. Besonders für Handlungsfeld 2 ist es notwendig, die Trends im Automobilbau zu kennen. Trends sind signifikante gleichgerichtete Entwicklungen über einen bestimmten Zeitraum (Müller-Stewens et al. 2010, S. 241). Sie zeichnen sich durch Komplexität, verbunden mit einer hohen Wirkmächtigkeit und einer langen Wirkdauer sowie Stabilität über die Zeit aus (Müller-Stewens et al. 2010, S. 242). Der zukünftige Erfolg im Automobilbau ist mehr denn je davon abhängig, Trends frühzeitig zu erkennen und darauf zu reagieren (McKinsey 2016). Aus diesem Grund wurden die aktuellen Trends des Automobilbaus anhand von Studien und Veröffentlichungen identifiziert und in Abbildung 2.12 zusammengefasst. Eine McKinsey-Studie erwartet bis 2030 starke Veränderungen innerhalb der vier Trends geteilte Mobilität, automatisiertes Fahren, Elektrifizierung und Konnektivität (McKinsey 2016). Elektrifizierung und Konnektivität werden auch von einer KPMG-Studie als Haupttrends wahrgenommen (KPMG 2019, S. 2). Eine Roland-Berger-Studie mit Zeithorizont bis 2030 erkennt die Trends geteilte Mobilität, digital Sales, automatisiertes Fahren und Elektrifizierung (Roland Berger 2017, S. 10). Im Zuge der Trends Elektrifizierung, Konnektivität und automatisiertes Fahren sieht eine PWC-Studie jährliche Updates, in denen die aktuellen Hardware- und Software-Entwicklungen integriert werden, als zukünftigen Wettbewerbsfaktor (PWC 2018, S. 10). Darüber hinaus wird, laut dem Porsche-Design-Leiter Michael Maurer, das Design „ganz entscheidend dafür sein, welche Automobilmarken in Zukunft überleben.“ Mit der Elektrifizierung und dem automatisierten Fahren wird die Bedeutung des Designs weiter zunehmen (Volkswagen AG 2018). Zudem wird die Massenpersonalisierung ein stärker kundenzentriertes Produktdesign ermöglichen als die heute verbreitete kundenindividuelle Massenfertigung (Keskin et al. 2017, S. 249). GANDHI ET AL. zeigen zudem auf, dass die Personalisierung von Produkten zu erhöhten Gewinnmargen beitragen kann (Gandhi et al.

2013, S. 8). Der Wunsch nach Individualisierung ist bei Kunden im Automobilbau stark verbreitet und besonders im Premiumsegment von Bedeutung (Keskin et al. 2017, S. 249; Sabadka et al. 2019, S. 1295). Ziel muss daher sein, das sich daraus ergebende wirtschaftliche Potenzial zu nutzen.

	Geteilte Mobilität und Digital Sales	Automatisiertes Fahren	Elektrifizierung	Konnektivität	Design/ Personalisierung
McKinsey, 2016	✓	✓	✓	✓	
KPMG 2019			✓	✓	
Roland Berger, 2017	✓	✓	✓		
PWC, 2018		✓	✓	✓	
Keskin, 2017					✓
VW AG, 2018					✓
adressierbar mit AM		✓	✓	✓	✓

Abbildung 2.12: Haupttrends im Automobilbau und Bewertung der Bedeutung für AM

Für die vorliegende Arbeit werden, neben der Personalisierung von Bauteilen, die Trends Elektrifizierung, automatisiertes Fahren, Konnektivität sowie Design in Bezug auf Updates im Lebenszyklus als relevant erachtet. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass innerhalb dieser Trends die Änderungsflexibilität von AM im Produktlebenszyklus einen Vorteil darstellen könnte, da die Trends auch zu Anpassung von Hardwarekomponenten führen.

3 Empirische Studien zu technischen Änderungen im Automobilbau

Die bisherige Forschung beschäftigte sich in Experten- und Fallstudien sowie einigen Datenanalysen mit technischen Änderungen (siehe Abschnitt 2.2). Eine ganzheitliche Analyse von Änderungen im automobilen PEP und Produktlebenszyklus fehlt bisher und wird in diesem Kapitel vorgenommen. Ziel der empirischen Untersuchungen ist es, die praxisrelevanten Probleme im Kontext von Änderungen zu erfassen und zu typisieren. Die Ergebnisse bilden die Basis für den Entdeckungszusammenhang einer integrierten Methodik, welcher für realwissenschaftliche Arbeiten erforderlich ist (Ulrich et al. 1976). Neben der Erfassung von Anforderungen für die Methodenentwicklung (Abschnitt 4.1) werden Erkenntnisse erarbeitet, die in der Konzeptionierung und Detaillierung der Methode (Kapitel 5 und 6) berücksichtigt werden. Das Kapitel ist in drei Abschnitte unterteilt. Jeder Abschnitt bezieht sich auf eine empirische Untersuchung, vgl. Abbildung 3.1.

Abschnitt 3.1	Abschnitt 3.2	Abschnitt 3.3
Studie 1. Änderungen im PEP	Studie 2. Folgen einer langen Änderungsumsetzung im PEP	Studie 3. Änderungsbedarfe im Produktlebenszyklus
Datenerhebung: Sekundärdaten Datenauswertung: qualitative und quantitative Analysen	Datenerhebung: qualitative Experteninterviews Datenauswertung: qualitative Inhaltsanalyse	Datenerhebung: qualitative Experteninterviews Datenauswertung: qualitative Inhaltsanalyse

Abbildung 3.1: Empirische Untersuchungen in Kapitel 3

In Abschnitt 3.1 wird eine Studie zu Änderungen im PEP, basierend auf Sekundärdaten eines OEMs aus dem Automobilbau, vorgestellt. Die Daten aus bereits vorhandenen Informationsquellen müssen, anders als Primärdaten, nicht mehr erhoben werden (Homburg 2017, S. 263). Im Forschungsalltag werden oft qualitative und quantitative Methoden kombiniert (Bortz et al. 2006, S. 296). Durch die Kombination qualitativer und quantitativer Analysen ist in Studie 1 eine umfassende Charakterisierung von geometrischen Änderungen

im PEP eines Automobils möglich. Abschnitt 3.2 umfasst qualitative Experteninterviews, die über eine Inhaltsanalyse nach MAYRING ausgewertet werden. So werden die Folgen einer langen Änderungsumsetzung im PEP untersucht. Der Additiven Fertigung wird eine schnelle Umsetzung von Änderungen unterstellt (Eyers et al. 2018). Daher wird untersucht, inwieweit daraus positive Effekte resultieren könnten. Der explorative Charakter der qualitativen Empirie ermöglicht es, Erkenntnisse zu bisher wenig erforschten Themen zu gewinnen (Steffen et al. 2019, S. 1). So wird in Abschnitt 3.3 anhand von Experteninterviews mit Produktmanagern aus dem Automobilbau und nachfolgenden qualitativen Inhaltsanalysen herausgearbeitet, an welchen Stellen im Fahrzeug in Zukunft vermehrt Änderungsbedarfe im Produktlebenszyklus auftreten werden.

3.1 Änderungen im PEP

In Unterabschnitt 3.1.1 werden die Untersuchungsaspekte und das Vorgehen der Datenauswertung beschrieben. Unterabschnitt 3.1.2 stellt die wesentlichen Ergebnisse vor.

3.1.1 Vorgehen und Durchführung

Das Änderungsmanagement-System des OEMs enthält Daten zu Fahrzeugprojekten. Die für die Untersuchung erforderliche Detailtiefe in der Analyse wird nur erreicht, wenn die Stichprobe jeweils ein komplettes Fahrzeugprojekt adäquat beschreibt. Um Untersuchungen leichter zu organisieren, wird in der Forschungspraxis daher häufig auf zufällig ausgewählte Teilmengen (Klumpen) zurückgegriffen. Innerhalb dieser werden dann alle Untersuchungsobjekte analysiert (Bortz et al. 2010, S. 81; Baur et al. 2014, S. 148). Fahrzeug 1 ist dem Segment D (große Fahrzeuge) zuzuordnen und hat eine Gesamtstückzahl größer 50.000 Einheiten im Lebenszyklus. Fahrzeug 2, aus dem Segment C (mittel) hat ebenfalls mehr als 50.000 Einheiten. Fahrzeug 3, aus dem Segment F (Luxus) hat weniger als 50.000 Einheiten. Die Segmenteinteilung erfolgt gemäß (Commission of European Communities 1999). Zudem

sei erwähnt, dass Fahrzeug 2 von einem bereits in Serie produzierten Fahrzeug abgeleitet ist, weshalb der Innovationsgrad als niedriger einzustufen ist als bei den anderen beiden Fahrzeugen. Es werden nur genehmigte Änderungsanträge mit Kosteneinfluss auf Sonderbetriebsmittel berücksichtigt. Da mit Sonderbetriebsmitteln im Wesentlichen Werkzeuge gemeint sind, werden diese Kosten nachfolgend als Werkzeugänderungskosten bezeichnet. Da die Antriebsentwicklung nicht spezifisch für ein Fahrzeug erfolgt, bleiben Änderungen, die nur Antriebskomponenten betreffen, unberücksichtigt. Vor der Bestellung der ersten Werkzeuge beeinflussen Änderungen die Werkzeugkosten nicht signifikant (vgl. Abschnitt 2.2). Nach erfolgreichem Anlauf sind sie vernachlässigbar (Conrat Niemerg 1997, S. 96; Kratzer et al. 2022). Der Betrachtungszeitraum der Studie wird daher entsprechend begrenzt. Änderungen zur Verlängerung des Produktlebenszyklus, etwa durch Updates (Kampker et al. 2017a, S. 137), werden in Studie 1 nicht analysiert. Diese werden bei dem OEM nicht im Änderungsmanagement-System dokumentiert. Für eine Untersuchung der Änderungsbedarfe im Lebenszyklus sei auf Abschnitt 3.3 verwiesen.

Die Änderungsdaten der drei Fahrzeugprojekte werden aus einer Datenbank extrahiert. Je Änderung sind die Problem- und Lösungsbeschreibung, die Baugruppenzuordnung, sowie die angefügten Entscheidungsvorlagen und CAD-Zeichnungen relevant. Für die Analysen sind außerdem das Erstelldatum sowie Kosteninformationen zu Höhe und Kostenart auf Bauteilebene erforderlich. So kann der Betrachtungszeitraum eingeschränkt und eine Fokussierung auf 3.646 Änderungen mit Auswirkung auf Werkzeugkosten vorgenommen werden. Das Vorgehen mit den einzelnen Untersuchungsaspekten, dargestellt in Abbildung 3.2, führt zu einer umfassenden Analyse von Änderungen im PEP.

Zunächst wird bestimmt, welche **Änderungsarten (A)** vorherrschen, indem die Lösungsbeschreibung sowie die angefügten Unterlagen und CAD-Zeichnungen manuell analysiert werden. So wird der Betrachtungsumfang auf geometrische Änderungen reduziert. Deskriptive Methoden ermöglichen eine umfassende Beschreibung des Untersuchungsbereichs (Baur et al. 2014, S. 136). Daher wird eine deskriptive Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Änderungsarten durchgeführt. Die Zuweisung der

Änderungsart erfolgt auf Basis einer ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung – ein gewisser Grad an Subjektivität kann dabei nicht ausgeschlossen werden.

Anschließend wird durch eine deskriptive Auswertung je Fahrzeug gezeigt, wann Anträge für geometrische **Änderungen im zeitlichen Verlauf des PEP** gestellt werden. Ziel der Analyse ist es, die zeitliche Verortung von Änderungen innerhalb des PEP eines Fahrzeugs nachzuvollziehen **(B)**.

Anhand von Meilensteinplänen der drei Fahrzeuge können die Erstelltermine der Änderungsanträge den Phasen im PEP zugeordnet werden. Es werden die folgenden Phasen unterschieden: Nach Bestellung erster Werkzeuge, nach Aufbau der Erprobungsfahrzeuge, nach Aufbau erster Vorserienfahrzeuge und nach Serienstart. Auf dieser Grundlage wird untersucht, **welche Änderungsarten in welchen PEP-Phasen** vorherrschend sind und ob auch spät im PEP umfangreiche Änderungen durchgeführt werden **(C)**. Einer deskriptiven Darstellung der Häufigkeiten folgt ein χ^2 -Unabhängigkeitstest, eine inferenzstatistische Methode. Mit inferenzstatistischen Verfahren ist ein Rückschluss auf die Grundgesamtheit möglich (Nagel 2003, S. 36; Bortz et al. 2010, S. 3). Die Auswertung wird mit der Statistiksoftware *IBM SPSS Statistics 26* durchgeführt. Der χ^2 -Unabhängigkeitstest untersucht für eine Zufallsstichprobe, ob zwei nominalskalierte Variablen unabhängig voneinander sind (Homburg 2017, S. 358). Um die Effektstärke zu beurteilen, wird über die Wurzel aus dem Quotienten des χ^2 -Wertes und dem Stichprobenumfang ein Cramér's V bzw. ein ϕ berechnet (Cohen 1988, S. 223–225; Tomczak et al. 2014, S. 24). Ab einen Wert von 0,1 kann ein schwacher, ab 0,3 ein mittlerer und ab 0,5 ein starker Effekt nachgewiesen werden (Cohen 1988, S. 223–225). Mit dem Vorgehen wird ermittelt, ob Anträge für umfangreiche geometrische Änderungen in anderen Phasen des PEP gestellt werden als für kleine Änderungen, wie Radiusänderungen.

Im Anschluss wird Transparenz zur **Verteilung von Änderungen in Fahrzeugen** erzeugt **(D)**. Hierfür wird je Fahrzeug analysiert, zu welchem Anteil die vier Bereiche Karosserie/Exterieur, Interieur, Fahrwerk und Elektronik/Infotainment an den Änderungen beteiligt waren. Ein Antrag kann mehrere Bauteile umfassen und manche Bauteile bedürfen mehrerer Änderungen. Daher wird in einem zweiten Schritt je Fahrzeug und Baugruppe die Anzahl

geometrischer Bauteiländerungen berechnet. Ziel ist es, festzustellen, ob es Bereiche und Baugruppen mit besonders vielen Änderungen gibt.

In dem Änderungsmanagementsystem, das für die Studie als Datenquelle verwendet wird, werden für jede Änderung einmalig auftretenden Kostenaufwände gespeichert. Auf Basis dieser Daten erfolgt, je Fahrzeug, eine Analyse über die **Zusammensetzung der Änderungskosten (E)**, um die Relevanz einer flexiblen Fertigungstechnologie in Bezug auf direkte Änderungskosten nachzuvollziehen.

Werkzeugänderungskosten entfallen bei AM, was einen zentralen Unterschied zu werkzeuggebundenen Technologien darstellt. Daher werden diese anschließend genauer untersucht. Zunächst erfolgt eine deskriptive Beschreibung der **Verteilung nach Fahrzeugbereichen (F) und PEP-Phasen (G)**.

Daraufhin werden die Werkzeugänderungskosten mit inferenzstatistischen Methoden tiefergehend analysiert. Es werden nur eindeutig als Einzelteile gekennzeichnete Sachnummern in die Betrachtung inkludiert. Dadurch sind die Änderungskosten eindeutig dem Bauteil zuzuordnen und somit vergleichbar. Die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) ist ein strukturprüfendes Verfahren, um zu entscheiden, ob sich die Mittelwerte einer abhängigen metrischen Variable (z.B. Werkzeugänderungskosten) zwischen mehr als zwei unterschiedlichen Ausprägungen einer unabhängigen nominalskalierten Variable (z.B. unterschiedliche PEP-Phasen) systematisch unterscheiden (McKnight et al. 2010; Backhaus et al. 2016, S. 15). Die unabhängige Variable wird auch Faktor genannt. Die unterschiedlichen Ausprägungen bzw. Gruppen der Variable werden als Faktorstufen bezeichnet (Bortz et al. 2010, S. 205). Die ANOVA untersucht mittels Varianzzerlegung, in welchem Ausmaß die Ausprägung der abhängigen Variable auf die verschiedenen Faktorstufen zurückzuführen ist, d.h., es wird die Varianz innerhalb der Gruppen (der durch die Gruppen nicht erklärbaren Unterschiedlichkeit der Werte) mit der Varianz zwischen den Gruppen (der durch die Gruppen erklärbaren Unterschiedlichkeit der Werte) verglichen (Bortz et al. 2010, S. 106). Voraussetzungen für eine ANOVA ist, dass die Daten der Zielvariablen unabhängig voneinander sind, was bei einer Zufallsstichprobe der Fall ist (Bortz et al. 2010, S. 212). Zudem sollen die Werte innerhalb der Gruppen normalverteilt sein, und die Fehlervarianzen inner-

halb der einzelnen Gruppen annähernd gleich sein (Homoskedastizität) (Ostertagová et al. 2014; Backhaus et al. 2016, S. 185). Die Normalverteilungsannahme kann bei größeren Stichproben ($n_i > 10$) unberücksichtigt bleiben (Bortz et al. 2010, S. 214). Aufgrund der großen Stichproben wird diese Voraussetzung in der Studie nicht überprüft (Bortz et al. 2010, S. 214). Da die Voraussetzung der Homoskedastizität bei ungleich großen Gruppen nicht vernachlässigt werden sollte, wird diese durch den Levene-Test überprüft (Bortz et al. 2010, S. 214). Die Nullhypothese des Levene-Tests lautet, dass sich die Fehlervarianzen der abhängigen Variable über die Gruppen hinweg gleichen (Backhaus et al. 2016, S. 207). Wird diese verworfen, wird alternativ der nicht-parametrische Kruskal-Wallis-Test angewandt, bei dem die Werte der abhängigen Variable der Größe nach sortiert und dann die mittleren Ränge (und nicht die Mittelwerte, wie bei der Varianzanalyse) der einzelnen Gruppen miteinander verglichen werden (McKnight et al. 2010). Mit dem Kruskal-Wallis Test wird zunächst nur nachgewiesen, dass sich die zentralen Tendenzen in den Gruppen unterscheiden. Um festzustellen, zwischen welchen Gruppen diese Unterschiede bestehen und wie stark diese sind, erfolgt ein paarweiser Vergleich über Post-hoc-Tests mit Hilfe einer Bonferroni-Korrektur des Signifikanzniveaus (Dunn 1964; Ostertagová et al. 2014, S. 117). Der Korrelationskoeffizient r wird berechnet, indem die Standardteststatistik z durch die Wurzel des Stichprobenumfangs n des jeweiligen paarweisen Vergleichs geteilt wird (Tomczak et al. 2014, S. 23). So werden nach COHEN schwache ($r \geq 0,1$), mittlere ($r \geq 0,3$) und starke ($r \geq 0,5$) Effektstärken unterschieden (Cohen 1988, S. 79–83). Dadurch wird untersucht, **ob in unterschiedlichen PEP-Phasen (H) bzw. bei unterschiedlichen Fahrzeugen (I) signifikante Unterschiede in den Werkzeugänderungskosten bestehen.**

Anschließend werden die Ursachen der geometrischen Änderungen, orientiert an die strukturierte Inhaltsanalyse nach MAYRING, analysiert (Mayring 1994; Kratzer et al. 2022). Ausgehend von den in der Literatur genannten Ursachen (Abschnitt 2.2.4) wird ein Kategorisierungssystem erstellt. Je Kategorie werden Definition, Kodierungsregeln und Ankerbeispiele formuliert, welche zu einer eindeutigen und objektiven Kategorisierung führen. Durch iterative Überarbeitung von Kategorisierungssystem und Kodierungsrichtlinien entsteht ein finaler Kodierungsleitfaden (siehe Anhang 1 und Anhang 2), der auf das komplette

Datenset angewendet wird. Damit wird der **Anteil unterschiedlicher Ursachen und die Verteilung dieser in einzelnen PEP-Phasen ausgewertet (J)**. So können mögliche Einflüsse auf Auftreten und Zeitpunkt von Änderungen identifiziert werden.

Weiter wird je Fahrzeug **untersucht, ob sich die Werkzeugänderungskosten von Bauteilen bei unterschiedlichen Änderungsursachen unterscheiden (K)**. Auch dies erfolgt über Mittelwertvergleiche sowie inferenzstatistische Tests auf Gruppenunterschiede.

Untersuchungsaspekt	Form der Datenauswertung
(A) Änderungsarten	Häufigkeitsverteilung (deskriptiv)
(B) Verteilung im PEP	Häufigkeitsverteilung (deskriptiv)
(C) Änderungsarten nach PEP-Phasen	Häufigkeitsverteilung (deskriptiv) χ^2 -Unabhängigkeitstest (induktiv)
(D) Verteilung in Fahrzeugbereichen	Häufigkeitsverteilung (deskriptiv)
(E) Zusammensetzung Änderungskosten	Anteile (deskriptiv)
(F) Werkzeugänderungskosten nach Fahrzeugbereichen	Anteile (deskriptiv)
(G) Werkzeugänderungskosten nach PEP-Phasen	Anteile (deskriptiv)
(H) Unterschiede von Werkzeugänderungskosten nach PEP-Phasen	Mittelwertvergleich (deskriptiv) Gruppenunterschiede ANOVA bzw. Kruskal-Wallis (induktiv)
(I) Unterschiede von Werkzeugänderungskosten nach Fahrzeugen	Mittelwertvergleich (deskriptiv) Gruppenunterschiede ANOVA bzw. Kruskal-Wallis (induktiv)
(J) Änderungsursachen und deren Verteilung im PEP	Strukturierende Inhaltsanalyse Häufigkeitsverteilung, Anteile (deskriptiv)
(K) Unterschiede von Werkzeugänderungskosten nach Ursachen	Mittelwertvergleich (deskriptiv) Gruppenunterschiede ANOVA bzw. Kruskal-Wallis (induktiv)

Abbildung 3.2: Vorgehen zur Analyse des Änderungsverhaltes im Automobilbau (Studie 1)

3.1.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsaspekte aufgezeigt.

(A) Änderungsarten

Von den analysierten 3.646 Änderungsanträgen (vgl. Abbildung 3.3) der drei Fahrzeuge sind 53,4 % geometrische Änderungen im Sinne der Definition aus Abschnitt 2.2.2.

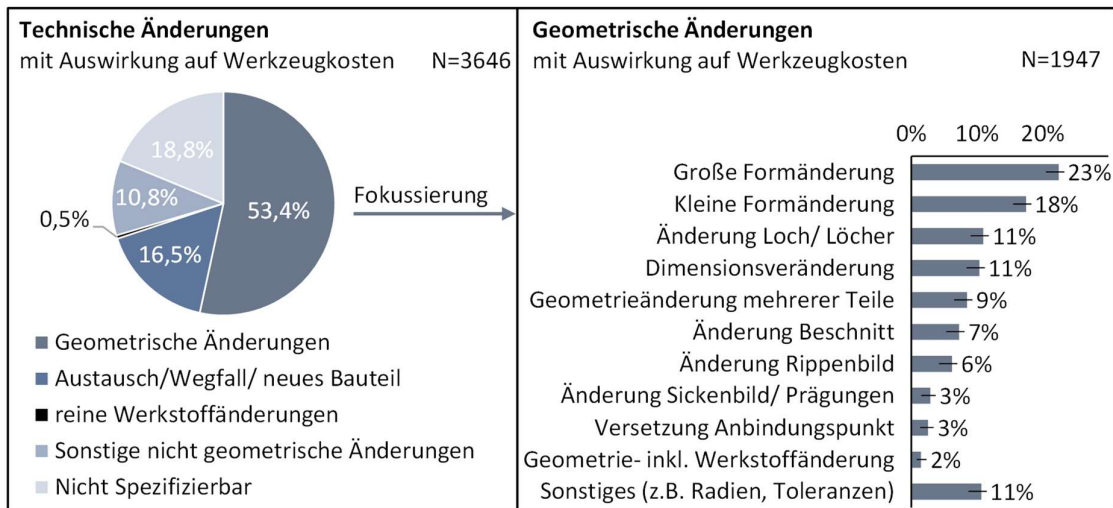


Abbildung 3.3: (A) Verteilung der untersuchten geometrischen Änderungen

Ein Austausch, der Entfall oder das Hinzufügen eines neuen Bauteils sind bei 16,5 % die Lösung. Weitere 0,5 % sind eindeutig auf eine Änderung des Werkstoffs zurückzuführen. 10,8 % fallen auf sonstige, nicht geometrische Änderungen wie etwa eine Veränderung der Bezugsart oder eine Anpassung des Automatisierungsgrads in der Fertigung. Zudem konnten 18,8 % der Anträge aufgrund unzureichender Informationen nicht eindeutig einer Kategorie zugeordnet werden. Weiterführende Analysen erfolgten nur für geometrische Änderungen. Ist eine Änderung zwar geometrischer Natur, aber nicht eindeutig auf ein Merkmal begrenzt, erfolgte über eine optische Sichtung der Änderung durch die Ingenieure eine Einteilung in große oder kleine Formänderungen. Änderungen werden mit 40 % am häufigsten diesen beiden Kategorien zugeordnet, gefolgt von Lochänderungen (11 %), Dimensionsänderungen (11 %) oder der nicht näher spezifizierten Geometrieänderung mehrere Bauteile innerhalb eines Antrags (9 %). Andere relevante Kategorien umfassen die Anpassung des Beschnitts, des

Rippen-, oder Sickenbildes, die Versetzung von Anbindungspunkten sowie geometrische Änderungen in Verbindung mit einer Werkstoffanpassung (zusammen 21 %). Weitere Änderungen, etwa von Radien, Oberflächen und Toleranzen repräsentieren kumuliert einen Anteil von 11 % und werden der Kategorie Sonstiges zugeordnet.

(B) Verteilung geometrischer Änderungen im PEP

Die Verteilung der Anträge geometrischer Änderungen mit Kosteneinfluss auf Werkzeuge im PEP, dargestellt in Abbildung 3.4, ist bei allen drei Fahrzeugen vergleichbar, auch wenn sich diese hinsichtlich Fahrzeugsegment, Stückzahl und Innovationsgrad unterscheiden.

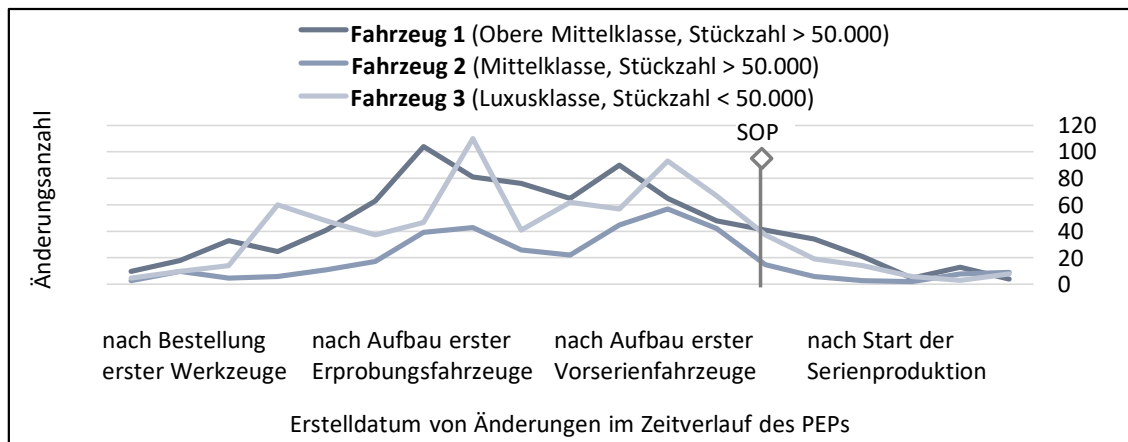


Abbildung 3.4: (B) Verteilung geometrischer Änderungen im PEP von drei Fahrzeugen

Generell ist festzustellen, dass zu Beginn des Betrachtungszeitraums, d.h. nach der Bestellung der ersten Werkzeuge, die Änderungsanzahl niedrig ist. Zu dieser Zeit ist nur ein Teil der Bauteilstände zur Werkzeugerstellung freigegeben (Eichhorn et al. 2017, S. 46), weshalb noch werkzeugkostenneutrale Iterationen folgen. Fahrzeugübergreifend sind drei Anstiege der Änderungsanzahl zu erkennen. Eine mögliche Erklärung für den ersten Anstieg ist der Erkenntnisgewinn aus Simulationen virtueller Baugruppen. Die anderen beiden Anstiege sind möglicherweise auf Aufbau und Erprobungen von Prototypen- und Vorserienfahrzeugen zurückzuführen. Der Abfall der Änderungsanzahl hin zum Serienstart bzw. nach Serienstart ist bei allen Fahrzeugen zu sehen – es werden aber auch spät im PEP Änderungsanträge gestellt.

(C) Änderungsarten in einzelnen PEP-Phasen

In Abbildung 3.5 sind die häufigsten geometrischen Änderungen anhand der Ersteltermine in vier Phasen des PEP eingeordnet. Große und kleine Formänderungen, Änderungen von Löchern, Dimensionsveränderungen und Änderungen des Rippenbildes sind Thema von 1.323 Anträgen. Wie in Abschnitt 3.1.1 erwähnt, erfolgt die Kategorisierung der Änderungsart manuell über die subjektive Einschätzung von Ingenieuren. Die deskriptive Auswertung zeigt, dass in den frühen Phasen vor Aufbau der ersten Vorserienfahrzeuge mehr Anträge für große als für kleine geometrische Formänderungen gestellt werden. Ab dem Aufbau erster Vorserienfahrzeuge werden mehr Anträge für kleine Formänderungen gestellt. Die meisten Änderungen von Rippen, Löchern und Bauteildimensionen werden zwischen Aufbau der ersten Erprobungsfahrzeuge und dem Serienstart beauftragt (75,1 %).

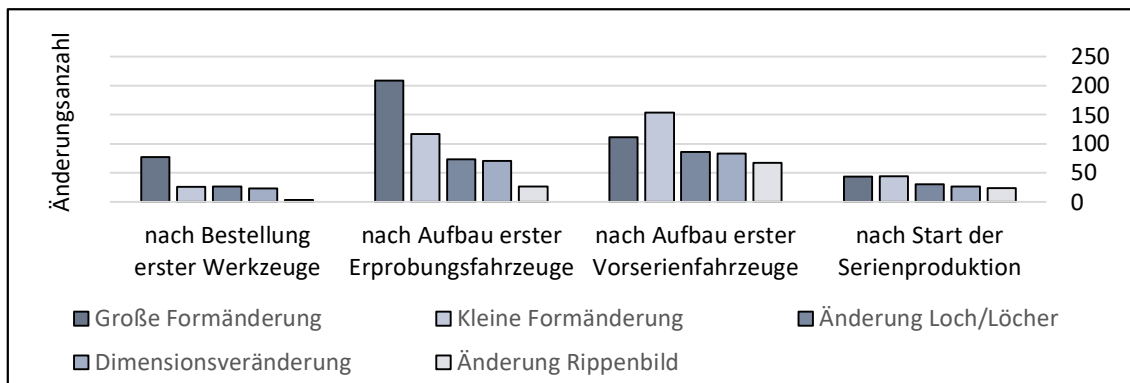


Abbildung 3.5: (C) Unterschiedliche Änderungsarten nach PEP-Phasen

Ergänzend zeigt der in SPSS durchgeführte χ^2 -Unabhängigkeitstest einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen dem Umfang der Änderungen (439 große und 341 kleine Formänderungen) und der PEP-Phase, in der der Änderungsantrag gestellt wurde. Die asymptotische Signifikanz liegt, bei einem χ^2 -Wert von 46,137 und drei Freiheitsgraden, bei $p < 0,001$. Ein daraus resultierendes Cramér's V bzw. ein ϕ von 0,243 repräsentiert einen schwachen Effekt nach COHEN (Cohen 1988, S. 223–225), dass der Änderungsumfang in den PEP-Phasen variiert. Da umfangreiche Änderungen in späteren Phasen teurer sind (Terwiesch et al. 1999, S. 14), wird darauf also nach Möglichkeit verzichtet. Dennoch sind große Änderungen auch nach Aufbau der Vorserien sowie nach Serienstart nicht immer zu vermeiden.

(D) Verteilung der geometrischen Änderungen nach Bereichen im Fahrzeug

Abbildung 3.6 zeigt für jedes der drei Fahrzeuge, zu welchem Anteil die Bereiche Karosserie/Exterieur, Interieur, Fahrwerk und Elektronik/Infotainment jeweils von den geometrischen Änderungen betroffen waren. Manche Änderungsanträge umfassen Bauteile aus zwei Bereichen oder mehr. Daher übersteigt der kumulierte prozentuale Anteil jeweils 100 %.

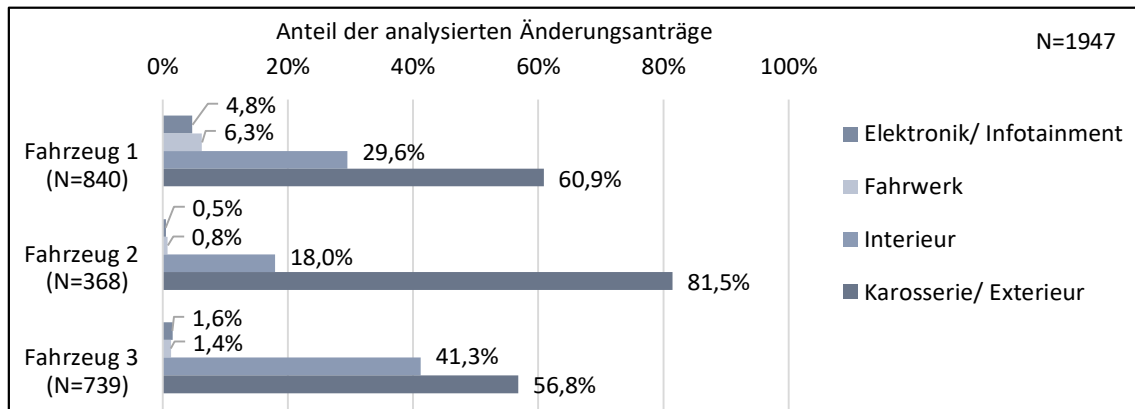


Abbildung 3.6: (D) Verteilung der Geometrieänderungen in Fahrzeugbereichen

Meist sind Karosserie/Exterieur von Änderungsanträgen betroffen (60,9 % in Fahrzeug 1, 81,5 % in Fahrzeug 2 und 56,8 % in Fahrzeug 3), gefolgt vom Interieur. Fahrwerk und Elektronik/Infotainment, zu dem auch das Bordnetz gehört, haben weniger geometrische Änderungen. Diese Tendenz ist bei allen drei Fahrzeugen erkennbar. Bei Fahrzeug 2, welches mehr Umfänge eines bestehenden Serienfahrzeugs übernimmt, ist die absolute Anzahl der Anträge am geringsten. Die Bereiche Fahrwerk (0,5 %) und Elektronik/ Infotainment (0,8 %) sind kaum in Anträge involviert – der Bereich Karosserie/Exterieur hingegen sehr stark (81,5 %). Die Verteilung geometrischer Bauteiländerungen nach Baugruppen ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Ein Antrag umfasst zum Teil Bauteiländerungen aus mehreren Baugruppen. So werden 1.531 Anpassungen von Versuchs- oder Serienwerkzeugen mit Kostenauswirkung bei Fahrzeug 1, 490 bei Fahrzeug 2, und 1.045 Anpassungen bei Fahrzeug 3 gezählt.

Ausgehend von Fahrzeug 1 wurden die Baugruppen, gemessen an der Anzahl an Anpassungen, absteigend durchnummeriert und so anonymisiert. In den anderen beiden Fahrzeugen wurden die gleichen Zahlen für die äquivalente Baugruppe verwendet. Unter mehr als 60

Baugruppen insgesamt, betreffen in Fahrzeug 1 knapp 60 % aller Anpassungen die Baugruppen 1-10 und mehr als 80 % die Baugruppen 1-20. Auch bei den Fahrzeugen 2 und 3 zeigt sich, dass ein Großteil der Anpassungen in denselben 20 Baugruppen durchgeführt werden – das Änderungsverhalten also übertragbar ist.

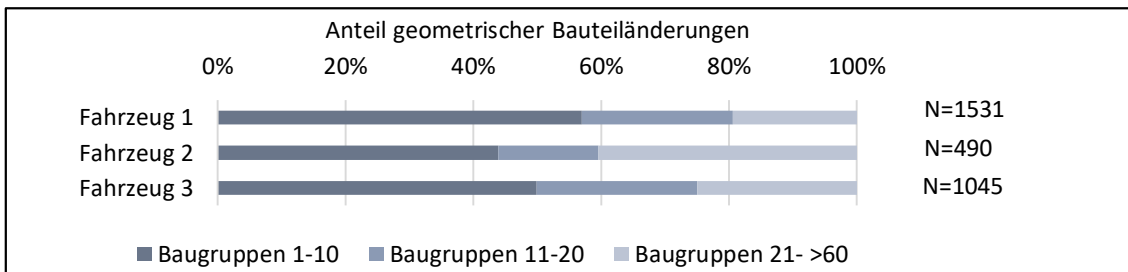


Abbildung 3.7: (D) Verteilung geometrischer Bauteiländerungen auf unterschiedliche Baugruppen

(E) Spezifizieren der Änderungskosten

Abbildung 3.8 zeigt für jedes der drei Fahrzeuge eine Detaillierung der anfallenden Kosten geometrischer Änderungen. Davon ausgeschlossen sind Investitionen in die Fabrikstruktur inklusive der Produktionsmaschinen, da ihre Nutzungsdauer häufig den Fahrzeuglebenszyklus übersteigt und die Kosten somit nicht produktspezifisch wären (vgl. Schneider 2008, S. 107).

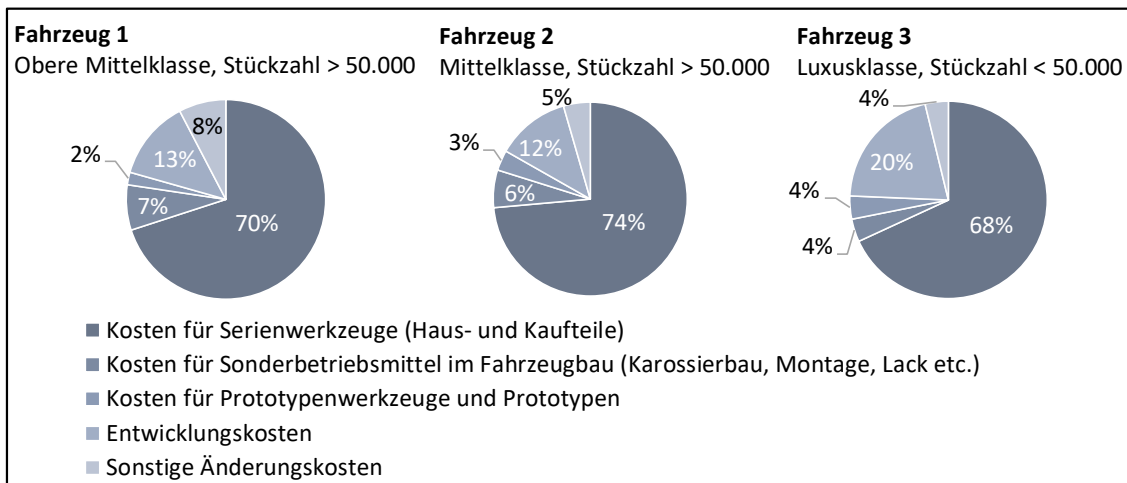


Abbildung 3.8: (E) Zusammensetzung der Änderungskosten geometrischer Änderungen

Der Großteil (70 % bei Fahrzeug 1, 74 % bei Fahrzeug 2 und 68 % bei Fahrzeug 3) ist auf die Änderungskosten von Serienwerkzeugen zurückzuführen. Den zweitgrößten Anteil stellen

Entwicklungskosten dar, die etwa in der Konstruktion, Simulation und Erprobung entstehen. Darin sind sowohl Kosten des OEMs als auch der Lieferanten enthalten. Darüber hinaus entstehen Kosten durch die Anpassung von Sonderbetriebsmitteln im Fahrzeugbau, etwa in der Lackiererei, in der Montage oder im Karosseriebau (z.B. Robotergreifer), gefolgt von Kosten für Prototypen und deren Werkzeug. Sonstige Änderungskosten ergeben sich etwa bei der Verschrottung von alten Versionen oder bei änderungsbedingten Sondertransporten. Auch die beim OEM entstehenden Kosten für Arbeitsvorbereitung wie Neuplanung von Vorgängen, Mitarbeiter anlernen und Anlagen programmieren (Eversheim 2002, S. 4–8) sind darunter zusammengefasst. Diese werden nur für die Umfänge im Karosseriebau, der Lackiererei, Montage und Logistik sowie für alle Bauteile, die der OEM selbst herstellt, explizit erfasst. Da die meisten Bauteile von Lieferanten hergestellt werden, ist anzunehmen, dass Arbeitsvorbereitungskosten in der Bauteilfertigung einen größeren Anteil an den Gesamtänderungskosten haben als hier dargestellt. Für die Dissertation gelten sie daher weiter als relevant. Aufgrund der noch höheren Relevanz (vgl. Abbildung 3.8) werden nachfolgend zunächst Ergebnisse zu detaillierteren Analysen von Werkzeugänderungskosten vorgestellt.

(F) Werkzeugänderungskosten nach Fahrzeugbereichen

In allen drei Fahrzeugen entsteht der größte Anteil der Werkzeugänderungskosten im Bereich Karosserie/ Exterieur, gefolgt vom Interieur. Dies zeigt Abbildung 3.9. Bei Fahrzeug 2, welches mehr Umfänge eines anderen Fahrzeugs übernimmt, fallen weniger Werkzeugänderungskosten im Interieur und nur sehr geringe in den Bereichen Fahrwerk und Elektronik/Infotainment an. Die Anteile korrelieren mit der Verteilung von Geometrieänderungen in den unterschiedlichen Fahrzeugbereichen (vgl. Abbildung 3.6).

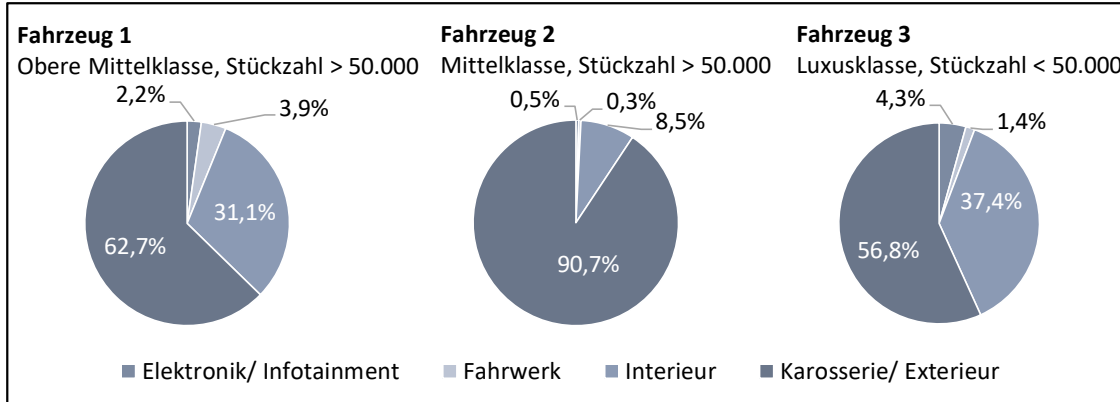


Abbildung 3.9: (F) Anteil der Werkzeugänderungskosten in den Bereichen im Fahrzeug

(G) Werkzeugänderungskosten in den PEP-Phasen

Der Anteil von Werkzeugänderungskosten in den vier zuvor definierten PEP-Phasen ist über alle drei Fahrzeuge vergleichbar ausgeprägt (vgl. Abbildung 3.10). Zwischen der Bestellung erster Werkzeuge und dem Aufbau der ersten Erprobungsfahrzeuge machen die Änderungskosten bei jedem Fahrzeug den drittgrößten Anteil aus. Zwischen dem Aufbau der ersten Erprobungsfahrzeuge und dem Aufbau der ersten Vorserienfahrzeuge fallen bei Fahrzeug 1 und Fahrzeug 2 die meisten Werkzeugänderungskosten an (48,5 % bzw. 34,9 %). Bei Fahrzeug 3 entsteht eine Phase später der größte Anteil an Werkzeugänderungskosten (36,1 %). Somit ist der Zeitraum zwischen Aufbau der ersten Erprobungsfahrzeuge und Serienstart am relevantesten. Der Anteil der Werkzeugänderungskosten ist, abhängig vom Fahrzeug, mit 8,5 % bis 11,3 % in der Periode nach Serienstart bei allen drei Fahrzeugen am geringsten. Dennoch konnte gezeigt werden, dass auch nach Serienstart durch geometrische Änderungen Kosten bei Werkzeugen entstehen.

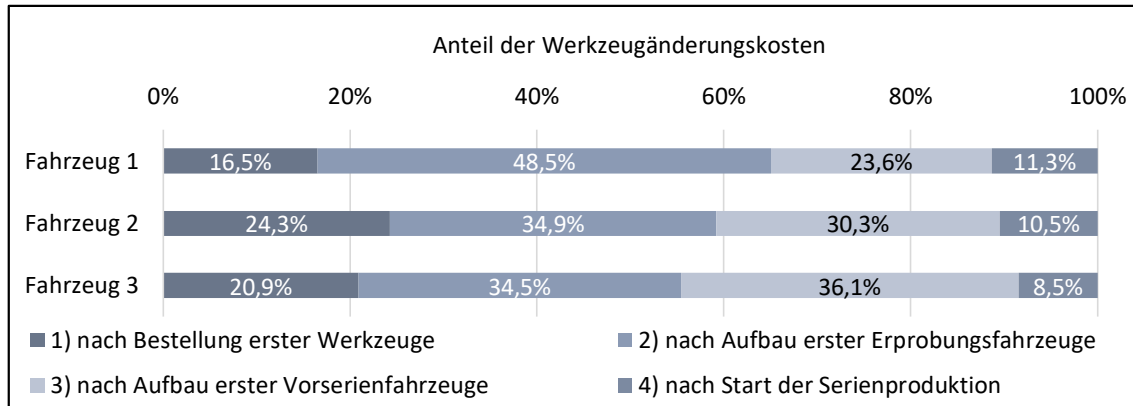


Abbildung 3.10: (G) Anteil der Serienwerkzeugänderungskosten in den PEP-Phasen

(H) Unterschied in der Höhe der Werkzeugänderungskosten nach Phasen im PEP

In Tabelle 3.1 werden für alle drei Fahrzeuge die normierten Mittelwerte sowie die mittleren Ränge der Werkzeugänderungskosten von in den vier PEP-Phasen geänderten Bauteilen aufgezeigt. Die deskriptive Auswertung der Mittelwerte und der zentralen Tendenzen zeigt, dass die Werkzeugänderungskosten bei Fahrzeug 1 und 2 in Phase 1 am höchsten sind, bei Fahrzeug 3 in Phase 4 des PEP.

In der nachfolgenden interferenzstatistischen Analyse wird beim Levene-Test für Fahrzeug 1 mit $F(3,646) = 2,972$, $p = 0,031$ und für Fahrzeug 2 mit $F(3,226) = 14,313$, $p < 0,001$ die Nullhypothese verworfen, dass Varianzhomogenität zwischen den Gruppen besteht. Damit ist eine Bedingung für die Varianzanalyse verletzt, vgl. (Backhaus et al. 2016, S. 185). Nur bei Fahrzeug 3 ist mit $F(3,459) = 1,059$, $p = 0,366$ Varianzhomogenität gegeben. Die darauffolgende Varianzanalyse zeigt bei $n = 463$ Beobachtungen mit $F(3,459) = 0,629$, eine Signifikanz von $p = 0,597$. Damit können keine signifikanten Unterschiede zwischen den Werkzeugänderungskosten von Einzelbauteilen in unterschiedlichen Phasen nachgewiesen werden. Die Kruskal-Wallis-Tests ergeben für Fahrzeug 1 eine asymptotische Signifikanz von $p = 0,392$, für Fahrzeug 2 von $p = 0,075$ und für Fahrzeug 3 von $p = 0,248$. Somit kann für keines der drei Fahrzeuge ein statistisch signifikanter Unterschied der Werkzeugänderungskosten in den unterschiedlichen Phasen nachgewiesen werden. Zu den durchschnittlich höheren Kosten in einzelnen Phasen tragen Ausreißer mit sehr hohen Kosten bei. Damit wurde bei der Entwicklung der Fahrzeuge die aus der Literatur bekannte Erkenntnis berücksichtigt, dass die

Kosten einer Änderung in jeder Phase des PEP ansteigen (Ehrlenspiel et al. 2020, S. 14). In frühen Phasen werden umfangreichere Änderungen durchgeführt (vgl. Abbildung 3.5) als in späten, sodass die Höhe der Werkzeugänderungskosten über die Phasen des PEP tendenziell gleichbleibend ist.

Tabelle 3.1: (H) Mittelwerte und mittlere Ränge von Werkzeugänderungskosten nach PEP-Phasen

PEP-Phasen	Werkzeugänderungskosten eines Bauteils								
	Fahrzeug 1			Fahrzeug 2			Fahrzeug 3		
	N	Norm. \bar{x}	Mittlerer Rang	N	Norm. \bar{x}	Mittlerer Rang	N	Norm. \bar{x}	Mittlerer Rang
1 Nach Bestellung erster Werkzeuge	74	1,32	354,5	14	1,9	155,9	98	0,43	239,6
2 Nach Aufbau erster Erprobungsfahrzeuge	285	0,98	329,6	99	0,64	112,0	178	0,32	217,2
3 Nach Aufbau erster Vorserienfahrzeuge	221	0,80	313,1	90	0,73	117,6	137	0,35	237,7
4 nach Start der Serienproduktion	70	0,98	317,4	27	0,57	100,5	50	0,44	254,3

(I) Werkzeugänderungskosten unterschiedlicher Fahrzeuge im Vergleich

In Tabelle 3.2 sind für alle drei Fahrzeuge die normierten Mittelwerte sowie die mittleren Ränge der Werkzeugänderungskosten von Bauteilen dargestellt. Größere Unterschiede existieren zwischen Fahrzeug 3 und den anderen beiden Fahrzeugen. Das Ergebnis des durchgeführten Levene-Tests deutet mit $F(2,964) = 22,067$, $p < 0,001$ auf Varianzheterogenität hin, sodass keine Varianzanalyse erfolgt. Der alternativ durchgeführte Kruskal-Wallis Test ergibt, dass signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen existieren ($\chi^2 = 65,390$, $p < 0,001$, $df = 2$). Anschließend durchgeführte Post-hoc-Tests (Dunn-Bonferroni) zeigen, dass sich die Werkzeugänderungskosten eines Bauteils von Fahrzeug 3 und 1 ($z = 9,426$, $p < 0,001$) sowie von Fahrzeug 3 und 2 ($z = 8,199$, $p < 0,001$) signifikant unterscheiden. Da sich Fahrzeug 3 hinsichtlich der Stückzahl von den anderen beiden Fahrzeugen unterscheidet, ist anzunehmen, dass ein Unterschied in der Stückzahl des Fahrzeugs die Werkzeugänderungskosten beeinflusst. Es handelt sich jeweils um einen mittleren Effekt nach COHEN mit $r = 0,33$ zwischen Fahrzeug 3 und 1 bzw. $r = 0,38$ zwischen Fahrzeug 2 und 3 (Cohen 1988, S. 79–83).

Tabelle 3.2: (I) Mittelwerte und mittlere Ränge von Werkzeugänderungskosten in den Fahrzeugen

Fahrzeug	Werkzeugänderungskosten eines Bauteils		
	N	Norm. \bar{x}	Mittlerer Rang
1 Obere Mittelklasse, hohe Stückzahl	494	1,11	540,1
2 Mittelklasse, hohe Stückzahl	162	0,96	571,4
3 Luxusklasse, niedrige Stückzahl	311	0,47	349,5

(J) Ursachen und Verteilung der Ursachen geometrischer Änderungen im PEP

In Abbildung 3.11 sind absteigend die häufigsten Änderungsursachen aufgezeigt. Geometrische Änderungen haben ihren Ursprung zum einen in der Produktion, u.a. weil Kosten reduziert, Fügeprobleme behoben oder weitere fertigungsspezifische Ursachen korrigiert werden müssen. Andere Geometrieänderungen entstehen, weil Produktfunktionen nicht erfüllt werden. Kategorien hierfür sind geometrische Konflikte, Design, Fugenmaße, mechanische Eigenschaften, Crasheigenschaften, akustische Auffälligkeiten, Dichtigkeit/Korrosion, Komfort und Ergonomie, geometrische Toleranzen, Fahrdynamik, sowie Gewicht/Leichtbau. Ein Teil der Ursachen wurde keiner Kategorie zugeordnet, weil diese aufgrund unklarer Problemformulierung nicht spezifizierbar waren (6 %) oder aufgrund der geringen Häufigkeit in die Sammelkategorie sonstige Änderungsursachen (6 %) eingeteilt wurden. Die häufigsten Änderungsursachen sind Probleme beim Fügen (28 %), geometrische Konflikte (11 %) und Design (8 %). Weitere Ursachen sind, mit absteigender Bedeutung, Abweichungen bei Fugenmaßen, mechanischen Eigenschaften, Crasheigenschaften, akustische Auffälligkeiten sowie Dichtigkeit und Korrosion. Ursachen mit Fertigungsursprung, Komfort und Ergonomie, Kostenreduzierung, geometrische Toleranzen, Fahrdynamik/Fahrverhalten sowie Gewicht/Leichtbau haben einen Anteil von jeweils unter 5 %. (Bauch 2020, S. 66)

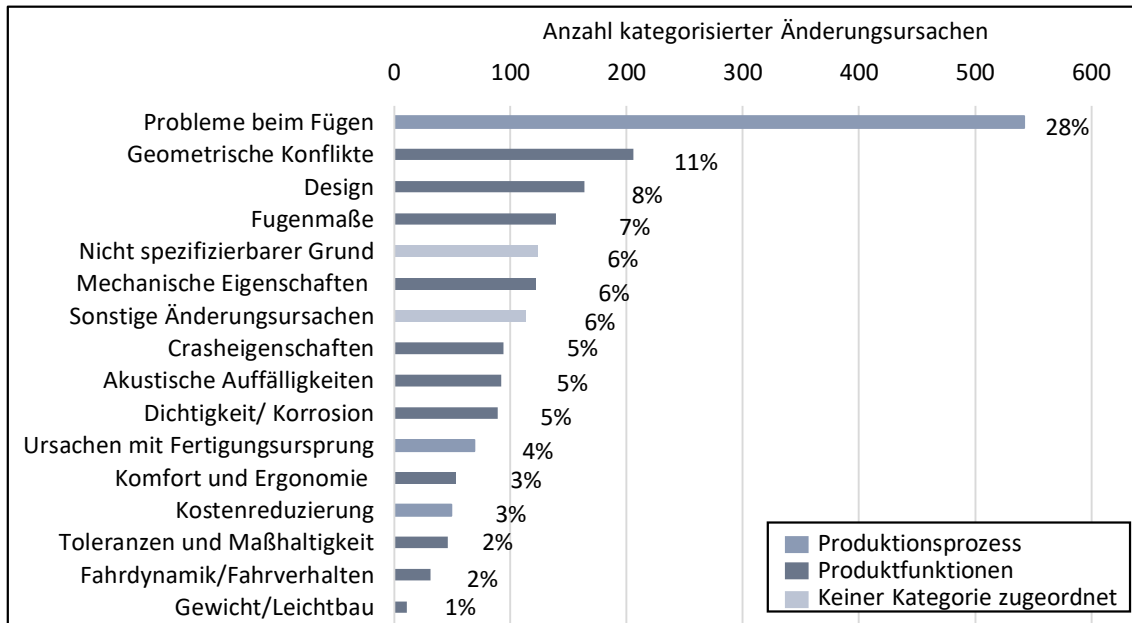


Abbildung 3.11: (J) Ursachen geometrischer Änderungen (Darstellung in Erweiterung zu Bauch 2020, S. 66; Sykora 2021, S. 53)

Die acht häufigsten Änderungsursachen sind verantwortlich für 77 % der geometrischen Änderungen und somit von größerer Relevanz als die übrigen Ursachen. Im Sinne einer gezielten Analyse wurde untersucht, zu welchem Anteil diese acht Ursachen in welcher PEP-Phase auftreten. Das Ergebnis zeigt Tabelle 3.3. Die meisten Änderungen treten zwischen dem Aufbau erster Erprobungsfahrzeuge und dem Serienstart auf. Änderungen aufgrund des Designs (13 %), der mechanischen Eigenschaften (16 %) oder der Crasheigenschaften (17 %) treten zum Teil bereits vermehrt vor Aufbau der Erprobungsfahrzeuge auf. Änderungen aufgrund geometrischer Konflikte (15 %), Fugenmaße (19 %), akustischer Auffälligkeiten (17 %) und Problemen mit Dichtigkeit und Korrosion (18 %) treten vergleichsweise häufig nach Serienstart auf. KRATZER ET AL. diskutieren in ihrer Veröffentlichung mögliche Gründe hierfür, wie die Verfügbarkeit von Methoden zur virtuellen Erprobung (Kratzer et al. 2022). Es wird argumentiert, dass manche Änderungsursachen, wie etwa Crash, früher auftreten als andere (etwa Fugenmaße oder Korrosion), weil diese Eigenschaften virtuell besser erprobt werden können. Geometrische Konflikte, Fugenmaße sowie Probleme beim Fügen deuten zudem auf ein Zusammenspiel mehrere Bauteile hin. Dieses Zusammenspiel führt nach CLARKSON ET AL. zu Folgeänderungen (Clarkson et al. 2004) welche möglicherweise spät im PEP auftreten.

Tabelle 3.3: (J) Anteil der Änderungsursachen in unterschiedlichen Phasen der Produktentstehung

Änderungsursache	Anteil, zu dem die Änderungsursachen in den PEP-Phasen auftreten. Nach ...			
	1 Bestellung erster Werkzeuge	2 Aufbau erster Erprobungsfahrzeuge	3 Aufbau erster Vorserienfahrzeuge	4 Start der Serienproduktion
Probleme beim Fügen	9%	45%	36%	10%
Geometrische Konflikte	9%	41%	35%	15%
Design	13%	40%	37%	10%
Fugenmaße	4%	21%	55%	19%
Mechanische Eigenschaften	16%	48%	26%	11%
Crasheigenschaften	17%	41%	38%	3%
Akustische Auffälligkeiten	9%	29%	45%	17%
Dichtigkeit/ Korrosion	5%	40%	37%	18%

(K) Unterschied in der Höhe der Werkzeugänderungskosten nach Änderungsursachen

Für jedes der drei Fahrzeuge wurde analysiert, inwieweit sich die Werkzeugänderungskosten der Bauteile bei unterschiedlichen Änderungsursachen unterscheiden. Ziel war es, dadurch weitere mögliche Einflussgrößen auf die Höhe der Werkzeugänderungskosten zu identifizieren. Die Mittelwerte sowie die mittleren Ränge der Werkzeugänderungskosten variieren je nach Fahrzeug für die acht häufigsten Änderungsursachen (vgl. Anhang 3). Bei der nachfolgenden inferenzstatistischen Analyse wird zunächst durch den Levene-Test für Fahrzeug 1 mit $F(7,469) = 9,284$, $p < 0,001$, Fahrzeug 2 mit $F(7,209) = 4,068$, $p < 0,001$ und Fahrzeug 3 mit $F(7,371) = 3,011$, $p = 0,004$ Varianzheterogenität nachgewiesen. Daher wird auf die Durchführung einer Varianzanalyse verzichtet und es werden die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests vorgestellt. Für Fahrzeug 1 (asymptotische Signifikanz von $p = 0,136$) und Fahrzeug 2 (asymptotische Signifikanz von $p = 0,106$) existieren keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der Werkzeugänderungskosten bei unterschiedlichen Änderungsursachen. Bei Fahrzeug 3 ist laut Kruskal-Wallis ein signifikanter Unterschied vorhanden ($\chi^2 = 22,016$, $p < 0,003$, $df = 7$). Darauf folgende Post-hoc-Tests (Dunn-Bonferroni-Test) ergeben, dass nur signifikante Unterschiede der Werkzeugänderungskosten zwischen den Ursachen *Probleme beim Fügen* und *mechanische Eigenschaften* ($z = -3,570$, $p = 0,010$) sowie zwischen *Probleme beim Fügen* und *Crasheigenschaften* ($z = -3,175$, $p = 0,042$) bestehen. In beiden Fällen handelt es sich um einen schwachen Effekt nach Cohen (Cohen 1988, S. 79–83) mit $r = 0,26$ zwischen *Problemen beim Fügen* und *mechanischen Eigenschaften* sowie $r = 0,23$ zwischen *Problemen beim Fügen* und *Crasheigenschaften*. Da nur bei Fahrzeug

3 schwache Effekte zwischen einzelnen Gruppen festzustellen sind, kann im Allgemeinen nicht nachgewiesen werden, dass sich die Werkzeugänderungskosten für Einzelbauteile bei unterschiedlichen Änderungsursachen signifikant unterscheiden.

Fazit der Ergebnisse für die Arbeit

Das Ausmaß geometrischer Änderungen (53,4 % aller Anträge) und der hohe Anteil der Werkzeugänderungskosten an den Gesamtänderungskosten (größer 68 %) zeigt das Potenzial einer werkzeuglosen Fertigung. Späte umfangreiche geometrische Änderungen sind bei werkzeuggebundenen Technologien besonders teuer – im PEP sind sie aber verbreitet (mehr als 30 % nach Aufbau erster Vorserien), sodass der Einsatz von AM hier besonders vorteilhaft wäre. Die Ergebnisse zeigen auch, dass bestimmte Baugruppen mehr Änderungen haben als andere. Dahinter stehen Wirkzusammenhänge, die im Rahmen der Dissertation genauer untersucht werden müssen. Die Analyse bezüglich der häufigsten Änderungsursachen (Fügeprobleme, geometrische Konflikte, Design) und eine Analyse zum Zeitpunkt des Auftretens der Änderungsursachen (z.B. akustische Probleme spät im PEP) zeigen mögliche Einflüsse auf Wahrscheinlichkeiten und Zeitpunkte von Änderungen im PEP.

3.2 Folgen der Änderungsdauer im PEP – Negative Zusatzeffekte

In diesem Abschnitt werden über Experteninterviews die Folgen bzw. negativen Zusatzeffekte einer zunehmenden Änderungsdauer identifiziert. Unterabschnitt 3.2.1 enthält das angewandte Vorgehen, Unterabschnitt 3.2.2 fasst die Ergebnisse zusammen.

3.2.1 Vorgehen und Durchführung

In Teil 2 der Studie wurden in sieben qualitativen Einzelgesprächen mit vier Experten die Folgen der Zeitdauer einer Änderungsumsetzung diskutiert. Ein Entwickler aus der Serienbetreuung (E1), ein Simultaneous Engineering Teamleiter (E2), ein Projekteinkäufer (E3)

sowie ein Produktqualitätsingenieur für Gewährleistungsthemen (E4) standen als Interviewpartner zur Verfügung. Die Transkription erfolgte basierend auf dem Regelsystem nach (Kuckartz et al. 2008, S. 27–28). Die Zusammenfassung schriftlich festgehaltener Meinungen erfolgte anhand der qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING durch Paraphrasierung, Generalisierung und Reduktion der Kernaussagen (Mayring 1994, S. 164–173). Die Paraphrasen, deren Generalisierungen sowie die daraus entstandenen Kernaussagen sind in Anhang 4 und 5 nachzulesen. Die Leitfrage lautete: „Welche Zusatzeffekte entstehen vor und nach Serienstart, die bei einer schnelleren Umsetzung mit AM weniger stark bzw. nicht entstehen würden?“ Die Erkenntnisse von SYKORA 2021 sind Bestandteil des Abschnitts.

3.2.2 Ergebnisse

Die identifizierten Zusatzeffekte gliedern sich in solche vor und solche nach Serienstart. Die Zitierweise benennt den Experten, die Interviewnummer und die Nummer der Textstelle.

Negative Zusatzeffekte vor Serienstart (siehe Anhang 4)

In der Produktentstehung führt eine lange Umsetzung häufig dazu, dass geänderte Bauteile nicht in der nächsten Hardware-Bauphase verbaut und erprobt werden können (E1.3, 81; E2.1, 46; E3.1, 16). Der dadurch verspätete Erkenntnisrückgewinn beeinträchtigt die Produktreife und führt in den Vorserien dazu, dass der Serienanlauf erst spät mit den finalen Geometrien der Bauteile erfolgen kann (E2.2, 14). Die geringe Prozess- und Produktreife resultiert in weiteren Problemen, welche sich später in Gewährleistungskosten oder weiteren, dann teureren Änderungen niederschlagen (E1.2, 221; E2.1, 52). Um der geringeren Reife vorzubeugen, werden alternativ zum Teil sehr teure Änderungslösungen gewählt, die mit großer Sicherheit funktionieren (E2.2, 8). Eine Änderungsumsetzung zur nächsten Bauphase ist daher erstrebenswert.

Negative Zusatzeffekte nach Serienstart (siehe Anhang 5)

Bei laufender Serienproduktion ist vor einer Änderung häufig eine Vorproduktion notwendig, um während der Änderung (z.B. von Werkzeugen oder Programmen) und einem damit

verbundenem Produktionsstopp weiterhin Bauteile an das Fahrzeugwerk liefern zu können (E1.1, 33). Um die erforderliche Vorproduktionsstückzahl zu ermitteln, muss a priori die Änderungsdauer abgeschätzt und mit einem Faktor multipliziert werden, der die Unsicherheit der Schätzung berücksichtigt (1.1, 125). Für die vorproduzierten Bauteile müssen zusätzliche Behälter sowie Lagerfläche bereitstehen, was beides zu Kosten führt (E1.1, 100; E1.2, 25; E3.2, 61). Bei geringer Auslastung des Lieferanten erfolgt die Vorproduktion im Normalbetrieb. Bei hoher Auslastung wird die Vorproduktion durch Zusatzschichten, durch Vergabe der Vorproduktionsstückzahl oder durch Vergabe eines anderen Bauteils ermöglicht. In diesen Fällen entstehen Kosten für die Zusatzkapazität (E1.2, 123; E3.2, 3).

Qualitätsprobleme in Kundenfahrzeugen führen potenziell zu Gewährleistungskosten, die bei einer Häufung der Fälle eine technische Änderung erforderlich machen (E1.1, 81; E4, 34). Diese Qualitätsprobleme werden laut der Experten meist durch geometrische Bauteiländerungen gelöst (E4, 32). Jedes weitere hergestellte Bauteil birgt bis zur Umsetzung der Änderung das Risiko, Gewährleistungskosten zu verursachen. Um das Gewährleistungsrisiko zu reduzieren, kann alternativ eine Nacharbeit erfolgen, bis das Problem durch eine Änderung final behoben ist (E1.1, 102). Die Thematik wird auch bei (Conrat Niemerg 1997, S. 155) erwähnt. Zudem werden geometrische Änderungen durchgeführt, um Produktkosten zu senken (E1.1, 93; E4, 93). Ein großer Anteil geometrischer Änderungen wird heute durchgeführt, um Montageprobleme zu beheben (vgl. Abbildung 3.11). Die Produktkostenreduktion ist erst wirksam, wenn die Änderung umgesetzt ist. Durch eine schnellere Umsetzung von Änderungen nach Serienstart entstehen also zum einen potenziell weniger Vorproduktionskosten. Zum anderen können mögliche Kosten für Nacharbeit, Gewährleistung und Produktkosten früher eingespart werden, vgl. dazu die betreute studentische Arbeit von (Sykora 2021, S. 86–87).

Fazit der Ergebnisse für die Arbeit

Änderungen vor Serienstart sind umso problematischer, je länger sie dauern. Zudem führt eine langandauernde Änderung nach Serienstart zu negativen Folgeeffekten, wie etwa Vorproduktionskosten, hohen Produktkosten bis zur Umsetzung und möglichen Gewährleistungskosten, bis das Problem durch die Änderung beseitigt ist. Somit ist die Änderungs-

dauer ein zentraler Aspekt und auch die Operationalisierung der unterschiedlichen Kostenarten ist im Rahmen der Arbeit für eine Bewertbarkeit von Änderungsflexibilität erforderlich.

3.3 Änderungsbedarfe im Produktlebenszyklus

In diesem Abschnitt wird anhand von Experteninterviews mit Produktmanagern aus dem Automobilbau analysiert, für welche Hardwarekomponenten ein besonderer Bedarf nach Änderungsflexibilität im Lebenszyklus nach Serienstart besteht. In Unterabschnitt 3.3.1 wird das Vorgehen der empirischen Untersuchung beschrieben, in Unterabschnitt 3.3.2 werden die Ergebnisse vorgestellt.

3.3.1 Vorgehen und Durchführung

Änderungen im Produktlebenszyklus erfolgen, um auf veränderte Kundenanforderungen zu reagieren und so den Kundennutzen zu steigern (Schuh et al. 2021b, S. 229). Solche Änderungen stellen Innovationen dar (Schuh et al. 2021b, S. 239). Für den Umgang mit Innovationen existieren zahlreiche Modelle, wie das Phasenmodell nach GESCHKA (Geschka 1993, S. 160), das Dreiphasenmodell nach THOM (Thom 1980, S. 53), der Innovationsprozess nach PLESCHAK ET AL. (Pleschak et al. 1996, S. 24) oder das Stage-Gate-Modell nach COOPER (Cooper 1996). VAHS UND BREM stellen einen idealisierten Innovationsprozess vor, bestehend aus einem Innovationsanstoß, der Ideengewinnung, der Bewertung, der Entscheidungsphase, der Umsetzung sowie der Markteinführung (Vahs et al. 2015, S. 230). Durch eine Situations- und Problemanalyse werden markt-, technologie-, oder regulatorikinduzierte Innovationsanstöße identifiziert (Vahs et al. 2015, S. 248). Markterfolg entsteht, wenn Unternehmen ihre Leistungen an Trends anpassen (Großklaus 2014, S. 8; Duncker et al. 2018, S. 2). Aus diesem Grund sind Instrumente der Trendforschung wie Gruppendiskussionen, Tiefeninterviews, ethnographische Beobachtungen, Metaanalysen, Spezialisten Diskussionen, Delphi-Studien sowie Szenariotechniken etabliert (Duncker et al. 2018, S. 10–13).

Die Trendanalyse dient in dieser Arbeit dem Innovationsanstoß. In den Grundlagen, vgl. dazu Abschnitt 2.3, wurden die wesentlichen Trends bis 2030 im Automobilbau erfasst. Auf dieser Grundlage erfolgt gemäß VAHS ET AL. eine Suchfeldbestimmung, für die dann Innovationsideen generiert werden (Vahs et al. 2015, S. 256). Die Haupttrends automatisiertes Fahren, Konnektivität, Elektrifizierung und Personalisierung/Design werden als relevant in Bezug auf geometrische Änderungsflexibilität eingestuft, vgl. Abschnitt 2.3. Die Grundidee besteht darin, dass aus den Trends Kundenanforderungen abgeleitet werden können, die sich in Zukunft verstärkt im Produktlebenszyklus eines Fahrzeugs verändern werden. Die Hypothese, die sich daraus ergibt, lautet, dass dadurch Einsatzfelder für eine änderungsflexible Technologie wie AM entstehen, da jeweils auch Hardwarekomponenten betroffen sind. So betrifft etwa eine Änderung innerhalb des Trends Konnektivität nicht nur Software, sondern auch die entsprechende Hardware. Aufgrund ihrer Erfahrung eignen sich Experten besonders, Aussagen über die zukünftige Entwicklung zu machen (Koch 2009, S. 249) – und daher auch um die Trends in Bezug auf die Notwendigkeit geometrischer Änderungsflexibilität zu diskutieren, und daraus Ideen für Einsatzfelder einer änderungsflexiblen Fertigungstechnologie zu generieren. Durch Einzelinterviews wird das Risiko eines Meinungsführers reduziert, sodass auch vielversprechende Einzelmeinungen Berücksichtigung finden (Koch 2009, S. 52). Zwischen März und Mai 2021 wurde eine Querschnittserhebung (Magerhans 2016, S. 49) von elf qualitativen Interviews mit zwölf Experten aus dem Produktmanagement durchgeführt. Die Experten mit mindestens fünf Jahren Berufserfahrung sind für drei unterschiedliche Marken tätig und verantworten Fahrzeuge vom Kleinwagen- bis zum Luxussegment (vgl. Anhang 6). Um eine inhaltliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wurde gemäß STEFFEN ET AL. (Steffen et al. 2019, S. 30) ein semi-strukturierter Interviewleitfaden verwendet, vgl. Anhang 7. Die Gespräche wurden transkribiert und codiert, um durch eine qualitative Inhaltsanalyse die Objektivität der Studienergebnisse zu gewährleisten (Steffen et al. 2019, S. 26). Die Transkription erfolgte auf Basis eines Regelsystems, das bei KUCKARTZ ET AL. im Detail nachzulesen ist (Kuckartz et al. 2008, S. 27–28). Die kategorienbasierte Auswertung nach KUCKARTZ ET AL., ein durch die Software MAXQDA unterstütztes und an die qualitative

Inhaltsanalyse nach MAYRING (Mayring 1994, S. 164–167) orientiertes Vorgehen, eignet sich besonders, um Unterschiede zwischen Fahrzeugsegmenten, Trends und daraus resultierenden Einsatzfeldern für die Additive Fertigung zu analysieren. Das Festlegen der Kategorien, auch Codes genannt, erfolgte nach den Anforderungen von KUCKARTZ ET AL. iterativ, orientiert am Untersuchungsziel und praktikabel anwendbar auf das Datenmaterial (Kuckartz et al. 2008, S. 37). Einzelne Textstellen wurden direkt und indirekt zitiert sowie über gemeinsame Kategorien und Subkategorien zusammengefasst (Kuckartz et al. 2008, S. 43–47). Die Ergebnisse aus der durch den Autor betreuten Studienarbeit von SEIFERT (Seifert 2021) werden im folgenden Abschnitt um weitere Aspekte ergänzt und verdichtet dargestellt.

3.3.2 Ergebnisse

Der Abschnitt enthält die von den Experten erwähnten Randbedingungen und Herausforderungen innerhalb der besprochenen Trends. Zudem werden, je Trend, Kundenanforderungen und somit Einsatzfelder beschrieben, welche die Experten für eine änderungsflexible Fertigungstechnologie sehen. Innerhalb des Trends Design/Personalisierung werden Designupdates, Editionen und Sondermodelle sowie Personalisierung besprochen. Anschließend werden die Ergebnisse zu Updates im Bereich Konnektivität, Elektrifizierung und automatisiertes Fahren vorgestellt. Eine Übersicht der Randbedingungen und Herausforderungen (Anhang 8) sowie der Kundenanforderungen und daraus resultierenden Einsatzfelder für AM (Anhang 9, Anhang 10) inklusive Ursprung und Häufigkeit, mit der sie in den Interviews erwähnt wurden, ist im Anhang nachzulesen. Die Zitierweise benennt jeweils den befragten Experten und die Nummer der transkribierten Textstelle.

Designupdates

Um einem Abfall der Absatzzahlen entgegenzuwirken, wird heute etwa zur Lebenszyklushälfte ein Impuls durch einmalige Updates gesetzt (B03, 51; B07, 78; B12, 63; B15, 34). Fahrzeuge im Luxussegment (B15, 34), High-Performance-Modelle (B11, 9) oder „[...] *emotionale Derivate haben häufig diesen überhöhten Lebenszyklus am Anfang und dahinter fallen die aber ganz*

schnell auch wieder steil ab und laufen dann flach aus“ (B12, 65). Besonders bei diesen Fahrzeugen würden regelmäßige Updates von designrelevanten Komponenten im Interieur und Exterieur einen erheblichen Mehrwert erzeugen (B06, 16; B07, 80; B09, 18; B11, 36; B12, 59; B15, 74; B16, 40).

Editionen und Sondermodelle

Eine Differenzierung von Editionen erzeugt einen kommunikativen Impuls (B12, 61), der auch dem Serienfahrzeug nützt. Bei Editionen sind, gerade für asiatische und amerikanische Märkte, Sichtbauteile im Interieur sowie gut sichtbare Exterieur-Umfänge besonders interessant (B04, 16; B12, 16; B15, 40; B16, 44). Sondermodelle mit limitierter Stückzahl steigern den Differenzierungsgrad (B03, 32; B04, 36; B09, 14; B16, 56). Neben der Veränderung optischer Elemente ist dabei auch die gezielte Anpassung technischer Funktionen für den Kunden von Interesse (B04, 36; B16, 60). Einige Experten äußern im Zuge der Stückzahllimitierung den Wunsch nach nummerierten Komponenten (B03, 32; B12, 14). Dies führt in der Produktion aber zu hohen steuerungstechnischen Aufwänden, wenn dem Fahrzeug die richtige Nummer zugeordnet werden muss (B12, 14). Bei durchnummerierten Editionen ist zusätzlich das Risiko der Ersatzteilversorgung zu nennen, da der Kunde bei einem beschädigten Bauteil ein Ersatzprodukt mit identischer Nummer erwartet (B04, 40). Werden die Herausforderungen in der Umsetzung von Editionen und Sondermodellen intelligent gelöst, ist es vorstellbar, dass Editionen mehr als die Hälfte des Gesamtabsatzvolumens eines Fahrzeugmodells darstellen (B04, 24). Editionen sind häufig an Absatzregionen gekoppelt, weshalb regionalspezifische Kenntnisse zu Besonderheiten und Ereignissen (z.B. Jubiläen) vorliegen müssen (B04, 16; B09, 18; B12, 6). Um auf diese Ereignisse schnell zu reagieren, wäre es daher sinnvoll, zukünftig bereits in einer frühen Entwicklungsphase Änderungsflexibilität vorzuhalten, auch wenn die Konkretisierung möglicher Bauteilumfänge erst in der Serienbetreuung stattfindet (B09, 14).

Personalisierung

In einigen Absatzmärkten, etwa in den USA und China werden Fahrzeuge für den Markt vorproduziert (Build-to-Stock) und nicht kundenindividuell hergestellt, sodass Sonderwünsche

häufig nicht erfüllt werden können (B11, 17; B06, 10; B12, 22). Da jedoch auch dafür ein Marktpotenzial besteht (B07, 80; B09, 20; B12, 18, 30), wäre die individuelle nachträgliche Personalisierung eine Möglichkeit, dem Wunsch zu begegnen (B03, 24). Personalisierung wird heute im Luxussegment zum Teil bereits von Drittanbietern durchgeführt (B11, 10; B12, 26). Bedingung einer erfolgreichen Implementierung personalisierter Umfänge ist laut der Experten eine nach Fahrzeugkauf zeitnahe Bereitstellung, weshalb eine dezentrale Fertigung in den Märkten notwendig wäre (B06, 25; B06, 27). Für den europäischen Markt wird das Potenzial der Personalisierung geringer eingeschätzt, da eine Repräsentation nach außen weniger stark verbreitet, und der Anteil der Firmenwagen besonders hoch ist (B09, 13; B12, 18;). Als Voraussetzung für den Einsatz personalisierter Umfänge nennen die meisten Experten eine hohe Wertigkeit, die bestenfalls die Serie übersteigt (B03, 44; B04, 10; B07, 80; B08, 45; B12, 38; B15, 87; B16, 46). Besonders in oberen Fahrzeugsegmenten ist Materialechtheit erforderlich (B08, 45; B12, 38). Faszination kann beim Kunden auch durch die Herstellung der Umfänge mit einem innovativen Fertigungsverfahren wie AM erzeugt werden (B16, 46). Die Besonderheit des Personalisierungsumfangs muss für den Kunden jedenfalls erkennbar und relevant sein, damit es zu einer Kaufentscheidung kommt (B04, 14). Dies gilt besonders in preissensitiven Segmenten (B04, 12). Zudem sollte die Einbindung in den Designprozess für den Kunden aufwandsarm sein, um ihn nicht abzuschrecken (B04, 20). Bauteile, die bei Änderungen hohe Absicherungs- und Homologationsaufwände oder Werkzeugkosten haben, scheiden für Personalisierung aus (B04, 10; B06, 16; B08, 47; B12, 46; B16, 42; B11, 34). Zudem sollte, mit Blick auf den Fahrzeugrestwert, eine Austauschbarkeit der Komponenten nach Besitzerwechsel des Fahrzeugs möglich sein (B11, 42).

Einsatzfelder für Personalisierung sind sowohl Interieur-Designelemente (B03, 26; B04, 8; B09, 20; B11, 30; B12, 26; B15, 76; B16, 42), Halterungen für persönliche Gegenstände im Interieur (B03, 15; B08, 45; B16, 42) als auch Exterieur Designelemente und funktionale Bauteile im Sichtbereich wie Ladeklappen, Spoiler oder Schürzen (B01, 40; B03, 30; B04, 8; B08, 61; B15, 45; B16, 44). Für Experten im Luxussegment spielt zudem die Personalisierung von Lichtdesign eine Rolle (B15, 8; B16, 42). Personalisierung von Interieur und Exterieur Designelementen ist auch für Großkunden zum Kenntlichmachen von etwa Corporate-Identity denkbar (B03, 36;

B09, 20). Ein Potenzial wird zudem bei personalisierten Umfängen in Gebrauchtfahrzeugen festgestellt (B07, 96; B11, 51; B15, 92; B16, 69), auch wenn dies von manchen Experten aufgrund erhöhter Preissensibilität als kritisch erachtet wird (B06, 40; B12, 71).

Updates im Bereich Konnektivität

In Nordamerika und Asien entstehen neue innovationsstarke Wettbewerber mit „deutlich kürzere[n] Entwicklungszyklen“ (B06, 94), was zu einem Angebot führt, das für den Kunden „[...] attraktiv und zeitgemäß ist“ (B06, 104). Zudem sind asiatische Kunden tendenziell „[...] schnelllebiger, was [...] Technologie [...] angeht“ (B11, 4), „da passieren die innovativsten Sachen“ (B07, 41). Auch die Lebenszyklen in der Unterhaltungsindustrie beeinflussen zunehmend in allen Absatzmärkten die Fahrzeugindustrie (B06, 81). „[...] Gefühl nach einem Jahr, wenn ich das iPhone habe, denke ich mir schon, wann könnte ich das Neue haben. Und das überträgt sich auch ins Fahrzeug und da sind wir jetzt an einem Punkt, wo ich einen extremen Trend sehe“ (B07, 37). Zudem wechselt ein Kunde in Asien die Marke bei Nichterfüllen der Anforderungen an digitale Leistungen eher (B06, 92). Dies mag auch damit zusammenhängen, dass gerade in den oberen Segmenten das Durchschnittsalter der Kunden niedriger ist als in Europa (B07, 41; B11, 4; B16, 6). Regionsunabhängig gibt es auch in kleinen und mittleren Fahrzeugsegmenten eine Gruppe technologieaffiner Kunden, die besonderen Wert auf aktuelle Technik im Fahrzeug legt (B2, 8). Herausforderung bei der Integration neuer Umfänge im Laufe des Fahrzeuglebenszyklus stellen hohe Einmalaufwände (B15; 28) von Werkzeugen (B06, 85; B12, 55; B16, 6), der Erprobung (B06, 85; B07, 43) und der Softwareentwicklung (B06, 106) dar, weshalb Konnektivitätslösungen häufig unverändert bleiben (B01, 8; B03, 6; B06, 81). Zudem ist aufgrund von Baukastenlösungen eine Technologie im ungünstigsten Fall bereits bei Markteinführung eines Fahrzeugs nicht mehr State of the Art (B06, 81; B11, 4). Die Updatefähigkeit ist aufgrund des Einmalaufwands besonders bei Fahrzeugen mit niedrigerer Stückzahl schwer umzusetzen (B06, 83).

Im Zuge der Elektrifizierung wird das Passagierentertainment während des Ladevorgangs bedeutender (B03, 13). Darüber hinaus ist mit einer verstärkten Ausrichtung auf den Beifahrer (B01, 8), und je nach Markt und Segment auf Mitfahrer der hinteren Sitzreihen zu rechnen (B07, 47; B11, 6). Die Erwartungshaltung der Kunden wird sich im Bereich Infotainment

fortlaufend weiterentwickeln (B16, 36). Dies erfordert segmentübergreifend regelmäßige Updates von Infotainmentsystemen und Displays sowie damit einhergehende geometrische Veränderungen im Fahrzeug (B03, 11; B06, 90; B07, 43; B12, 55; B15, 30; B16, 8). Auch werden Lösungen benötigt, um jeweils aktuelle Smart Devices durch geometrisch angepasste Ablagen und Halterungen (B03, 15; B08, 10; B11, 14) und modernisierte Lade- und Schnittstellentechnologien (B03, 15; B08, 10; B11, 14) intelligent ins Fahrzeug zu integrieren (B08, 12; B11, 4). Zudem ist eine fortlaufende technologische Weiterentwicklung von Systemen zur Fahrzeug-Kundeninteraktion (V2I) zu erwarten (B01, 22). Aufgrund fortschreitender Entwicklungen von Audiosystemen und neuen Funktionen bei Entry Devices ist zudem die Relevanz damit verbundener Hardwareupdates in hochpreisigen Segmenten gegeben (B15, 11). Aufgrund der erhöhten Preissensibilität sowie der niedrigeren Erwartungshaltung ist das Potenzial von Updates im Bereich Konnektivität bei Gebrauchtwagenkunden begrenzt (B06, 111). Drittanbieter können hier flexibler agieren als ein OEM, da sie nicht an die Marke gebunden sind (B06, 23).

Updates im Bereich Elektrifizierung

Der Trend zu vollelektrischen Fahrzeugen ist segmentübergreifend erkennbar (B02, 27; B07, 3; B08, 16, B16, 17). Zum einen ist heute bei elektrischen Fahrzeugen eine „Reichweitenangst“ (B01, 32) verbreitet. Die Reichweite als Differenzierungsfaktor wird darüber hinaus andere Merkmale wie Beschleunigung und Gesamtleistung ablösen (B16, 17), weshalb fortlaufende Maßnahmen notwendig werden, diese im Lebenszyklus zu erhöhen. Dies kann etwa durch Updates von Zell-, Batterie- und Leistungselektronik (B07, 26; B08, 16; B15, 47; B16, 17) oder durch Verbesserungen von Aerodynamik und Rollwiderstand (B01, 32) umgesetzt werden. Eine weitere Möglichkeit, der Reichweitenangst zu begegnen, stellt die kontinuierliche Reduzierung der Ladezeit durch entsprechende Maßnahmen dar (B02, 27; B07, 3). Geometrische Änderungsflexibilität ist zudem dahingehend vorteilhaft, dass Standards von Steckern und Ladebuchsen regional voneinander abweichen und weitere Veränderungen derzeit noch nicht ausgeschlossen sind (B07, 9). Auch der Ladekomfort wird sich stetig weiterentwickeln müssen, um bei technologischen Fortschritten der Wettbewerber keine Kunden zu verlieren (B08, 16; B02, 9; B06, 100). Ein müheloser Ladevorgang erscheint

besonders im Luxussegment als unabdingbar, weshalb hier kontinuierliche Verbesserungen zwingend sind (B16, 22). Eine änderungsflexible Technologie kann also einen Beitrag leisten.

Für Updates im Lebenszyklus besteht die Herausforderung, die neuen Speicherkonzepte geometrisch in das Fahrzeug zu integrieren (B07, 28). Da Markt- und technologische Entwicklungen von vielen Faktoren wie der Regulatorik und der Steuerung durch Subventionen (B07, 5; B08, 30; B06, 59) abhängig sind, ist schwer vorherzusagen, welche technologischen Veränderungen innerhalb eines Produktlebenszyklus relevant werden. Daher scheint eine gewisse Änderungsflexibilität, in Hinblick auf später verbesserte Integrationsmöglichkeiten, vorteilhaft. Bei Gebrauchtfahrzeugen sind Updates im Bereich Elektrifizierung wie etwa bei der Batterie, aufgrund der hohen Kosten weniger relevant (B06, 75; B16, 24).

Updates im Bereich des automatisierten Fahrens

Während die Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme in Europa verstärkt auf Überlandfahrten ausgerichtet sind, ist in asiatischen Ländern eine Unterstützung im dichten städtischen Verkehr von größerer Bedeutung (B01, 52; B06, 115; B08, 34). In Nordamerika werden Mischformen erwartet (B06, 115; B08, 32). Dies resultiert in abweichenden Systemanforderungen, die zu unterschiedlichen Konzepten führen könnten, wie Hardwaremodule geometrisch ins Fahrzeug integriert werden (B01, 54). Befeuert durch innovationsstarke Wettbewerber sowie sich wandelnde regulatorische Anforderungen ist der Bedarf der kontinuierlichen Weiterentwicklung automatisierter Fahrfunktionen erheblich (B06, 113; B08, 32). Dies ist segmentübergreifend festzustellen (B07, 68; B12, 67). Aufgrund des erhöhten Kundenanspruchs besteht im Luxussegment zudem die Herausforderung, Fahrerassistenzfunktionen erst zu implementieren, wenn sie fehlerfrei funktionieren (B15, 62; B16, 28). Viele Hardwarekomponenten des automatisierten Fahrens sind sehr teuer (B08, 37), weshalb sie fahrzeugübergreifend entwickelt werden. Neben Konstruktionsaufwänden entstehen vor allem hohe Kosten in der Erprobung der Funktionen (B06, 127; B08, 37; B16, 32). Hinzu kommen Aufwände, die Komponenten in das jeweilige Fahrzeug zu integrieren (B06, 125; B16, 28). Ein Experte aus dem Luxussegment sieht demgegenüber eine geringe Zahlungsbereitschaft, für verbesserte Funktionalitäten einen Aufpreis zu bezahlen (B15, 64). Sind weiterentwickelte Sensoren und Radare im Baukasten verfügbar, wäre es wünschenswert,

diese kostengünstig während des Fahrzeuglebenszyklus zu integrieren (B01, 54; B15, 70). Dafür müssten geometrische Anbindungspunkte wie Halterungen flexibel gestaltet sein (B16, 28). Die Flexibilität wäre auch im Interieur von Vorteil, wenn aufgrund veränderter Funktionalität die Bedienbarkeit und Visualisierung der Fahrerassistenzsysteme weiterentwickelt würde. Beispiele wären eine veränderte Anordnung zentraler Bedienelemente (B07, 72). Die steigende Bedeutung des Fahrzeuginnenraums und der damit einhergehende Wunsch, Designelemente und „Visual User Interfaces“ in höherer Frequenz zu aktualisieren, wird erst bei einer nahezu autonomen Fortbewegung als relevant erachtet (B12, 67).

Fazit der Ergebnisse für die Arbeit

In den Bereichen Design, Konnektivität, Elektrifizierung und automatisiertes Fahren werden häufigere und umfangreichere Updates im Lebenszyklus erforderlich. Dies führt zu hohen Kosten, wenn Komponenten geometrisch angepasst werden müssen – gleiches gilt für den Wunsch nach Personalisierung. Somit müssen Bauteile, für welche Änderungsflexibilität im Lebenszyklus notwendig ist, möglichst frühzeitig identifiziert werden.

3.4 Zwischenfazit

Die Charakterisierung der additiven Verfahren (vgl. Abschnitt 2.1.4) deutet auf eine geometrische Änderungsflexibilität hin, die durch die notwendigen Nachbearbeitungsschritte (vgl. 2.1.3) wieder teilweise eingeschränkt wird. Die Produktentstehung ist von technischen Änderungen geprägt (vgl. 2.2.2 und 2.2.3), deren Ursachen zum Teil bereits in der Literatur beschrieben wurden (vgl. 2.2.4). Die negativen Auswirkungen werden in der Literatur durch lange Umsetzungsdauer, hohe Kosten sowie Verzögerungen von Prozessen ausgedrückt – Einflussgrößen darauf werden in bestehenden Werken andiskutiert (vgl. Abschnitt 2.2.5). Um in der Arbeit den Vorteil der Additiven Fertigung gezielt zu bewerten, musste in Abschnitt 2.2.2 eine eigene Definition für die betrachteten geometrischen Änderungen entwickelt werden. Für diese Änderungen fehlte bisher ein umfassendes Verständnis zum Auftreten, den Ursachen sowie den Auswirkungen, weshalb eigene Studien durchgeführt wurden.

Die erste in dieser Arbeit durchgeführte Studie basiert auf Sekundärdaten eines Änderungsmanagementsystems (vgl. Abschnitt 3.1). Es werden geometrische Änderungen von drei Fahrzeugen zwischen der Bestellung der ersten Werkzeuge und einem definierten Zeitpunkt nach Serienstart analysiert. Ein Großteil der Anträge wird zwischen dem Aufbau der ersten Erprobungsfahrzeuge und dem Serienstart gestellt. Geometrisch umfangreiche Änderungen finden zwar tendenziell in frühen Phasen statt, sind aber auch später noch ein relevanter Bestandteil der Produktentstehung. Es gibt Bereiche im Fahrzeug, die stärker von Änderungen betroffen sind und bei denen mehr Werkzeugänderungskosten anfallen. Mehr als die Hälfte der Änderungskosten entsteht in der Fertigung durch die Anpassung von Werkzeugen. Bei additiven Fertigungsverfahren fallen keine Werkzeugänderungskosten an, da kein Werkzeug benötigt wird (Feldhusen et al. 2013b, S. 94). Zudem entstehen Kosten in der Arbeitsvorbereitung. Inwieweit diese auch bei Änderungen von AM-Bauteilen entstehen, ist in dieser Arbeit zu überprüfen. Eine detailliertere Analyse der Werkzeugänderungskosten geänderter Bauteile zeigt, dass sich deren Höhe zwischen frühen und späten Phasen des PEP nicht unterscheidet. Bei dem analysierten Fahrzeug mit einer Stückzahl von weniger als 50.000 Einheiten im Lebenszyklus waren die Werkzeugänderungskosten signifikant geringer als bei den beiden Fahrzeugen mit einer höheren Stückzahl. Durch eine Änderungsursachenanalyse wurden mögliche Einflussgrößen auf das Auftreten von Änderungen erschlossen. Mit der zeitlichen Einordnung der Ursachen im PEP konnten zudem potenzielle Einflüsse auf den Änderungszeitpunkt identifiziert werden, da Ursachen wie Crashverhalten früher im PEP auftreten als bspw. Akustikprobleme offenbar werden.

Bei der Umsetzung einer Änderung ist neben den Kosten auch die Dauer relevant, vgl. Abschnitt 2.2.5. Die in Abschnitt 3.2 durchgeführte Expertenbefragung zeigt, dass bei Änderungen Zusatzeffekte entstehen, die bei einer kürzeren Dauer weniger stark ausgeprägt sind. Der Änderungszeitpunkt bestimmt dabei, welche Effekte entstehen. Vor Serienstart werden Änderungen mit langer Umsetzungsdauer zum Teil nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt, was die Produktreife und die Reife des Produktionsprozesses beeinflusst. Nach Serienstart führt eine schnelle Änderungsumsetzung dazu, dass mögliche

Vorproduktionskosten niedriger ausfallen, Gewährleistungskosten und Nacharbeitskosten früher vermieden werden und Produktkostenreduzierungen früher wirksam werden.

Änderungen nach Serienstart basieren auf einer Soll-Abweichung, ausgelöst von neuen Kundenanforderungen, Regulatorik und technischem Fortschritt (Conrat Niemerg 1997, S. 52; Schuh et al. 2021b, S. 229). Um festzustellen, welche Hardwarekomponenten davon in Zukunft verstärkt betroffen sein werden und daher mehr geometrische Änderungsflexibilität benötigen, wurden Experteninterviews mit Produktmanagern von drei Fahrzeugmarken durchgeführt, vgl. Abschnitt 3.3. Als Suchfelder für die Ideengenerierung wurden die in den Grundlagen recherchierten Haupttrends des Automobilbaus (vgl. Abschnitt 2.3) ausgewählt. Sowohl im Bereich Design, Konnektivität, Elektrifizierung als auch beim automatisierten Fahren werden häufigere und umfangreichere Updates von Software- und Hardwarekomponenten im Lebenszyklus erforderlich. Hohe Kosten durch die Anpassung und Integration von Bauteilen sind entsprechende Herausforderungen in der Umsetzung (vgl. Anhang 8). Neben dem Einsatz von AM bei Bauteilen, die im Fahrzeuglebenszyklus Updates benötigen, ist die geometrische Änderungsflexibilität auch bei Bauteilen vorteilhaft, die für Sondereditionen oder Personalisierung in Frage kommen (Anhang 9, Anhang 10). In Abbildung 3.12 sind die Hauptpunkte nochmal zusammengefasst.

Abschnitt 3.1	Abschnitt 3.2	Abschnitt 3.3
Studie 1. Änderungen im PEP <ul style="list-style-type: none"> • geometrische Änderungen im gesamten PEP relevant • nicht alle Bereiche im Fahrzeug gleich stark betroffen • Werkzeugänderungskosten haben größten Kostenanteil • Fahrzeugstückzahl beeinflusst Werkzeugänderungskosten • Änderungsursachenanalyse als Basis für Einflussgrößensuche zu Auftreten und Zeitpunkten von Änderungen 	Studie 2. Folgen einer langen Änderungsumsetzung im PEP <ul style="list-style-type: none"> • Dauer beeinflusst Ausmaß der negativen Zusatzeffekte • vor SOP: Änderung nicht zur nächsten Bauphase fertig • nach SOP: Kosten für Vorproduktion, Gewährleistungskosten, erhöhte Produktkosten, Nacharbeitskosten 	Studie 3. Änderungsbedarfe im Produktlebenszyklus <ul style="list-style-type: none"> • Geometrische Updates werden ausgelöst durch die Trends Design, Konnektivität, Elektrifizierung, autonomes Fahren • Sondereditionen • Personalisierung • Einsatzfelder für AM wurden je Trend identifiziert

Abbildung 3.12: Zusammenfassung der Studienergebnisse

4 Anforderungen an die Methode und Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel werden zunächst in Abschnitt 4.1 die Anforderungen an eine Methode zusammengefasst, die es ermöglichen soll, das Potenzial der Additiven Fertigung hinsichtlich der Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus zu bewerten, um dieses Potenzial bei der Entscheidung für die passende Serientechnologie eines Bauteils zu berücksichtigen. Die Anforderungen resultieren aus den Forschungsfragen und der Zielsetzung in Kapitel 1, den Grundlagen aus Kapitel 2 und den eigenen empirischen Untersuchungen zu Änderungen im PEP und Produktlebenszyklus aus Kapitel 3. Anschließend werden in Abschnitt 4.2 die für die Zielstellung der Methode relevantesten Ansätze aus dem Stand der Wissenschaft zu technischen Änderungen vorgestellt. In Abschnitt 4.3 werden diese Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen bewertet. Aus dieser Bewertung ergibt sich der Bedarf, eine neue Methode zu entwickeln, welche alle Anforderungen aus Abschnitt 4.1 erfüllt.

4.1 Anforderungen an die Methode

Die Anforderungen an die Methode sind in Abbildung 4.1 zusammengefasst und gliedern sich in vier Aspekte. Zunächst wird der Bewertungsgegenstand definiert (1). Für eine praxistaugliche Verwendung werden zudem Anforderungen an die Anwendung gestellt (2). Aus den Forschungsfragen ergeben sich ferner die notwendigen inhaltlichen Bestandteile (3). Um eine Akzeptanz der Methode zu gewährleisten, werden zudem Anforderungen an das Bewertungsergebnis aufgeführt (4).

Ziel der zu entwickelnden Methode ist es, das Potenzial der Additiven Fertigung hinsichtlich der Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus zu bewerten, um es bei der Entscheidung für die passende Serientechnologie eines Bauteils zu berücksichtigen. AM ist werkzeuglos und dadurch flexibel (Gebhardt 2016, S. 329–332; Eyers et al. 2018; Sarvankar et al. 2019). Derzeit

sind AM-Serienbauteile im Automobilbau noch nicht etabliert (Prakash et al. 2018; Sarvankar et al. 2019; BMW GROUP 2022). Daher verursachen Änderungen von Bauteilen, die mit werkzeuggestützten Technologien hergestellt werden, hohe Aufwände in der Produktentstehung. Dies zeigen Veröffentlichungen zu Änderungen im PEP (Conrat Niernerg 1997, S. 96; Terwiesch et al. 1999; Wasmer et al. 2011, S. 534; Reichwald et al. 2012, S. 37) sowie die eigenen, in Abschnitt 3.1 und 3.2 durchgeführten empirischen Untersuchungen zu geometrischen Änderungen im PEP. Experteninterviews mit Produktmanagern des Automobilbaus in Abschnitt 3.3 zeigen zudem die Relevanz geometrischer Änderungsflexibilität nach Serienstart, etwa bei Updates und Personalisierungen. Daraus resultiert, dass Bauteile in zukünftigen Serienfahrzeugen im Bereich Automotive (1.1), hinsichtlich geometrischer Änderungsflexibilität bewertet werden sollen (1.2).

<p>1. Bewertungsgegenstand</p>	<p>3. Notwendige inhaltliche Bestandteile</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">in der Produktentstehung Änderungen</p>	<p>4. Ergebnis</p>
<p>1.1 Automotive, Bauteile für Serienfahrzeuge → Zielstellung, Grundlagen</p>	<p>Zu FF1. Änderungsverhalten im PEP (werkzeuggebundenes Bauteil) 3.1 Auftreten u. Zeitpunkte im PEP, 3.2 fertigungsspezifische Kosten, 3.3 negative Zusatzeffekte sind bewertbar. → Zielstellung, Grundlagen, Studien</p>		<p>4.1 quantifizierbar → Zielstellung</p>
<p>1.2 geometrische Bauteiländerungen → Zielstellung, Grundlagen, Studien</p>	<p>Zu FF2. Änderungsflexibilität im PEP (AM-Version des Bauteils) 3.4 fertigungsspezifische Dauer und Kosten, 3.5 für unterschiedliche Änderungsarten, 3.6 für unterschiedliche Zeitpunkte im PEP sind bewertbar. → Zielstellung, Grundlagen, Studien</p>		<p>4.2 genauer als bisherige Methoden → Zielstellung</p>
<p>2. Anwendung</p>	<p>Zu FF3. Bedarf an Änderungsflexibilität im Lebenszyklus</p>		<p>4.3 nachvollziehbar → Zielstellung</p>
<p>2.1 mit dem Wissen vor Technologieentscheid → Grundlagen</p>	<p>3.7 Potenzial für Änderungsflexibilität bewertbar</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Upgrades, Editionen, Personalisierung</p>	
<p>2.2 Verarbeiten von Bewertungsunsicherheit → Grundlagen</p>	<p>3.8 Bauteile sind identifizierbar, Wirtschaftlichkeit ist bewertbar (werkzeuggebunden/ AM) → Zielstellung, Grundlagen, Studien</p>		
<p>2.3 Verwenden verfügbarer Daten → Grundlagen, Studien</p>			
<p>2.4 angemessener Bewertungsaufwand → Grundlagen</p>			

Abbildung 4.1: Anforderungen und Bewertungskriterien an die Methode

Weitere Anforderungen zielen auf die Anwendung der Methode ab. Bereits zu Beginn der Produktentstehung werden neue Fertigungsverfahren berücksichtigt, konkrete Fertigungskonzepte ausgearbeitet und erste Werkzeuge bestellt (Braess et al. 2013, S. 1147; Feldinger 2018, S. 9; Naunheimer et al. 2019b, S. 719). Ein Technologiewechsel auf AM nach erfolgten Investitionen in Werkzeuge ist als nicht effizient anzusehen. Daher muss die Methode zum Zeitpunkt vor Technologieentscheid eines Bauteils mit dem dann vorliegenden Wissen beziehungsweise den vorhandenen Daten anwendbar sein (2.1). Die damit verbundene Bewertungsunsicherheit muss bei der Anwendung verarbeitet werden können und sich letztlich im Bewertungsergebnis zeigen (2.2). Änderungen von Bauteilen, die mit werkzeuggebundenen Technologien hergestellt werden, sind heute aufgrund von Nachweispflichten in Datenbanken dokumentiert (Gausemeier 2006, S. 243–244; Köhler 2009, S. 64; Sharafi 2013; Wickel 2017, S. 30; Kratzer et al. 2022). Da AM-Bauteile in automobilen Serienanwendungen heute noch kaum eingesetzt werden (Sarvankar et al. 2019; BMW GROUP 2022), liegen hierfür keine Änderungsdaten vor. Daher soll die Methode verfügbare Daten werkzeuggebundener Bauteiländerungen nutzen und bei AM-Bauteiländerungen auf Expertenwissen zurückgreifen (2.3). Bei Bewertungsverfahren ist nach VAHS ET AL. ein angemessenes Aufwand/Nutzen-Verhältnis anzustreben (Vahs et al. 2015, S. 328). So soll durch Anwenden der Methode ein höherer Nutzen erreicht werden als Aufwand erzeugt wird (2.4). Besonders auf Seiten der werkzeuggebundenen Technologie soll der Bewertungsaufwand niedrig sein. Es ist davon auszugehen, dass die Motivation seitens Vertreter additiver Technologien höher ist, das Potenzial der Änderungsflexibilität bewertbar zu machen, um die Technologie verstärkt im Automobilbau zu etablieren. Daher kann der Bewertungsaufwand der Änderungsflexibilität von AM höher sein.

Die notwendigen inhaltlichen Bestandteile der Methode leiten sich aus den drei Unterforschungsfragen ab. Die erste Frage lautet: „Wie kann das Änderungsverhalten werkzeuggebundener Bauteile inklusive der dabei entstehenden Effekte im PEP a priori bewertet werden?“ In der in Abschnitt 3.1 durchgeführten Studie zu Änderungen im PEP zeigt sich, dass nicht alle Bereiche eines Fahrzeugs gleich viele Änderungen haben, und dass manche Änderungen früh und manche spät im PEP auftreten. Sowohl die Literatur (Wasmer et al.

2011, S. 534; Reichwald et al. 2012, S. 37) als auch die eigene Studie verweisen auf die signifikanten Änderungskosten im PEP und darauf, dass die fertigungsspezifischen Änderungskosten, die sich im Wesentlichen aus den Werkzeugänderungskosten und den Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung zusammensetzen, den größten Anteil daran ausmachen. Die Expertenbefragung in Abschnitt 3.2 zeigt zudem, dass, abhängig vom Zeitpunkt im PEP, durch eine lange Änderungsdauer weitere negative Zusatzeffekte entstehen. Für eine vollständige Beschreibung des Änderungsverhaltens eines werkzeuggebundenen Bauteils im PEP müssen daher Auftrittswahrscheinlichkeit und Zeitpunkte (3.1) sowie fertigungsspezifische Änderungskosten (3.2) und negative Zusatzeffekte, die durch Änderungen entstehen (3.3), prognostizierbar sein.

Forschungsfrage zwei lautet: „Wie kann die Änderungsflexibilität von additiv gefertigten Bauteilen a priori bewertet werden, und wie kann so der Einfluss, den die Wahl der Fertigungstechnologie auf Änderungen im PEP hat, beurteilt werden“. Änderungsflexibilität wird nach NIEMERG durch die notwendigen Kosten und die Zeitdauer für Anpassungen ausgedrückt (Conrat Niemerg 1997, S. 90). Eine Prognose der fertigungsspezifischen Änderungskosten einer additiven Bauteilversion ist notwendig, um sie den prognostizierten Änderungskosten der werkzeuggebundenen Version gegenüberstellen zu können. Die Höhe der negativen Zusatzeffekte einer Änderung hängt von der Änderungsdauer ab, wie die Expertenbefragung in Abschnitt 3.2 zeigt. Daher ist neben der Prognose der fertigungsspezifischen Änderungskosten auch eine Prognose der Änderungsdauer erforderlich (3.4). Dauer und Kosten sind abhängig von Umfang und Zeitpunkt einer Änderung (Fricke et al. 2000, S. 173; Li 2012, S. 55–56; Reichwald et al. 2012, S. 30; Gebhardt et al. 2018, S. 1–19; Hinojos A et al. 2020, S. 668). Um also die Änderungsflexibilität einer AM-Version der werkzeuggebundenen Version gegenüberzustellen, müssen Dauer und Kosten für unterschiedliche geometrische Änderungsarten (3.5) zu unterschiedlichen Zeitpunkten im PEP (3.6) prognostizierbar sein.

Die dritte Forschungsfrage lautet: „Wie kann beurteilt werden, bei welchen Bauteilen Änderungsflexibilität im Lebenszyklus nach Serienstart erforderlich ist und AM daher die passende Fertigungstechnologie darstellt?“ Die in Abschnitt 3.3 erwähnte Befragung von

Produktmanagern des Automobilbaus zeigt, dass auch nach Serienstart Bedarf an geometrischer Änderungsflexibilität besteht, und dass manche Bauteile dafür eher in Frage kommen als andere, etwa weil deren Updatefähigkeit oder Personalisierbarkeit eine Kundenanforderung adressiert. Daher soll mit der Methode auch das Potenzial von Änderungsflexibilität im Lebenszyklus nach Serienstart bewertet werden können (3.7). Es soll möglich sein, die entsprechenden Bauteile zu identifizieren und die Wirtschaftlichkeit der Umsetzung entsprechender Updates oder Personalisierungen bereits vor Entscheidung der Serientechnologie zu beurteilen (3.8).

Zuletzt werden Anforderungen an das Ergebnis formuliert. Für eine in der Praxis hilfreiche Entscheidungsunterstützung ist in Hinblick auf alle drei Forschungsfragen eine quantifizierte Ergebnisdarstellung erforderlich (4.1). Die Genauigkeit des Bewertungsergebnisses erhöht dessen Akzeptanz (Gebhardt 2018, S. 107). Daher soll das Ergebnis möglichst nahe an der Realität sein und weniger Abweichungen haben als bisher vorhandenen Methoden (4.2). In Fällen fehlender Realwerte zur Überprüfung der Bewertungsgenauigkeit sollen die Ergebnisse und Berechnungslogiken nachvollziehbar aufbereitet sein (4.3), um Akzeptanz bei den Anwendern sicherzustellen.

4.2 Bestehende Ansätze

Zunächst soll das Änderungsverhalten (Auftreten und Auswirkungen) eines werkzeuggebundenen Bauteils im PEP bewertbar sein (FF1). Zudem soll die Änderungsflexibilität (Auswirkungen) der AM-Version des Bauteils beurteilbar sein (FF2). Darüber hinaus soll es möglich sein, zu bewerten, für welche Bauteile aufgrund später im Lebenszyklus notwendiger Änderungsflexibilität AM die geeignete Fertigungstechnologie darstellt (FF3). Im Rahmen einer Literaturanalyse werden aus diesem Anlass Methoden identifiziert, die sich mit verwandten Problemstellungen und Zielsetzungen auseinandersetzen. In einer Literaturstudie gliedern HAMRAZ ET AL. die Forschung zu technischen Änderungen in Ansätze vor, während und nach einer Änderung sowie in generelle Studien und Veröffentlichungen (Hamraz et al. 2013a). Innerhalb dessen werden drei relevante Suchfelder (blau hervorgehoben) für diese

Dissertation identifiziert, die sich aus den drei Forschungsfragen und damit aus den Anforderungen zu den notwendigen inhaltlichen Bestandteilen der Arbeit ergeben (Abbildung 4.2).

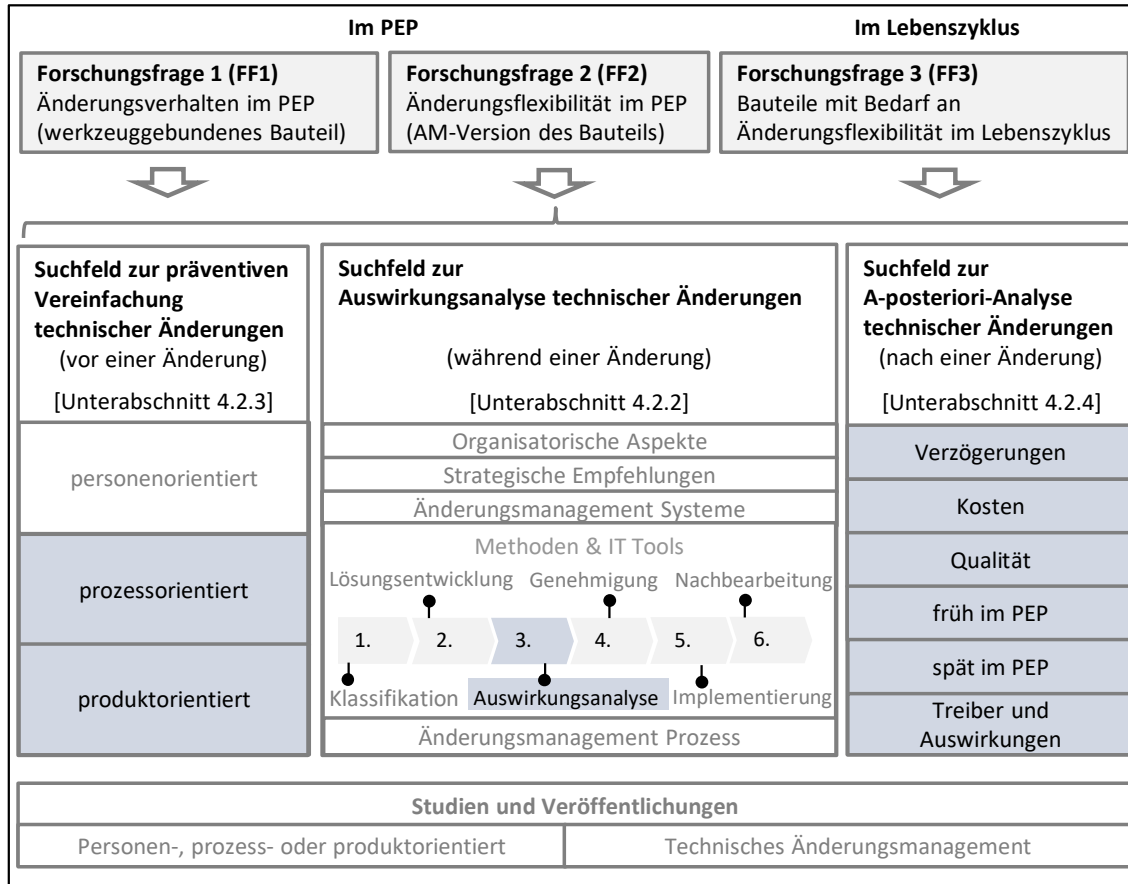


Abbildung 4.2: Suchfelder der Dissertation zu technischen Änderungen (in Anlehnung an Hamraz et al. 2013a)

Methoden, die während einer Änderung angewendet werden umfassen organisatorische Fragestellungen, strategische Richtlinien, die Gestaltung von Änderungsprozessen und Managementsystemen sowie die Entwicklung neuer Methoden (Hamraz et al. 2013a). Für die Dissertation sind besonders Methoden zur Auswirkungsanalyse technischer Änderungen relevant. Die Methoden verfolgen das Ziel, die Auswirkungen unterschiedlicher Änderungsalternativen zu prognostizieren, um die Alternative mit der geringsten Auswirkung auszuwählen (Hamraz et al. 2013a). Sie werden während einer Änderung angewendet und nicht frühzeitig mit einem Wissensstand vor Technologieentscheid. Da die Auswirkungen häufig quantifiziert werden, zeigen sie den Stand der Wissenschaft zur Bewertung der

Änderungsauswirkung in Bezug auf Zeit und Kosten auf. In Unterabschnitt 4.2.2 werden die für die Dissertation relevantesten Ansätze vorgestellt.

Unter den **Methoden, die angewandt werden, bevor Änderungen entstehen**, sind für diese Arbeit diejenigen relevant, **die präventiv der Vereinfachung technischer Änderungen dienen**. Die präventive Vereinfachung wird erreicht, indem die Methoden aufzeigen, wo im Produkt oder Produktionssystem häufig Änderungen mit hohen Auswirkungen auftreten (Hamraz et al. 2013a, S. 479). Aus diesen Erkenntnissen werden änderungsflexible Produktarchitekturen und Produktionssysteme gestaltet. Da die Methoden vor der endgültigen Ausgestaltung der Produktarchitektur bzw. des Produktionssystems angewandt werden, sind sie so konzipiert, dass sie weniger Wissen voraussetzen als Methoden, die während einer Änderung angewandt werden. Die relevantesten Methoden werden in Unterabschnitt 4.2.3 beschrieben.

Daneben existieren **Ansätze zur Analyse von Änderungen und deren Auswirkungen im Nachgang**, d.h. a posteriori. Forschung dazu existiert, bis auf einige Ausnahmen, seit etwa 15 Jahren, was auf den zunehmenden Einsatz von Workflow-Systemen im Änderungsmanagement zurückzuführen ist (Wickel 2017, S. 30). So werden durch deskriptive Analysen entweder Änderungsauswirkungen beschrieben (Sharafi 2013, S. 160) oder durch strukturelle Analysen Zusammenhänge erforscht, um die Erkenntnisse in neuen Entwicklungsprojekten zu nutzen (Wickel 2017, S. 30). Die Analyse historischer Daten unterstützt damit den Umgang mit zukünftigen Änderungen (Unterabschnitt 4.2.4).

Bestehende Literaturstudien zu technischen Änderungen von (WRIGHT 1997), (ROUIBAH ET AL. 2003) und (JARRATT ET AL. 2011) sind in der Studie von HAMRAZ ET AL. inkludiert, die den Stand der Wissenschaft bis zum Jahr 2011 umfasst. Literaturstudien von (ULLAH ET AL. 2016) und (TALE-YAZDI ET AL. 2019) erweitern den Zeitraum bis zum Jahr 2017. Über Vorwärtssuche (Referenz auf die genannten Publikationen) und stichwortbasierte Recherchen werden weitere Werke zu Engineering Change, Change Impact Analysis und Manufacturing Change bis zum Jahr 2021 identifiziert.

In Unterabschnitt 4.2.1 werden Methoden zur Analyse komplexer Systeme vorgestellt. Diese stellen kein weiteres Suchfeld dar, sondern sind die Basis für einige Ansätze innerhalb der

Suchfelder, weshalb deren Verständnis notwendig ist. In den Unterabschnitten 4.2.2 bis 4.2.4 werden sodann die relevantesten Ansätze zu den drei Suchfeldern aus dem Stand der Wissenschaft beschrieben.

4.2.1 Methoden zur Analyse komplexer Systeme

Technische Produkte sind von komplexen Interaktionen der einzelnen Bestandteile geprägt (Weber, 2005, S 1-5). Daher führt die Änderung eines Bauteils oder Systems häufig zu weiteren Änderungen, was unter dem Begriff Änderungsausbreitung bekannt ist (Eckert et al. 2001, S. 2). Um komplexe Systeme und deren Abhängigkeiten abzubilden, werden häufig Methoden der Strukturmodellierung verwendet (Wickel 2017, S. 31). Eine matrixbasierte Methode ist die erstmals von STEWARD erwähnte Design-Struktur-Matrix (DSM) (Steward 1981, S. 71). Eine DSM ist eine quadratische Matrix mit identischen Zeilen und Spaltenbeschriftungen. Damit werden Relationen zwischen Elementen einer Domäne dargestellt (Browning 2001, S. 292). Demgegenüber werden Domain-Mapping-Matrizen (DMMs) verwendet, um die Abhängigkeiten zwischen Elementen zweier unterschiedlicher Domänen darzustellen (Danilovic et al. 2005, S. 200). Eine Multiple-Domain-Matrix (MDM) ist eine große DSM, die DSMs innerhalb und DMMs zwischen unterschiedlichen Domänen zusammenfasst (Lindemann et al. 2007; Maurer 2007, S. 61). Die Zelleinträge sind entweder nicht-numerisch, und dann durch ein „x“ gekennzeichnet, oder numerisch, um die Stärke der Relation abzubilden (Eckert et al. 2004, S. 11; Lindemann et al. 2009, S. 51). In Abbildung 4.3 ist eine MDM dargestellt, welche die Relationen von Elementen zweier Domänen darstellt. Die Zelleinträge können Werte zwischen 0 und 1,0 annehmen.

Graphen können dieselbe Information wie Matrizen transportieren, ermöglichen aber ein intuitiveres Verständnis (Andrásfai 1991, 133 ff; Lindemann et al. 2009, S. 62). Die Knoten (V) repräsentieren die Elemente, während die Verbindungen dazwischen – Kanten (E) genannt – die Relationen beschreiben (Plehn 2017, S. 27). Haben die Kanten eines Graphen $G = (V,E)$ eine Richtung (vgl. Abbildung 4.3), d.h. einen Anfangs- und einen Endknoten, werden die Graphen als gerichtet oder als Diagraphen bezeichnet (Büsing 2010, S. 125).

Eine weitere Möglichkeit zur Modellierung komplexer Systeme ist Data Mining, um in großen Datenmengen signifikante Muster zu entdecken (Lindemann et al. 2009, S. 44–46). Zudem ist eine Analyse mit SysML möglich, einer auf UML 2 basierenden graphischen Modellierungssprache (Object Management Group 2021). Darüber hinaus liefert System Dynamics ein weiteres Werkzeug, Strukturen und Dynamiken komplexer Systeme zu analysieren (Sterman 2002; Grösser 2017).

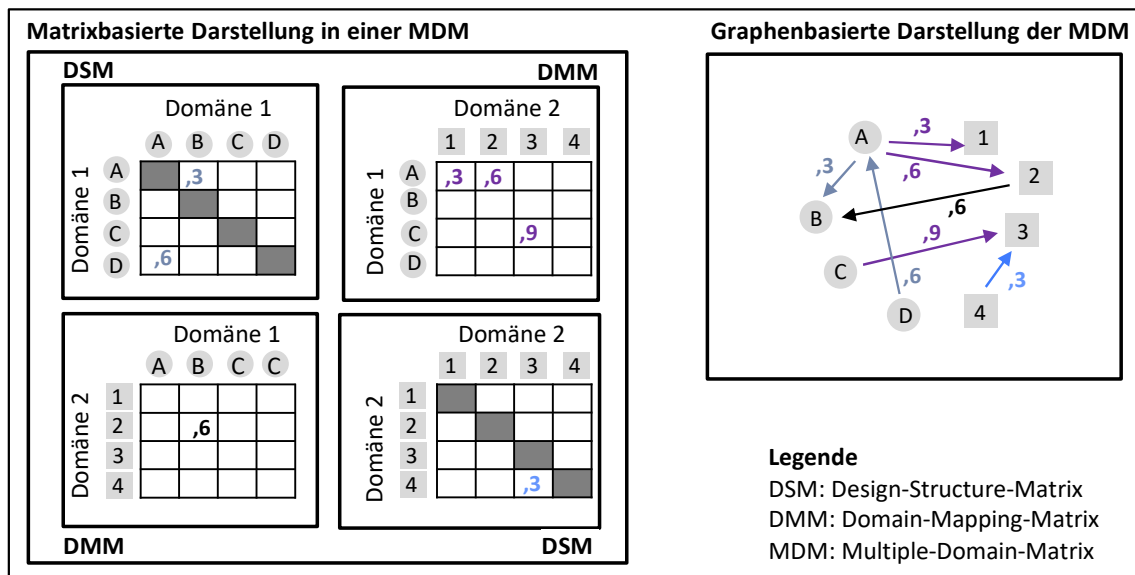


Abbildung 4.3: Matrix- und graphenbasierte Darstellung von DSMs, DMMs, MDMs (in Anlehnung an Lindemann et al. 2009, S. 85; Plehn et al. 2016)

4.2.2 Auswirkungsanalyse technischer Änderungen

Der Unterabschnitt behandelt die hinsichtlich der gestellten Anforderungen relevantesten Methoden zur Auswirkungsanalyse technischer Änderungen. Diese sind thematisch wiederum in sechs Bereiche untergliedert, um das gesamte Suchfeld zu erschließen. Die Analyse der Ausbreitung von Änderungen innerhalb der Produktstruktur ist ein zentraler Forschungsschwerpunkt innerhalb der Analyse technischer Änderungen (Hamraz et al. 2013a; Ullah et al. 2016). Sie bildet die Basis weiterer Ansätze und wird daher zu Beginn vorgestellt. Anschließend wird ein Ansatz vorgestellt, der den Änderungsaufwand und das Marktpotenzial

unterschiedlicher Änderungsoptionen berücksichtigt, um eine Option auszuwählen. Der Ansatz ist für die Identifikation von Änderungsbedarfen im Produktlebenszyklus (FF3) von Interesse. Da mithilfe der Methode auch die Prognose der Änderungsdauer ermöglicht werden soll, werden dazu die relevantesten Ansätze aus dem Stand der Wissenschaft beschrieben. Ein Großteil der Ansätze aus dem Bereich der Änderungsauswirkung umfasst die Produktstruktur (vgl. Hamraz et al. 2013a). Da die Arbeit im Kern jedoch die Änderungsflexibilität von Fertigungstechnologien bewertet, werden auch explizit Ansätze zur Bewertung der Änderungsauswirkung im Bereich der Produktion beschrieben. Eine Anforderung bei der Anwendung der Methode ist das Verarbeiten von Bewertungsunsicherheit. Es existieren in der Literatur bereits Ansätze, die Unsicherheit in der Prognose von Änderungsauswirkungen berücksichtigen. Diese werden im Unterabschnitt ebenfalls erläutert. Ein Großteil der Ansätze zur Bewertung von Änderungsauswirkung ist matrixbasiert – es sind jedoch auch alternative Ansätze vorhanden. Die dabei relevantesten werden am Ende des Unterabschnitts beschrieben.

Auswirkungsanalyse im Rahmen von Änderungsausbreitung innerhalb der Produktstruktur

Die Change Prediction Method (CPM) nach CLARKSON ET AL. stellt eine der am weitesten verbreiteten Ansätze zur Analyse von Änderungsausbreitung dar (Hamraz et al. 2013a, S. 488) (vgl. Abbildung 4.4). Dabei wird ein Produkt zunächst in Sub-Komponenten unterteilt. Da die nachfolgende Datensammlung manuell stattfindet, werden zur Aufwandsreduktion weniger als 50 Sub-Komponenten empfohlen. Anschließend wird über Expertenschätzungen eine DSM für die direkte Wahrscheinlichkeit erstellt. Diese enthält alle Sub-Komponenten und pro Zelle die Wahrscheinlichkeit, dass die Änderung einer Sub-Komponente A zur Änderung einer Sub-Komponente B führt. In einer zweiten DSM wird erfasst, zu welchem Anteil sich das Design der Sub-Komponente B bei einer Änderung von A ändert. Diese DSM repräsentiert somit die direkte Auswirkungsstärke. Da die Änderung einer Sub-Komponente A mit einer von den Experten definierten Wahrscheinlichkeit zu einer Folgeänderung von B führt (direkte Wahrscheinlichkeit) und diese wiederum zu einer Folgeänderung von C (indirekte Wahrscheinlichkeit), werden durch den CPM-Algorithmus aus der Wahrscheinlichkeits-DSM alle direkten und indirekten Pfade berechnet, mit der ausgehend von einer initialen Änderung

weitere Sub-Komponenten betroffen sind. Es wird ein Brute-Force-Search Algorithmus angewandt, der alle Pfade durchsucht (Hamraz et al. 2013b, S. 187). Daraus errechnet sich für jede Sub-Komponente eine kumulierte Wahrscheinlichkeit, von der Änderung betroffen zu sein, die in einer „Kumulierten-Wahrscheinlichkeits-DSM“ abgespeichert wird. Anschließend wird über die Multiplikation von Wahrscheinlichkeiten und Auswirkungsstärken aller potenziell möglichen Ausbreitungspfade das kumulierte Änderungsrisiko für jede Sub-Komponente berechnet ($\text{Risiko} = \text{Wahrscheinlichkeit} \times \text{Auswirkungsstärke}$). Durch Division des Risikos durch die kumulierte Wahrscheinlichkeit ergibt sich für jede Sub-Komponente die „prognostizierte kumulierte Auswirkung der Änderung“. Auswirkungsstärke und Wahrscheinlichkeit werden in einer Produkt-Risiko-Matrix“ visualisiert, um zu zeigen, welche Sub-Komponenten das größte Änderungsrisiko haben. So kann bei einer Änderung die Option mit der geringsten Auswirkung gewählt werden. (Clarkson et al. 2004)

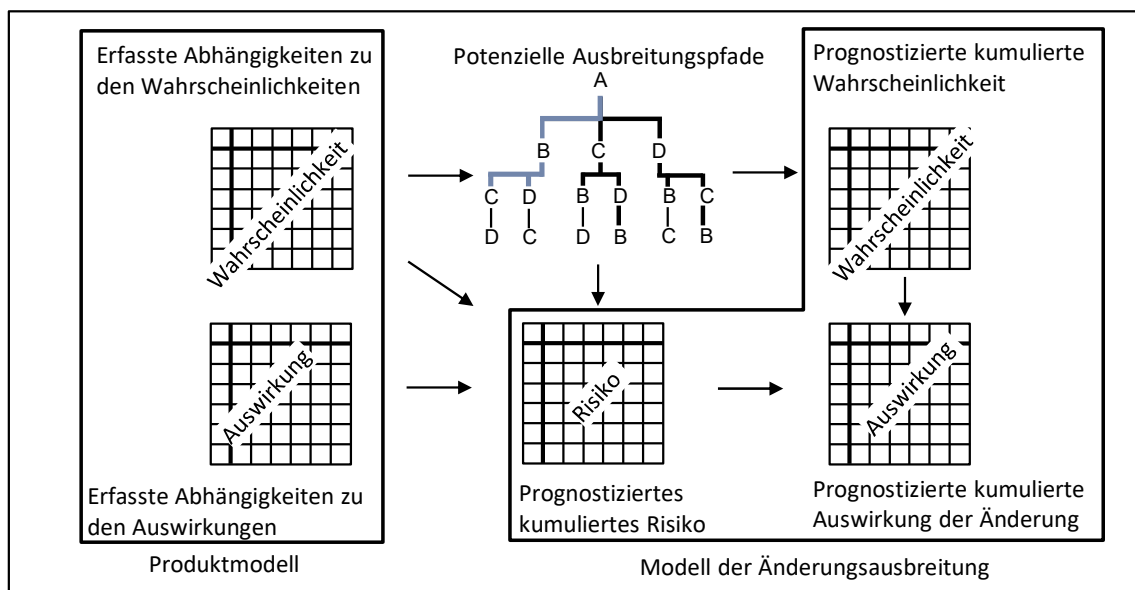


Abbildung 4.4: Change Prediction Method (in Anlehnung an Clarkson et al. 2004)

Den Anforderungen der Dissertation wird mit der Methode nicht hinreichend begegnet. Die Abbildung der Fahrzeugstruktur auf Bauteilebene ist aufgrund des expertenbasierten Ansatzes zu aufwändig und die Unsicherheit der Expertenschätzung zeigt sich nicht im Ergebnis. Außerdem wird die Gesamtauswirkung zwar quantitativ als relativer Wert angegeben, aber nicht in Kosten oder Dauer umgerechnet. Zudem werden nur

Folgeänderungen prognostiziert, wenn eine initiale Änderung bekannt ist. Zudem müssten bei einer Veränderung der Fahrzeugstruktur die Abhängigkeiten neu erfasst werden, was einen hohen Aufwand erzeugt. Aus diesem Grund ist es weder geeignet, das Bauteiländerungsverhalten im PEP zu prognostizieren (FF1) oder die AM-Änderungsflexibilität zu bewerten (FF2), noch um zu beurteilen, welche Bauteile im Lebenszyklus Änderungsflexibilität benötigen (FF3). Dennoch bildet sie die Grundlage für viele weitere Methoden, die Änderungen bewerten. Beispielsweise nutzt die FBS-Linkage-Methode den CPM-Ansatz und erweitert die strukturellen Abhängigkeiten (S) um das Verhalten (Behavior) und die funktionalen (Functions) Abhängigkeiten zwischen Sub-Komponenten. Eine umfassendere Darstellung weiterer Methoden, die den CPM-Ansatz verwenden, ist bei (Plehn 2017, S. 60–61) zu finden. Da die Ansätze für die Arbeit inhaltlich keinen Mehrwert darstellen, werden sie nicht näher beschrieben. Darüber hinaus gibt es, etwa mit dem Ansatz von ULLAH ET AL., weitere matrixbasierte Ansätze, um innerhalb einer Produktstruktur die Kosten von Lösungsalternativen unter Berücksichtigung aller Änderungsausbreitungspfade zu berechnen (Ullah et al. 2017). Auch wenn sich die Methoden im Detail unterscheiden, erfordern sie meist manuellen Aufwand bei der Abbildung komplexer Systeme, behandeln die Unsicherheit der Expertenschätzung nicht und berechnen die Auswirkung nur, wenn eine initiale Änderung vorliegt. Dies gilt auch für die nachfolgend beschriebene Methode. Diese enthält jedoch einen möglicherweise hilfreichen Lösungsansatz, um Bauteile zu identifizieren, die im Lebenszyklus Änderungsflexibilität benötigen (FF3).

Berücksichtigung von Aufwand und Marktpotenzial unterschiedlicher Änderungsoptionen

BELT ET AL. wollen mit ihrer Methode unter Berücksichtigung des Änderungsaufwands und des Marktpotenzials die Entscheidung zwischen mehreren Optionen einer Produktmodifikation unterstützen. Um den Bewertungsaufwand zu reduzieren, wird jeweils das vom Subsystem ausgehende sowie das auf das Subsystem einwirkende Änderungsrisiko aufgezeigt. Nur für Subsysteme mit niedrigem Risiko werden dann Optionen für Produktmodifikationen entwickelt und der jeweils erforderliche Änderungsaufwand prognostiziert. Dafür werden von Experten für jede Option die direkten Änderungswahrscheinlichkeiten und Auswirkungsstärken zwischen einzelnen Komponenten eingeschätzt. Über den CPM-

Algorithmus werden dann jeweils die geschätzten Gesamtkosten der Änderungsoption berechnet. Anschließend wird ein von BEN-AKTIVA ET AL. entwickeltes diskretes Entscheidungsexperiment (DCA = discrete choice analysis) angewandt (Ben-Akiva et al. 1985), bei dem potenzielle Kundengruppen nach deren Präferenz zwischen dem bestehenden Basisprodukt, den modifizierten Produktoptionen und den Wettbewerbsprodukten entscheiden müssen. Daraus wird dann eine Veränderung des MSPs (Market share of preference) berechnet, der eine Aussage darüber macht, inwieweit Marktanteile von bereits zuvor angebotenen Produkten sowie Wettbewerbsprodukten auf eine modifizierte Produktoption umgeleitet würden. Im Anschluss werden die Optionen anhand der Änderungskosten und des vom Wettbewerb erlangten Marktanteils in eine Matrix eingetragen und die Option mit dem besten Trade-off ausgewählt. (Belt et al. 2015) In Hinblick auf FF3 wäre damit sowohl das Änderungsflexibilitätspotenzial als auch der Aufwand für unterschiedliche Optionen bewertbar. Dadurch, dass für jede Änderungsoption die Änderungswahrscheinlichkeit und Auswirkungsstärke zwischen den Komponenten neu eingeschätzt werden muss, ist das Ergebnis genau – die Methode aber sehr aufwändig. Bei der Anwendung des Entscheidungsexperiments (DCA) wird die Verteilung von Marktanteilen berücksichtigt. Beides erfordert einen Wissensstand, der zur initialen Technologieentscheidung eines Serienbauteils noch nicht verfügbar ist, da spätere Produktmodifikationen im Lebenszyklus, etwa Updates, noch zu weit in der Zukunft liegen. Bis zur tatsächlichen Modifikation könnten sich Abhängigkeiten zwischen Komponenten in der Produktstruktur verändern und Marktanteile verschieben. Beides würde die genaue, aber aufwändige Erfassung nicht rechtfertigen. Daher ist die Methode **für die Anwendung in dieser Dissertation nicht geeignet.**

Prognose der Änderungsdauer

Forschung zur Änderungsdauer behandelt überwiegend die Prognose der Dauer entlang des gesamten Änderungsausbreitungspfades aller betroffenen Sub-Komponenten (Smith et al. 1997; Wynn et al. 2014; Rebentisch et al. 2016; Ullah et al. 2017; Yin et al. 2017; Ullah et al. 2018). Zur Beantwortung der Forschungsfragen 1 und 2 ist aber eine Prognose der fertigungs-

spezifischen Änderungsdauer eines einzelnen Bauteils erforderlich. Stellvertretend wird daher der Ansatz vorgestellt, der dem beschriebenen Ziel am nächsten kommt.

Wie erwähnt, können Matrizen auch durch Graphen oder Netzwerke dargestellt werden. Diese Tatsache machen sich YEASIN ET AL. zu Nutze, indem sie einen dynamischen bayesschen Netzwerkansatz (DBN) wählen, um die Dauer einer Änderung entlang aller Ausbreitungspfade innerhalb der Produktstruktur abzuschätzen. Ein bayessches Netz ist ein gerichteter azyklischer Graph (DAG) zur Abbildung statistischer Abhängigkeiten zwischen Elementen. Zuerst werden aus historischen Änderungsdaten eine Wahrscheinlichkeits- sowie eine Auswirkungs-DSM erstellt. Über den DBN-Ansatz werden dann, als Alternative zur CPM-Methode, die möglichen Ausbreitungspfade inklusive des Ausbreitungsrisikos prognostiziert. Die Änderungsdauer wird berechnet, indem die Änderungswahrscheinlichkeiten und Auswirkungsstärken entlang eines Ausbreitungspfades mit der Dauer für ein vollständiges Redesign der im Pfad betroffenen Komponenten multipliziert werden. (Yeasin et al. 2020) Mit dem Ansatz kann, im Gegensatz zur CPM-Methode, modelliert werden, dass aus einer Änderung zwei parallel abzuarbeitende Änderungen folgen. Dadurch, dass nicht nur eine sequenzielle Abfolge, sondern auch parallele Prozesse berücksichtigt werden, kann eine praxisnähere Prognose der Änderungsdauer erfolgen. Die Berücksichtigung von Parallelisierung erfolgt auch in einem matrixbasierten Ansatz von YIN ET AL. (YIN ET AL. 2017). **Für die in dieser Dissertation vorliegende Aufgabenstellung sind beide Ansätze nur bedingt anwendbar.** Zunächst sind sie für die Berechnung der Dauer einer Änderungsausbreitung innerhalb der Produktstruktur konzipiert und nicht für die Prognose der fertigungsspezifischen Änderungsdauer eines Bauteils. Zudem sind als Input spezifische Werte erforderlich — ein Experte müsste je Prozess einen Einzelwert für die Dauer angeben. Die Unsicherheit zum Bewertungszeitpunkt wird damit nicht angemessen in der Prognose berücksichtigt. Die Verwendung eines DAGs zur Prognose der Änderungsdauer erscheint für die eigene Methodenentwicklung dennoch brauchbar, um die Parallelisierung einzelner Änderungsschritte abzubilden.

Bewertung der Auswirkungen technischer Änderungen im Bereich der Produktion

Die Auswirkungen technischer Änderungen werden auch im Bereich der Produktion erforscht. Dort umfassen technische Änderungen das Rekonfigurieren, Hinzufügen, Ersetzen oder Entfernen von Komponenten eines Produktionssystems sowie die Veränderung der Beziehungen zwischen diesen Elementen (Malak et al. 2013).

AURICH ET AL. modellieren die Eigenschaften der Komponenten eines Produktionssystems sowie deren Beziehungen zueinander über UML und stellen sie via Virtual Reality dar. Bei einer Änderung werden dadurch betroffene Komponenten identifiziert, in einer Auswirkungsstärkematrix abgebildet und es wird eine Ähnlichkeitsmatrix abgeleitet. Änderungen, die sich sehr ähnlich sind, sollen daraufhin gebündelt umgesetzt werden. (Aurich et al. 2007)

MALAK ET AL. entwickeln einen datenbasierten Ansatz, bei dem ausgehend von der Art der Änderung eine Analyse der Änderungsauswirkungen angestoßen wird. Dabei werden die Auswirkungen auf Layout und die Prozesskette, sowie mögliche Konflikte und kritische Abhängigkeiten zwischen Komponenten analysiert. Basierend auf einer historischen Datenbasis werden dann Umsetzungsprojektpläne erzeugt. Diese enthalten Änderungsaufgaben mit Dauer und Kosten – wie diese prognostiziert werden, lassen die Autoren offen. (Malak et al. 2013)

In Hinblick auf die Aufgabenstellung sind beide Ansätze für eine Bewertung fertigungsspezifischer Änderungsaufwände **nicht zielführend**. Es werden die Änderungen innerhalb der Produktion analysiert – Relationen zwischen einer geometrischen Bauteiländerung und einer resultierenden Änderung von Komponenten in der Produktion werden nicht beschrieben. Andere Ansätze zur Analyse der Änderungsauswirkung in der Produktion werden nicht näher betrachtet, wenn sie keine detaillierte Prognose von Änderungskosten oder -dauer bereitstellen (Kröger et al. 2019; Bauer et al. 2020; Schuh et al. 2021a; Sippl et al. 2021).

Berücksichtigung von Unsicherheit in der Prognose der Änderungsauswirkung

PLEHN entwickelte eine Methode, mit der die fertigungsspezifischen Auswirkungen von Änderungsoptionen hinsichtlich Kosten und Änderungszeit in Arbeitsstunden beurteilt

werden, um die Option mit der geringsten Auswirkung auszuwählen. Hierfür werden in Expertenworkshops die relevanten Komponenten identifiziert und eine MDM aufgebaut, welche alle Komponenten und relevanten Beziehungen zwischen diesen enthält. Dann erfolgt für jede Änderungsaktivität (zwischen zwei Komponenten) eine Experteneinschätzung zu Kosten und Zeitdauer für die Umsetzung. Um der Unsicherheit der Experteneinschätzung zu begegnen, wird jeweils ein minimaler, maximaler und wahrscheinlichster Wert geschätzt und daraus über die PERT-Methode eine Beta-Verteilung gebildet (Malcolm 1959). Näheres hierzu in Abschnitt 5.2.3. Anschließend werden Änderungskosten und Arbeitszeit berechnet. Dabei wird der von MOORE entwickelte Breadth-First-Search-Algorithmus verwendet, der jeweils alle direkt angrenzenden Knoten (unmittelbar von der Änderung betroffene Komponenten) ansteuert, bevor er bei der Simulation der Änderungsausbreitung die Knoten der nächsten Ebene berücksichtigt (MOORE 1959). Da die Wahrscheinlichkeiten für eine Änderungsausbreitung von einer Komponente zu einer anderen probabilistisch sind und auch die Zeiten und Kosten geschätzt werden, wird eine MC-Simulation durchgeführt. Dabei wird eine Zufallszahl erzeugt, die in Kombination mit der Wahrscheinlichkeit einer Änderungsausbreitung bestimmt, ob eine Änderung zur Anpassung einer angrenzenden Komponente führt. Eine weitere Zufallszahl bestimmt die Kosten und Zeitdauer entlang der zuvor erzeugten Beta-Verteilung. Dadurch, dass die Simulation mehrmals (etwa 10.000-mal) wiederholt wird, kann eine Verteilung der Änderungskosten sowie der Arbeitszeit approximiert und in einem Histogramm dargestellt werden. (Plehn 2017) Breadth-First-Search-Algorithmen (Ullah et al. 2018) sowie MC-Simulationen (Rebentisch et al. 2017) werden auch von anderen Autoren zur Berechnung der Änderungsauswirkung verwendet. **Für diese Dissertation liefert der Ansatz eine wichtige Basis**, da ein Weg gefunden wurde, mit Bewertungsunsicherheiten umzugehen und fertigungsspezifische Änderungskosten zu berechnen. Da der Aufwand der Anwendung aufgrund der Expertenschätzungen hoch ist, erscheint sie nur für die Bewertung der AM-Änderungsflexibilität (FF2) geeignet, da die Motivation bei Vertretern der AM-Technologie höher ist, Transparenz zur vorhandenen Änderungsflexibilität bereitzustellen. Zudem sind bei AM kaum historische Daten verfügbar. Dennoch **wird die Methode nicht allen Anforderungen gerecht**. So ist zwar eine Prognose der

kumulierten Änderungszeit möglich, nicht aber der Dauer. Diese ist kürzer als die von PLEHN prognostizierte kumulierte Änderungszeit, wenn Änderungsschritte parallel ablaufen. Zudem ist keine aufwandsarme Prognose der Änderungsauswirkungen, abhängig vom Änderungszeitpunkt im PEP, möglich. Außerdem ermöglicht die Methode keine vom Zeitpunkt abhängige Prognose der Änderungsauswirkung und es werden nur Komponentenänderungen innerhalb des Produktionssystems modelliert. Relationen zwischen Änderungsmerkmalen eines Bauteils und dem entsprechenden Produktionssystem werden nicht explizit abgebildet.

KRATZER ET AL. greifen den Ansatz von PLEHN auf. Die MDMs werden durch eine DSM, welche alle Änderungsmerkmale eines Bauteils und deren Beziehungen untereinander abbildet, sowie durch eine DMM, die Beziehungen zwischen Änderungsmerkmalen und Arbeitsvorbereitungsschritten beschreibt, ersetzt. Die Arbeitsvorbereitungsschritte werden zeitlich in den PEP eingeordnet. Damit ist für ein Bauteil die Prognose der fertigungsspezifischen Änderungskosten zu unterschiedlichen Zeitpunkten im PEP möglich. Eine Prognose der Dauer wird zwar als wünschenswert erwähnt, es erfolgt jedoch keine Beschreibung der Funktionsweise einer solchen Prognose. (Kratzer et al. 2021b)

Alternativen zu matrixbasierten Bewertungsansätzen

MEHTA nutzt historische Änderungsdaten, um über die Berechnung von Ähnlichkeitsmaßen die Auswirkung einer anstehenden Änderung zu prognostizieren. Dafür sind Bauteileigenschaften (etwa die Geometrie) und Informationen über die Beziehungen zwischen den einzelnen Eigenschaften erforderlich. Bauteileigenschaften und historische Änderungen können dann mit empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Auswirkungen verknüpft werden. Für die Methode müssen die Bauteile im STEP-Format vorliegen. (Mehta 2010) **Für die Dissertation ist der Ansatz nicht anwendbar.** Das finale Geometriemodell des Bauteils liegt zum Technologieentscheid noch nicht vor. Außerdem ist der Aufbau der Datenbasis mit STEP-Modellen aller Bauteile zu aufwändig.

In seiner Dissertation entwickelt **GEBHARDT** ein achtstufiges Verfahren, um vor der Durchführung einer Änderung die indirekten Änderungskosten zu prognostizieren. Indirekte Änderungskosten definiert er als Kosten, die in indirekten und sekundären Leistungsbereichen wie der Entwicklung, Arbeitsvorbereitung, Qualitätssicherung, dem Einkauf, Vertrieb,

Produktcontrolling oder dem Kundenservice entstehen. Zuerst wird der Prognosegegenstand definiert, anschließend werden ein Erklärungsmodell entwickelt, die Variablen operationalisiert, Daten erhoben und das Erklärungsmodell empirisch überprüft. Es werden signifikante Zusammenhänge zwischen der Komplexität, Neuheit und Schwierigkeit der Änderungsaufgabe und den indirekten Änderungskosten nachgewiesen. Das Erklärungsmodell basiert auf Strukturgleichungsmodellen und wird in ein kausalanalytisches Prognosemodell überführt. Nach Parametrierung der Prognosefunktionen wird das Prognoseergebnis in einem letzten Schritt mit alternativen Verfahren verglichen. Für jeden indirekten Bereich werden partielle Prognosemodelle erstellt, sodass die Gesamtänderungskosten über die Summe der einzelnen Partialmodelle berechnet werden. Verglichen mit experten- und matrixbasierten Methoden ist der Aufwand zur Erstellung des Prognosemodells geringer. Dies wird dadurch erreicht, dass empirisch signifikante Zusammenhänge einmalig identifiziert und fortan für Prognosen verwendet werden können. (Gebhardt 2018) Bei der A-priori-Bewertung des Änderungsverhalten von Bauteilen im PEP (FF1) erscheint ein kausalanalytischer Ansatz sinnvoll. **Das Erklärungsmodell ist für die Dissertation jedoch nicht hilfreich.** Werkzeugänderungskosten, die einen wesentlichen Bestandteil fertigungsspezifischer Änderungskosten darstellen, bleiben unberücksichtigt. Das Ergebnis ist eine Punktschätzung, die die Unsicherheit der Prognose nicht widerspiegelt. Außerdem berücksichtigt es zwar Informationen, die zum Änderungszeitpunkt vorliegen (z.B. die Änderungskomplexität), nicht aber zum Zeitpunkt der Technologieentscheidung.

4.2.3 Ansätze zur präventiven Vereinfachung technischer Systeme

Mithilfe von Methoden zur präventiven Vereinfachung technischer Änderungen werden Systeme, anders als Methoden zur Auswirkungsanalyse einer konkreten Änderung, bereits bei deren Entwurf auf Änderungsflexibilität untersucht, um sie gezielt widerstandsfähiger zu gestalten (Schulz et al. 1999; Koh et al. 2013; Kernschmidt et al. 2014; Schrieverhoff P. et al. 2014; Olmez 2021).

KOH ET AL. analysieren die Änderungsflexibilität eines Systems durch einen CPM-basierten Ansatz. Zunächst wird das System gedanklich in einzelne Komponenten zerlegt. Dann wird von Experten für jede Komponente die Wahrscheinlichkeit eingeschätzt, dass diese etwa aufgrund neuer Anforderungen geändert wird. Auch die initiale Auswirkungsstärke wird als Schätzwert angegeben. Zudem werden für alle Verbindungen zwischen den Komponenten jeweils Wahrscheinlichkeit und Auswirkungsstärke einer Änderungsausbreitung bestimmt. Durch Berücksichtigung von initialer Wahrscheinlichkeit und Auswirkungsstärke sowie der Änderungsausbreitung können für jede Komponente die kumulierten Änderungswahrscheinlichkeiten, Auswirkungsstärken und Änderungsrisiken kalkuliert werden. Ob und in welcher Stärke bei einem Bauteil initial Änderungen auftreten, wird von Experten eingeschätzt. Eine tatsächliche Prognose erfolgt nicht. (Koh et al. 2013) Aufgrund der starken Experteneinbindung ist der Bewertungsaufwand hoch. Damit ist sie für die Bewertung des Änderungsverhaltens einer werkzeuggebundenen sowie einer AM-Version ungeeignet (FF1 und FF2). Zudem werden die Aufwände nicht quantifiziert, d.h. in Form von Kosten oder Dauer ausgedrückt. **Der Ansatz ist daher auf keine der drei Fragestellungen anwendbar.**

OLMEZ greift in seiner Dissertation die Methode von KOH ET AL. auf. Er kombiniert in seinem Ansatz (SCM = System Change Method) die Erfassung mehrschichtiger Netzwerke (MLN) über MDM-Matrizen nach LINDEMANN ET AL. mit dem CPM-Algorithmus nach CLARKSON ET AL. (CLARKSON ET AL. 2004; LINDEMANN ET AL. 2007). Dadurch wird die Resilienz eines Produktionssystems gegenüber Änderungen beurteilt, um Schwachstellen zu identifizieren und widerstandsfähigere Produktionssysteme zu entwerfen. Die Anforderungen, das Produkt, der Produktionsprozess und die Organisation repräsentieren Ebenen, die mehrere Elemente beinhalten. Die Abhängigkeiten der Elemente einer Ebene werden über DSMs dargestellt – die Abhängigkeit zwischen Elementen unterschiedlicher Ebenen über DMMs. Dies erfolgt über eine Expertenschätzung von Änderungswahrscheinlichkeit und Auswirkungsstärke in jeder Matrixzelle. Über dem CPM-Algorithmus wird das direkte sowie das durch Änderungsausbreitung verursachte indirekte Änderungsrisiko berechnet. In der Folge kann für jedes Element visualisiert werden, welche zu diesem Element in Abhängigkeit stehenden Elemente ein besonders hohes Risiko haben, das Element zu beeinflussen. Diese sollen

widerstandsfähiger gegenüber Änderungen gestaltet werden, um eine Ausbreitung auf andere Elemente zu verhindern. (Olmez 2021) Durch die Methode ist eine Transparenz zur Änderungsflexibilität eines Fertigungssystems möglich. Der Ansatz ist **für die Dissertation nicht relevant**, da die Änderungsflexibilität nicht in Kosten und Dauer ausgedrückt wird. Damit ist sie als Unterstützung für eine Technologieentscheidung ungeeignet.

In ihrer Dissertation entwirft **WICKEL** eine Methode, um die änderungsbedingten Abhängigkeiten innerhalb der Produktstruktur darzustellen. Mithilfe einer Strukturanalyse historischer Änderungen wird in Baustein 1 durch eine Assoziationsanalyse (Data-Mining Verfahren) ein MDM-basiertes Änderungsstrukturmodell entworfen. Dies beinhaltet Änderungen, die Komponenten in der Produktstruktur (Änderungsobjekte) und deren Abhängigkeiten. In Baustein 2 wird das Änderungsstrukturmodell genutzt, um historisch hochvernetzte und häufig geänderte Komponenten zu identifizieren. Durch geeignete Maßnahmen sollen diese dann resilienter gegenüber Änderungen gestaltet werden. Mit Baustein 3 können bei einer Änderung weitere Komponenten identifiziert werden, die möglicherweise von Ausbreitung betroffen sind. Die Bausteine 1 und 2 verwenden Daten, die vor der Technologieentscheidung verfügbar sind, da sie aus historischen Projekten gewonnen werden. (Wickel 2017) In Bezug auf die Dissertation ist der Ansatz für die Prognose des Auftretens einer Änderung im PEP (ein Teil von FF1) von Interesse. Durch den datenbasierten Ansatz ist der Aufwand gering. **Gegen eine Verwendung der Methode sprechen jedoch folgende Kriterien:** Es müssten alle Änderungsanträge inklusive der Bauteile durchgehend verknüpft sein, um die Wirkzusammenhänge der Ausbreitungen nachzuvollziehen. Dies ist nicht in allen Systemen der Fall — u.a. nicht im zur Verfügung stehenden Änderungsmanagementsystem dieser Arbeit und nicht in der Datenbasis einer vielzitierten Studie von SIDDIQI ET AL. (SIDDIQI ET AL. 2011). Zudem erfolgt die Prognose unter der Annahme, dass von der Änderungshäufigkeit einer Komponente aus einem historischen auf ein zukünftiges Projekt geschlossen werden kann. Dadurch wird ignoriert, dass die Bauteileigenschaften und das Änderungsverhalten fahrzeugabhängig unterschiedlich ausgeprägt sein können. Zudem wird das Änderungsverhalten im PEP nicht in Bezug auf Zeitpunkte, Kosten und Zusatzeffekte bewertet.

AFSHARI ET AL. präsentieren einen auf Big Data basierten Ansatz, um den Trend in der Entwicklung von Kundenanforderungen an ein Produkt vorherzusagen. Dadurch kann in frühen Entwicklungsphasen gezielt Änderungsflexibilität vorgesehen werden, mit der auf die sich später verändernden Kundenanforderungen reagiert werden kann. Die Methode wird am Beispiel des Apple I-Phones evaluiert. Zuerst werden die Präferenzen von I-Phone-Kunden studiert. Mittels eines QFD-Surveys (Quality Function Deployment) werden die Kundenpräferenzen in funktionale Anforderungen überführt. Basierend auf den Anforderungen werden dann Schlüsselbegriffe ausgewählt, um Daten aus Google-Trends zu extrahieren. Die Daten werden dann u.a. um saisonale Effekte bereinigt, sodass für jede Kundenanforderung der Trend mittels statistischer Methoden wie linearen Regressionen analysiert werden kann. Damit wird prognostiziert, wie sich funktionale Anforderungen, etwa die Größe des Displays, verändern. (Afshari et al. 2015) Für Forschungsfrage 3 sollen Bauteile identifiziert werden, die Änderungsflexibilität im Lebenszyklus benötigen. Mit dem Ansatz von **AFSHARI ET AL.** könnte prognostiziert werden, in welchem Umfang sich Anforderungen im Zeitverlauf verändern – Bauteile könnten aber nur dann identifiziert werden, wenn diese mit den Kundenanforderungen verknüpft wären und die Verknüpfung fahrzeugunabhängig gelten würde. Zudem erfolgt keine Kostenbewertung des Änderungsaufwands, weshalb **der Ansatz nicht weiterverfolgt wird.**

4.2.4 A-posteriori-Analyse technischer Änderungen

A-posteriori-Ansätze verfolgen die Strategie von Fricke et al. des Lernens aus der Vergangenheit (Fricke et al. 2000). Die Übersicht zu Ursachen und Auswirkungen technischer Änderungen in Abschnitt 2.2.4 und 2.2.5 entstand zum Teil aus den Erkenntnissen von A-posteriori-Analysen wie (Terwiesch et al. 1999; Ahmed-Kristensen et al. 2012; Li 2012; Sharafi 2013, S. 171–172). In Bezug auf die Methodenentwicklung sind zwei Ansätze hervorzuheben.

SIDDIQI ET AL. führen eine A-posteriori-Analyse von 1147 Änderungsaufträgen eines mehrjährigen Off-Shore-Projekts durch. Anhand deskriptiver statistischer Analysen zeigen sie, in welcher Projektphase und in welchen Subsystemen die teuersten Änderungen anfallen. Die

Autoren schlagen vor, die Analysen in vergleichbaren Projekten zu wiederholen, um Muster aufzudecken. Dies kann Unternehmen als Hilfestellung dienen, um in zukünftigen Projekten Personal- und Ressourcenallokation sowie Budgetierung hinsichtlich der zeitlichen Dimension sowie der Zuordnung zu den Subsystemen zu planen. Zudem wird analysiert, welche Subsysteme die meisten Änderungen haben, um Change-Hotspots zu identifizieren, auf denen in neuen Projekten besonderer Fokus liegen soll. Er schlägt vor, die Änderungsanzahl mithilfe der Anzahl unterschiedlicher Komponenten pro Subsystem zu normalisieren, was jedoch aufgrund fehlender Daten in seiner Analyse nicht durchgeführt wurde. (Siddiqi et al. 2011) **In Bezug auf die Dissertation** erscheint der deskriptive Ansatz zur Beschreibung des Änderungsverhaltens im PEP (Auftreten, Zeitpunkte, fertigungsspezifische Kosten) hilfreich (FF1). Dennoch **greift die Vorgehensweise**, ausschließlich von deskriptiven historischen Daten auf die Zukunft zu schließen, **zu kurz**, da so weitere Einflüsse unberücksichtigt bleiben. Ist der Prognosegegenstand, wie in der Dissertation, ein einzelnes Bauteil und kein Subsystem größerer Granularität, erscheint eine ausschließlich deskriptive Analyse nicht sinnvoll.

SHARAFI analysiert in seiner Dissertation mithilfe statistischer und struktureller Methoden aus dem Bereich Knowledge Discovery in Databases mehr als 53.000 Änderungsanträge aus unterschiedlichen Entwicklungsprojekten eines Automobilherstellers innerhalb eines Zeitraums von fünfeinhalb Jahren. Er entwickelt ein Framework, um Analysen aufzubauen, bereitet die Erkenntnisse in Form von Mustern auf und leitet Handlungsempfehlungen zu deren Nutzungsmöglichkeiten ab. So soll das Änderungsmanagement, respektive der Produktentwicklungsprozess, verbessert werden. Es werden beispielsweise Analysen zur Verteilung von Änderungen im Zeitverlauf, nach Fahrzeugbereichen, Fahrzeugmodulen oder Abteilungen vorgenommen. (Sharafi 2013) Die Analysen fokussieren zwar den Automobilbau, sind jedoch aufgrund der hohen Abstraktionsebene zu unspezifisch, um sie auf einzelne Bauteile zu übertragen. Daher sind sie **für diese Dissertation nicht weiter relevant**.

4.3 Zusammenfassende Bewertung bestehender Ansätze

Abbildung 4.5 zeigt einen Abgleich der zentralen Anforderungen mit den zuvor ausführlich beschriebenen Ansätzen aus dem Stand der Wissenschaft.

Bewertung	Bewertungsgegenstand												Frage 1		Frage 2		Frage 3		Zuordnung		
	1.1. Automotive Serienbauteile	1.2. geometrische Bauteiländerungen	2. Anwendung	2.1. mit dem Wissen vor Technologieentscheid	2.2. Verarbeiten von Bewertungsunsicherheit	2.3. Verwenden verfügbarer Daten	2.4. angemessener Bewertungsaufwand	3. Notwendige inhaltliche Bestandteile	3.1. Auftreten und Zeitpunkte im PEP	3.2. fertigungsspezifische Kosten	3.3. negative Zusatzeffekte	3.4. fertigungsspezifische Dauer und Kosten	3.5. für unterschiedliche Änderungsarten	3.6. für unterschiedliche Zeitpunkte	3.7. Flexibilitätpotenzial bewertbar	3.8. Bauteilidentif. + Wirtschaftl. bewertbar	4. Ergebnis	4.1. Quantifizierbar	4.2. Genauer als bisherige Methoden	4.3. Nachvollziehbar	
○ nicht berücksichtigt ◐ z.T. berücksichtigt ● berücksichtigt - nicht beurteilbar																					
E = Entwicklung P = Produktion d = Daten gestützt e = Experten gestützt																					
Suchfeld 1: Auswirkungsanalyse technischer Änderungen (Unterabschnitt 4.2.2)																					
Clarkson et al. 2004	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	◐	○	○	○	○	○	●	-	●	E, e	
Belt et al. 2015	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	E, d	
Yasin et al. 2020	●	●	○	○	●	◐	○	◐	○	○	◐	○	○	○	○	○	●	-	●	E, d	
Aurich et al. 2007	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	P, d	
Malak et al. 2013	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	P, d	
Plehn 2017	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	P, e	
Kratzer et al. 2021	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	P, e	
Mehtha 2010	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	P, d	
Gebhardt 2018	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	P/E, d	
Suchfeld 2: Ansätze zur präventiven Vereinfachung technischer Änderungen (Unterabschnitt 4.2.3)																					
Koh et al. 2013	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	E, e	
Olmez 2021	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	P, e	
Wickel, 2017	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	E, d	
Afshari et al. 2015	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	E, d	
Suchfeld 3: A posteriori Analyse technischer Änderungen (Unterabschnitt 4.2.4)																					
Siddiqi et al. 2011	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	E, d	
Sharafi 2013	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	-	●	E, d	

Abbildung 4.5: Abgleich der Anforderungen mit bestehenden Ansätzen

Das Änderungsverhalten im PEP einer werkzeuggebundenen Bauteilversion (Forschungsfrage 1) kann heute nicht adäquat a priori bewertet werden. Einige Arbeiten analysieren die Änderungshäufigkeit und damit das Auftreten von Änderungen. Sie greifen jedoch entweder auf Experteneinschätzungen zurück, was zu einem nicht angemessenen Bewertungsaufwand führt (Koh et al. 2013), oder stützen sich auf die Annahme, dass sich Komponenten, die sich in

der Vergangenheit geändert haben auch bei neuen Projekten ändern werden (Siddiqi et al. 2011; Sharafi 2013; Wickel 2017). Diese Herangehensweise gewährleistet keine nachvollziehbare und verlässliche Prognose. Fertigungsspezifische Kosten werden, Stand heute, aufgrund der notwendigen Einbindung von Experten nur mit viel Aufwand prognostiziert (Plehn 2017; Kratzer et al. 2021b; Olmez 2021) oder sie erfordern einen Wissensstand, der zur Technologieentscheidung noch nicht vorliegt, da der Einsatzzweck der Methoden die Beurteilung von Auswirkungen ist, wenn ein Änderungsantrag gestellt wird (Mehta 2010; Malak et al. 2013; Gebhardt 2018; Yeasin et al. 2020). Weiter ist nicht zu erwarten, dass über A-posteriori-Analysen historischer Änderungen auf die Änderungsaufwände des entsprechenden Bauteils aus einem neuen Projekt geschlossen werden kann – denn abweichende Eigenschaften zwischen den Bauteilen (etwa der Innovationsgrad) blieben unberücksichtigt. Auf Zusatzeffekte, die in Folge einer langen Änderungsdauer entstehen, geht keiner der Ansätze ein.

Auch für die Prognose der Änderungsflexibilität im PEP einer AM-Version des Bauteils (Forschungsfrage 2) eignet sich keiner der Ansätze. Datenbasierte Ansätze sind nicht zielführend, da für die Additive Fertigung aufgrund der geringen Verbreitung heute noch keine historischen Änderungsdaten vorliegen. Daher sind alle Verfahren ungeeignet, die Dauer oder Kosten von Änderungen mithilfe historischer Daten prognostizieren (Mehta 2010; Siddiqi et al. 2011; Gebhardt 2018; Yeasin et al. 2020). Andere Verfahren disqualifizieren sich, weil sie einen Wissensstand voraussetzen, der vor der Technologieentscheidung noch nicht vorliegt, oder weil sie die Änderungsflexibilität nicht zu unterschiedlichen Zeitpunkten im PEP bewerten können (Malak et al. 2013; Plehn 2017; Olmez 2021). Während PLEHN fertigungsspezifische Änderungskosten unter Berücksichtigung von Bewertungsunsicherheiten prognostiziert, ist es mit dem Ansatz von KRATZER ET AL. zudem möglich, die Prognose für unterschiedliche Änderungsarten und Zeitpunkte im PEP durchzuführen. Eine zeitabhängige Prognose der Änderungsdauer ist mit dem Ansatz von KRATZER ET AL. nicht möglich. Daher soll auf Basis des Ansatzes im Rahmen der Arbeit eine Weiterentwicklung erfolgen.

Weiter eignet sich keiner der Ansätze, um zu beurteilen, bei welchen Bauteilen AM die passende Fertigungstechnologie darstellt, weil Änderungsflexibilität im Lebenszyklus

erforderlich wird (Forschungsfrage 3). Von den untersuchten Ansätzen adressieren jene von BELT ET AL. und AFSHARI ET AL. Teile der Lösung. BELT ET AL. prognostizieren die Veränderung von Marktanteilen bei unterschiedlichen Änderungsoptionen und kombinieren dies mit dem CPM-Ansatz, um die Änderungsaufwände abzuschätzen. Die detaillierte Prognose zur Verschiebung von Marktanteilen sowie die expertenbasierte Anwendung des CPM-Ansatzes zur Prognose aller Folgeänderungen ist für den frühen Bewertungszeitpunkt ungeeignet. Marktanteile sowie Abhängigkeiten zwischen Bauteilen können sich zwischen dem Bewertungszeitpunkt und der tatsächlichen Umsetzung einer Kundenanforderung weiter verändern, was den Bewertungsaufwand nicht rechtfertigen würde. AFSHARI ET AL. prognostizieren über Big-Data-Trendanalysen, wie sich Kundenanforderungen im Lebenszyklus verändern, beispielsweise die Displaygröße eines Smartphones. Es findet jedoch keine Potenzial- und Wirtschaftlichkeitsbewertung einzelner Kundenanforderungen statt. **In der Konsequenz muss auch zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 ein neues Vorgehen entwickelt werden.**

Der Vergleich des aktuellen Stands der Wissenschaft mit den gestellten Anforderungen zeigt, dass keiner der Ansätze die Forschungsfragen der Dissertation adäquat beantworten kann. Daher soll eine eigene Methode entwickelt werden, mit welcher das Potenzial der Additiven Fertigung hinsichtlich der Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus bewertet werden kann, um es bei der Entscheidung für die geeignete Serientechnologie eines Bauteils zu berücksichtigen.

5 Modellierungskonzept und Grundlagen der Methode

In diesem Kapitel wird das Modellierungskonzept der Methode zur Bewertung des Potenzials der Additiven Fertigung hinsichtlich der Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus eines Automobils definiert. Die Grundlagen hierfür bilden Kapitel 2 und 3. In Kapitel 2 wurde die Additive Fertigung charakterisiert, der Produktlebenszyklus und Trends im Automobilbau beschrieben sowie die Rolle von Änderungen aufgezeigt. In Kapitel 3 stellen drei empirische Studien die Relevanz von Änderungen in der Produktentstehung und im Produktlebenszyklus nach Serienstart heraus. Daraus wurden in Kapitel 4 zunächst die Anforderungen an eine Methode abgeleitet und dem Stand der Wissenschaft gegenübergestellt. Es wurde gezeigt, dass keiner der vorhandenen Ansätze den gestellten Anforderungen gerecht wird, weshalb eine neue Methode entwickelt werden muss. In Abschnitt 5.1 wird aus der allgemeinen Modelltheorie nach STACHOWIAK das konkrete Vorgehen zur Entwicklung der Methode abgeleitet und darauf basierend das Modellierungskonzept vorgestellt. Das Modellierungskonzept enthält Methoden der kausalanalytischen Prognose, statistische Verteilungen und weitere Schätzverfahren sowie Methoden der Kostenschätzung und Kurzkalkulation. Die dafür notwendigen Grundlagen werden in den Abschnitten 5.2 und 5.3 eingeführt.

5.1 Modellierungskonzept

Eine Methode bezeichnet ein Verfahren, das auf einem Regelsystem aufbaut und die Erlangung von wissenschaftlichen Erkenntnissen oder praktischen Ergebnissen verfolgt (Duden 2023). Modelle schaffen Transparenz über das Betrachtungsobjekt in seinem Anwendungskontext und bilden dadurch die Grundlage zur Entwicklung von Methoden (Neuhausen 2001, S. 7). Es gibt Beschreibungsmodelle, die weder analysieren noch erklären, Erklärungsmodelle bzw. Prognosemodelle, die zum Verstehen eines Problems beitragen,

sowie Entscheidungsmodelle, die die Problemlösung unterstützen (Jockisch et al. 2009, S. 32). Das der Methodenentwicklung in dieser Arbeit zugrundeliegende Modell ist ein Entscheidungsmodell. Es dient dazu, die geeignete Serientechnologie von Bauteilen unter Berücksichtigung des Änderungsverhaltens auszuwählen. Um die Entscheidung herbeizuführen, sind Prognosen zum Änderungsverhalten von Bauteilen erforderlich. Gemäß STACHOWIAK erfolgt die Modellbildung anhand dreier Merkmale: dem Abbildungsmerkmal, dem Verkürzungsmerkmal und dem pragmatischen Merkmal (Stachowiak 1973, S. 131–133). Dadurch wird das Realsystem, in diesem Fall sind das Bauteiländerungen im Lebenszyklus eines Automobils, in ein Entscheidungsmodell überführt, welches das Potenzial von AM auf Bauteiländerungen bewertet und bei der Entscheidung der geeigneten Serientechnologie berücksichtigt. Das Vorgehen ist in Abbildung 5.1 veranschaulicht.

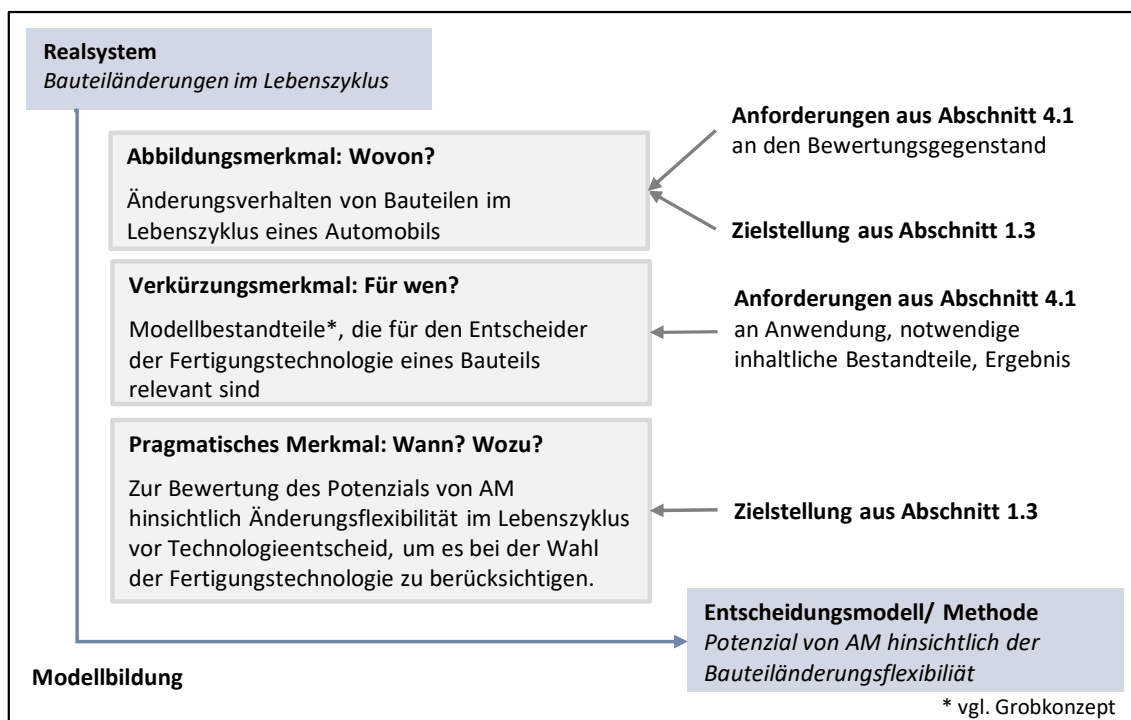


Abbildung 5.1: Vorgehen zur Modell- und Methodenbildung (in Anlehnung an Stachowiak 1973, S. 128–133)

Modelle sind stets Repräsentationen der zugrundeliegenden Realsysteme. Daher beschreibt das Abbildungsmerkmal nach STACHOWIAK, was ein Modell repräsentiert (Stachowiak 1973, S. 131; Neuhausen 2001, S. 53; Töllner et al. 2009, S. 8). Das im Rahmen dieser Arbeit

aufzubauende Modell und die daraus resultierende Methode soll gemäß der Zielsetzung und den Anforderungen an den Bewertungsgegenstand (Abschnitt 4.1) das Änderungsverhalten von Bauteilen im automobilen Lebenszyklus beschreiben. Durch das Verkürzungsmerkmal wird das Realsystem auf die Bestandteile reduziert, die für Modellnutzer relevant erscheinen (Stachowiak 1973, S. 132). Modellnutzer ist der Entscheider der Fertigungstechnologie eines Bauteils. Die für ihn relevanten Modellbestandteile leiten sich aus den Anforderungen an die Anwendung, den notwendigen inhaltlichen Bestandteilen und aus den Anforderungen an das Ergebnis ab, vgl. Abschnitt 4.1. Die Modellbestandteile sind im Modellierungskonzept in Form von fünf Schritten bei Baustein 1 und drei bei Baustein 2 abgebildet, vgl. Abbildung 5.2.

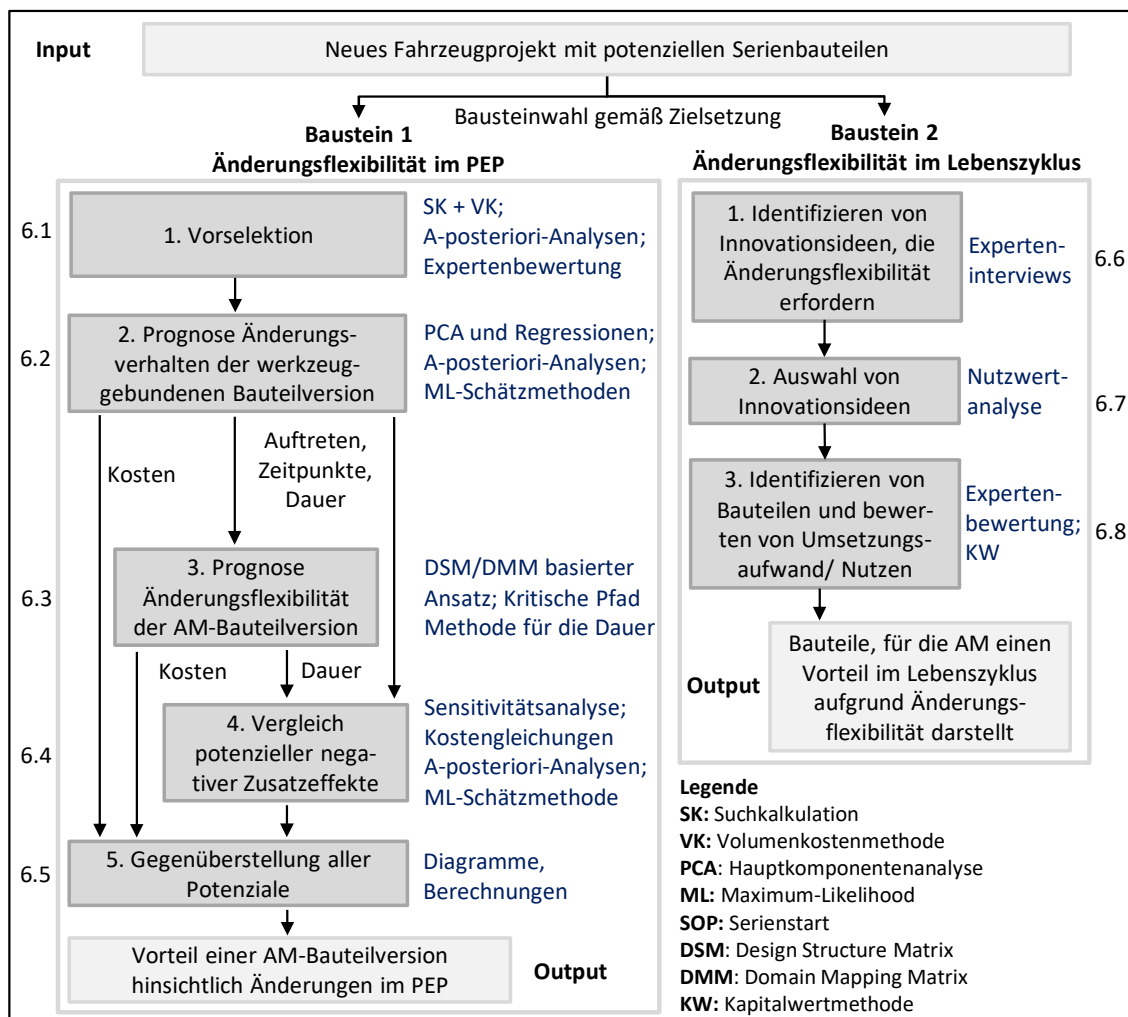


Abbildung 5.2: Gesamtmethode zur Bewertung des Potenzials von AM auf Änderungsflexibilität im Lebenszyklus

Da gemäß den Anforderungen an die inhaltlichen Bestandteile der Methode das Änderungsverhalten sowohl im PEP als auch im weiteren Lebenszyklus bewertet werden soll, werden zwei Bausteine entwickelt, die separat voneinander anwendbar sind. Weiterhin beschreibt das pragmatische Merkmal aus Abbildung 5.1, wann und wozu das Modell verwendet werden soll (Stachowiak 1973, S. 133; Neuhausen 2001, S. 53). Um bei der Wahl der Serientechnologie zu unterstützen, muss bei jedem der beiden Bausteine die Bewertung des Potenzials der Additiven Fertigung hinsichtlich Änderungsflexibilität vor Technologieentscheid von Serienbauteilen eines neuen Fahrzeugprojekts erfolgen.

Mithilfe von **Baustein 1 – Änderungsflexibilität im PEP** – kann bei einem Fahrzeug der Vorteil der AM-Version eines Bauteils hinsichtlich Änderungen im PEP quantitativ bewertet werden.

In **Schritt 1** wird, ausgehend von allen potenziellen Serienbauteilen eines neuen Fahrzeugs, eine Vorselektion durchgeführt (**Abschnitt 6.1**), um den nachfolgenden Bewertungsaufwand zu reduzieren. Die Herstellungskosten der AM-Serienbauteile hängen, anders als bei werkzeuggebundenen Bauteilen, weniger stark von der Bauteilkomplexität ab (Lindemann et al. 2012). Trotz zusätzlicher Pre- und Post-Processing-Schritte beeinflussen die Maschinenkosten des AM-Prozesses die Herstellkosten wesentlich (Möhrle 2018, S. 154). Maschinen- und Materialkosten korrelieren mit dem Bauteilvolumen (Rickenbacher et al. 2013). Daher werden die AM-Herstellkosten, angelehnt an (Ruffo et al. 2007), über das Bauteilvolumen berechnet. Da in frühen Konzeptphasen keine auskonstruierten Bauteile vorliegen (Braess et al. 2013, S. 1160), sollen die Bauteil-Volumenkosten eines vergleichbaren historischen Fahrzeugprojekts berechnet werden. Diese werden mit einem werkstoffabhängigen konstanten Volumenkostensatz von AM-Serienbauteilen verglichen. Bauteile, bei denen die Höhe der Volumenkosten der werkzeuggebundenen und der AM-Version ähnlich sind, werden weiter betrachtet. Die Studie zu Änderungen im PEP zeigte (vgl. Abschnitt 3.1), dass bestimmte Baugruppen fahrzeugübergreifend mehr Änderungen haben als andere. Ein Fokus auf Baugruppen mit historisch vielen Änderungen erhöht daher die Erfolgchance, Bauteile mit besonderem Bedarf an Änderungsflexibilität weiter zu bewerten. Die Fokussierung erfolgt über A-posteriori-Analysen historischer Projekte. Da nicht alle Bauteile eines Fahrzeugs mit

AM technisch realisierbar sind (vgl. Abschnitt 2.1.4), erfolgt zudem eine Überprüfung der technischen Machbarkeit durch Experten.

Anschließend wird in **Schritt 2** das Änderungsverhalten einer werkzeuggebundenen Bauteilversion im PEP prognostiziert (**Abschnitt 6.2**). Die Grundlage hierfür sind historische Änderungsdaten und Experteneinschätzungen zu Bauteileigenschaften. Daraus werden, angelehnt an die notwendigen inhaltlichen Bestandteile der Methode aus Abschnitt 4.1, Modelle erstellt, die das Auftreten von Änderungen, Änderungszeitpunkte und fertigungsspezifische Änderungskosten prognostizieren. Da die negativen Zusatzeffekte von Änderungen direkt von der Dauer abhängig sind (vgl. Abschnitt 3.2 und Abschnitt 6.4), wird ein weiteres Modell entworfen, um die fertigungsspezifische Änderungsdauer einer werkzeuggebundenen Version des Bauteils zu prognostizieren. Die Modelle werden mithilfe von Hauptkomponentenanalysen (PCA), logistischen und linearen Regressionen, deskriptiven A-posteriori-Analysen sowie Maximum-Likelihood-Schätzmethoden erstellt – das sind Verfahren aus dem Bereich der Statistik für datenbasierte Beschreibungs-, Prognose-, und Entscheidungsmodelle. Die notwendigen Grundlagen sind in Abschnitt 5.2 nachzulesen.

In **Schritt 3** wird die Änderungsflexibilität der AM-Bauteilversion prognostiziert. Da keine historischen Daten vorliegen, erfolgt die Prognose über einen auf Experten und auf DSM- und DMM-Matrizen basierten Ansatz (**Abschnitt 6.3**). Unterschiedliche geometrische Änderungsmerkmale und deren Beziehungen zueinander werden in einer DSM dargestellt. Eine DMM bildet die Abhängigkeiten zwischen Änderungsmerkmalen und Arbeitsvorbereitungsschritten ab. Die vom Änderungszeitpunkt im PEP abhängige Prognose der Änderungskosten gelingt, indem die zeitliche Terminierung der Arbeitsvorbereitungsschritte mit den Kosten und der Dauer der Schritte sowie den DSM und DMM-Matrizen verknüpft wird. Für die Prognose der Änderungsdauer wird eine Analyse des kritischen Pfades (CPA) angewandt – eine Methode zur Abschätzung von Zeitdauern (Nahmias et al. 2015, S. 548). Damit wird berücksichtigt, dass bei Änderungen mehrere Schritte parallel durchgeführt werden können, was eine realistische Abschätzung ermöglicht. Die Experteneinschätzungen sind von Unsicherheiten geprägt. Angelehnt an PLEHN wird daher die PERT-Schätzmethode und eine Monte-Carlo-Simulation verwendet. Damit sind für

unterschiedliche Änderungsarten und Zeitpunkte im PEP Änderungskosten und Dauer prognostizierbar, sodass Transparenz zur Änderungsflexibilität der AM-Version erzeugt werden kann. Für die notwendigen Grundlagen sei auf Abschnitt 5.2 verwiesen.

Mit **Schritt 4** werden potenziell entstehende Zusatzeffekte von Änderungen im PEP vor und nach Serienstart prognostiziert (**Abschnitt 6.4**). Dadurch kann der Vorteil einer schnelleren Änderungsumsetzung einer AM-Bauteilversion bewertet werden. **Vor Serienstart** kann eine lange Änderungsdauer dazu führen, dass Änderungen nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.2). Eine Sensitivitätsanalyse historischer Änderungsdaten soll daher aufzeigen, inwieweit eine kürzere Änderungsdauer dazu führt, dass Änderungen in früheren Bauphasen umgesetzt werden können. So kann die Bedeutung einer schnellen Änderungsumsetzung quantifiziert werden. **Nach Serienstart** entstehen direkt von der Änderungsdauer abhängige Zusatzkosten. Diese können reduziert werden, wenn die Änderungsdauer kürzer ist. Folgende Zusatzkosten können anfallen, bis die Änderung umgesetzt ist: Gewährleistungskosten, weiterhin hohe Produktkosten, Nacharbeitskosten und Vorproduktionskosten (vgl. Abschnitt 3.2). Zu den Vorproduktionskosten zählen Kosten für zusätzliche Personalkapazität, Behälter und Lagerfläche. Das Reduktionspotenzial der Zusatzkosten wird über Kostengleichungen quantifiziert. Für einige Zusatzkostenarten werden A-posteriori-Daten verwendet. Bei den Inputparametern der Kostengleichungen wird zum Teil, etwa bei Behälterkosten, auf historische Daten zurückgegriffen. Um diese zu bestimmen, werden Maximum-Likelihood-Schätzmethoden verwendet. Andere Inputparameter, etwa die Jahresstückzahl, können von Nutzern variiert werden. So werden Sensitivitäten einzelner Parameter transparent.

In **Schritt 5** erfolgt die Gegenüberstellung potenzieller fertigungsspezifischer Änderungskosten und Zusatzeffekte der werkzeuggebundenen und der AM-Version eines Bauteils. Dies ermöglicht eine Bewertbarkeit des Vorteils hinsichtlich Änderungen im PEP, der durch die Wahl von AM als Serientechnologie entstehen kann (vgl. **Abschnitt 6.5**). Inputs sind die fertigungsspezifischen Änderungskosten der werkzeuggebundenen (ermittelt in Schritt 2) und der AM-Bauteilversion (ermittelt in Schritt 3) sowie die Gegenüberstellung potenzieller negativer Zusatzeffekte bei Änderungen aus Schritt 4.

Anhand **Baustein 2** werden gezielt diejenigen Bauteile eines Fahrzeugprojekts identifiziert, die mit AM hergestellt werden sollen, weil sie eine erhöhte Änderungsflexibilität im Lebenszyklus nach Serienstart benötigen, etwa für Updates oder Personalisierung (vgl. notwendige inhaltliche Bestandteile aus Abschnitt 4.1).

Hierfür werden in **Schritt 1** (vgl. **Abschnitt 6.6**) über Experteninterviews Innovationsideen identifiziert, die Änderungsflexibilität im Lebenszyklus erfordern. Sie basieren auf den Einsatzfeldern einer änderungsflexiblen Fertigungstechnologie, die in der Expertenstudie zu Änderungsbedarfen im Lebenszyklus erarbeitet wurden (vgl. Abschnitt 3.3, Anhang 9 und Anhang 10).

In **Schritt 2** (vgl. **Abschnitt 6.7**) werden über eine Nutzwertanalyse jene Innovationsideen durch das Produktmanagement ausgewählt, die für das Fahrzeug besonders relevant sind.

Dann werden in **Schritt 3** (vgl. **Abschnitt 6.8**) über Expertenworkshops mit Produktmanagement und Konzeptentwicklung jene Bauteile identifiziert, die zur Umsetzung der Innovationsidee im Lebenszyklus Änderungsflexibilität benötigen. Neben einer technischen Bewertung der Umsetzbarkeit wird über die Kapitalwertmethode entschieden, inwieweit die Umsetzung betriebswirtschaftlich sinnvoll ist und welche Umfänge werkzeuggebunden respektive additiv hergestellt werden sollen.

5.2 Grundlagen zu kausalanalytischer Prognose, statistischer Verteilungen, und statistischen Schätzmethoden

Der Abschnitt vermittelt statistische Grundlagen, die für die Methodendetaillierung notwendig sind. So wird in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, weshalb Prognosen mittels Regressionen für diese Arbeit besonders geeignet sind, und wie diese funktionieren. In Abschnitt 5.2.2 werden die Grundlagen der Hauptkomponentenanalyse erläutert, mit der die Komplexität von Prognosemodellen reduziert werden kann. Die entwickelte Methode verarbeitet Daten, die unterschiedlich verteilt sind und für eine Weiterverarbeitung aggregiert

werden müssen. Daher werden in Abschnitt 5.2.3 die wesentlichen Grundlagen zu Wahrscheinlichkeitsverteilungen und statistischen Schätzmethoden erläutert.

5.2.1 Kausalanalytische Prognose durch Regression

In Baustein 1, Schritt 2 (vgl. Abschnitt 6.2) werden Prognosen durchgeführt. Prognosen ermöglichen eine Vorhersage zukünftiger Ereignisse (Leopold-Wildburger et al. 2009). Unter den quantitativen Methoden sind neben Entwicklungsprognosen wie der Zeitreihenanalyse Wirkungsprognosen von zentraler Bedeutung (Vogel 2015, S. 13). Diese behandeln die Analyse kausaler Zusammenhänge (Vogel 2015, S. 13). Neuronale Netze sind kausalanalytische Verfahren, die im Stande sind, mithilfe großer Datenmengen komplexe Wirkprinzipien ohne zuvor theoretisch begründete Wirkzusammenhänge zu identifizieren (Backhaus et al. 2015, S. 47). Die in dieser Arbeit entwickelten Prognosen basieren auf Wirkzusammenhängen, für die nur begrenzte Datenmengen allokiert werden können. Zudem sollen die Wirkzusammenhänge der wissenschaftlichen Erkenntnis dienen und eine nachvollziehbare Praxisanwendung ermöglichen (vgl. Anforderungen in Abschnitt 4.1). Aus diesem Grund werden Regressionsanalysen als Vertreter der klassischen multivariaten Analyseverfahren gewählt und im Folgenden beschrieben. Die theoretisch begründeten Ursache-Wirkungszusammenhänge können quantitativ überprüft werden, indem der systematische Einfluss der Ausprägungen von k unabhängigen Variablen (bzw. Regressoren) x auf eine abhängige Variable (bzw. Zielvariable) y untersucht wird, vgl. Formel (1) (Fahrmeir et al. 2009, S. 19; Backhaus et al. 2016, S. 64–65).

$$y = f(x_1, \dots, x_k) + \epsilon \quad (1)$$

In der Störgröße ϵ sind alle weiteren Schwankungen zusammengefasst, die von den unabhängigen Variablen im Modell nicht erklärt werden können (Backhaus et al. 2016, S. 64–65). Je nach Skalierung und Variablenanzahl eignen sich unterschiedliche Arten von Regressionsmodellen (Fahrmeir et al. 2009). In dieser Arbeit werden multiple lineare Regressionsmodelle genutzt. Diese beschreiben den Zusammenhang mehrere unabhängiger

Variablen auf eine metrisch skalierte abhängige Variable (Fahrmeir et al. 2009, S. 24). Außerdem werden binäre logistische Regressionsmodelle genutzt, mit denen die Wirkung unabhängiger Variablen auf eine kategoriale abhängige Variable mit zwei möglichen Ausprägungen beschrieben und die Eintrittswahrscheinlichkeit prognostiziert wird (Backhaus et al. 2015, S. 284).

Multiple lineare Regression – Modellbildung

Ein multiples lineares Regressionsmodell kann in Matrixnotation dargestellt werden (Montgomery 2011, S. 456).

$$y = X\beta + \epsilon \quad (2)$$

mit:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Die Beobachtungswerte der abhängigen Variablen werden durch einen $(n \times 1)$ Vektor y dargestellt. Die Matrix X repräsentiert alle n Werte der k unabhängigen Variablen, inklusive der Konstante. Der $k \times 1$ Vektor β beinhaltet die Regressionskoeffizienten, ϵ ist ein $n \times 1$ Vektor der Störgröße (Montgomery 2011, S. 456). Die Störgröße ist in der Realität nicht beobachtbar, manifestiert sich aber in den Residuen $\hat{\epsilon}_i$ (Backhaus et al. 2016, S. 87). Basierend auf den Vektoren X und y wird eine Regression gerechnet und je Datenpunkt ein Erwartungswert \hat{y}_i für die abhängige Variable geschätzt. Über die Methode der kleinsten Quadrate werden die Regressionskoeffizienten β so geschätzt, dass die Residuenquadratsumme SS_E möglichst klein ist – also die Beobachtungswerte y_i von den geschätzten Werten \hat{y}_i über die Summe aller Datenpunkte n die geringste quadratische Abweichung haben, vgl. Formel (4) (Montgomery 2011, S. 459).

$$SS_E = \sum_{i=1}^n \hat{\epsilon}_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

Dividiert man die Residuenquadratsumme SS_E durch die Restfreiheitsgrade $(n-k-1)$ der Regression, ergibt sich die geschätzte Varianz der Störgrößen $\hat{\sigma}^2$, vgl. Formel (5) (Montgomery 2011, S. 459).

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SS_E}{n - k - 1} \tag{5}$$

Deren Wurzel ist der Standardfehler der Schätzung $s = \hat{\sigma}$, mit welcher der mittlere Fehler der Schätzung der abhängigen Variable beurteilt werden kann (Backhaus et al. 2016, S. 107). Für die Anwendung eines Regressionsmodells gelten bestimmte **Voraussetzungen** und auch die **Güte des Modells** muss überprüft werden. Abbildung 5.3 fasst Vorgehensweisen und Kennwerte zur Überprüfung von Modellvoraussetzungen und Modellgüte zusammen, die im Zuge der Dissertation angewendet werden.


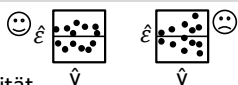

Überprüfung der Signifikanz und Güte	Überprüfung der Modellvoraussetzungen	
	Voraussetzung	Art der Überprüfung
<p>p-Wert $< \alpha$</p> <p>Sig. Gesamtmodell → F-Test $p = P(F > F_{emp})$ mit $F_{emp} = \frac{R^2/k}{(1-R^2)/(n-k-1)}$</p> <p>Sig. Einzelvariablen → t-Test $p = P(t > t_{emp})$ Mit $t_{emp} = \left(\frac{\hat{\beta}_j}{s_{\hat{\beta}_j}}\right)^2$ mit $s_{\hat{\beta}_j}$ Standardfehler von $\hat{\beta}_j$</p> <p>R² Bestimmtheitsmaß Korrigiertes R² $\in [0,1]$</p>	<p>a) Linearer Einfluss der unabhängigen Variablen</p> <p>b) Geringe Multi-kollinearität (alle x_j lin. unabhängig) wenn $j > 1$</p> <p>c) Homoskedastizität der Störgrößen</p> <p>d) Unkorrelierte Störgrößen (keine Autokorrelation)</p> <p>e) Normalverteilte Störgrößen bei $N < 40$</p>	<p>- Streudiagramme zwischen x_j und y </p> <p>- VIF < 10 wobei $VIF_j = 1/(1-R_j^2)$ mit Bestimmtheitsmaß R_j^2 einer Variable x_j auf die restlichen unabhängigen Variablen</p> <p>- Diagramm  - Breusch-Pagan-Test mit H_0: Homoskedastizität \hat{y} \hat{y}</p> <p>- Durbin-Watson-Test $0 < d < 4$ → d nahe 2</p> <p>- Normalverteilungsdiagramm  - Kolmogorow-Smirnov Test mit H_0: Normalverteilung $\hat{\epsilon}$</p>

Abbildung 5.3: Maße zur Überprüfung von Signifikanz, Güte und Modellvoraussetzungen linearer Regressionen (in Anlehnung an Fahrmeir et al. 2009, S. 66–113; Backhaus et al. 2016, S. 84–121)

Um eine Verzerrung der Schätzwerte für die Regressionskoeffizienten $\hat{\beta}_j$ zu vermeiden, müssen lineare Zusammenhänge zwischen den abhängigen und der unabhängigen Variable bestehen, was durch Streudiagramme geprüft wird (Backhaus et al. 2016, S. 99–100).

Multikollinearität bedeutet einen sehr starken Zusammenhang zwischen einzelnen unabhängigen Variablen. Auch dies muss vermieden werden, da sich sonst die Streuung unterschiedlicher unabhängiger Variablen überlagert oder vorhandene Informationen nicht eindeutig auf eine der Variablen zurückzuführen sind (Backhaus et al. 2016, S. 107). Indem Einzelregressionen zwischen den abhängigen und der unabhängigen Variable berechnet werden, kann ein Variance Inflation Factor (VIF) ermittelt werden, der den Wert 10 nicht überschreiten darf (Backhaus et al. 2016, S. 108). Weitere Voraussetzungen beziehen sich auf die Störgrößen. Diese müssen homoskedastisch sein, d. h. sie schwanken unabhängig von \hat{y}_i mit gleichbleibender Varianz um den Wert 0 (Fahrmeir et al. 2009, S. 66). Dies wird anhand der geschätzten Residuen $\hat{\varepsilon}_i$ mittels Diagrammen visuell oder analytisch durch den Breusch-Pagan-Test, dessen Berechnung bei FAHRMEIER ET AL. nachzulesen ist, überprüft (Fahrmeir et al. 2009, S. 131). Bei Autokorrelation sind die Abweichungen von der Regressionsgeraden nicht mehr zufällig, sondern in ihrer Richtung von der Abweichung des vorangegangenen Beobachtungswertes abhängig. Auch dies verletzt eine Annahme der linearen Regression und wird daher mit dem Durbin-Watson-Test, welcher Differenzen zwischen Residuen aufeinanderfolgender Beobachtungswerte aggregiert, analytisch überprüft. Berechnungsformeln sind bei BACKHAUS ET AL. zu finden (Backhaus et al. 2016, S. 105). Ein Wert von d nahe 2 deutet auf fehlende Autokorrelation und somit Unkorreliertheit der Störgrößen hin, wobei d Werte zwischen 0 und 4 annimmt (Backhaus et al. 2016, S. 106). Für die Gültigkeit von Signifikanztests (F-Test und t-test) der linearen Regression müssen die Störgrößen normalverteilt sein, was durch den zentralen Grenzwertsatz für große Stichproben auch der Fall ist (Backhaus et al. 2016, S. 111). Bei einer Stichprobe $n < 40$ wird die Normalverteilung über Histogramme sowie den Kolmogorov-Smirnov-Signifikanztest überprüft (Lilliefors 1967; Backhaus et al. 2016, S. 121). Die **Modellgüte** wird über das Bestimmtheitsmaß geprüft. Es beschreibt den Anteil der Streuung, der durch die Variablen im Modell erklärt wird. Das Maß nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei höhere Werte auf ein besseres Modell hindeuten (Backhaus et al. 2016, S. 84). Bei mehreren unabhängigen Variablen wird das R^2 korrigiert, um zufällige Effekte aufgrund der naturgemäßen Steigerung des Erklärungsgehalts durch weitere Variablen herauszurechnen (Backhaus et al. 2016, S. 85). Über einen F-Test wird überprüft,

inwieweit das Gesamtmodell signifikant ist, über einen t-Test wird die Signifikanz der einzelnen Regressionskoeffizienten $\hat{\beta}_j$ untersucht (Backhaus et al. 2016, S. 86–95). Tests der Modellvoraussetzungen und Güte können über Statistiksoftwares wie SPSS durchgeführt werden, sodass eine detailliertere Darstellung nicht notwendig ist.

Multiple lineare Regression – Anwendung bei der Prognose einer neuen Beobachtung

Regressionen werden in dieser Arbeit, neben dem Aufdecken von Zusammenhängen, zur Prognose genutzt. Die Prognose eines neuen Wertes \hat{y}_* erfolgt durch Multiplikation des Vektors x_* , der die Variablenwerte x_{*1} bis x_{*k} enthält, mit den geschätzten Regressionskoeffizienten $\hat{\beta}_j$, vgl. Formel (6).

$$\hat{y}_* = x_* \hat{\beta}_j \text{ mit } x_* = [1 \quad x_{*1} \quad x_{*2} \quad \dots \quad x_{*k}], \hat{\beta}_j = [1 \quad \hat{\beta}_1 \quad \hat{\beta}_2 \quad \dots \quad \hat{\beta}_k] \quad (6)$$

Prognosen unterliegen Unsicherheiten, weswegen häufig ein Intervall geschätzt wird, in dem der Wert liegen wird (Barth 2010, S. 22). Das Prognoseintervall wird über Formel (7) berechnet. Dazu sind die zur Modellerstellung verwendeten Werte der unabhängigen Variablen, gespeichert in Matrix X , erforderlich. Außerdem ist das Quantil der Students t-Verteilung $t_{\alpha/2, n-p}$ notwendig, welches in Statistikbüchern wie (Fahrmeir et al. 2016, S. 557) oder (Montgomery 2011, S. 711) nachgeschlagen oder über die *tin*v-Funktion in MatLab berechnet werden kann (Montgomery 2011, S. 275–281).

$$\begin{aligned} \hat{y}_* - t_{\alpha/2, n-p} \sqrt{\hat{\sigma}^2 (1 + x_*' (X'X)^{-1} x_*)} &\leq Y_* \\ &\leq \hat{y}_* + t_{\alpha/2, n-p} \sqrt{\hat{\sigma}^2 (1 + x_*' (X'X)^{-1} x_*)} \end{aligned} \quad (7)$$

Der Mean Absolut Percentage Error (MAPE), ein bei Prognosen häufig verwendetes Gütemaß, gibt die durchschnittliche prozentuale Abweichung des prognostizierten Wertes \hat{y} vom tatsächlichen Wert y bei n Beobachtungen an (Barrot 2007, S. 419).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \quad (8)$$

Zudem kann die Prognosegüte metrischer Zielvariablen anhand des Root Mean Square Error (RMSE) bestimmt werden. Dieser ergibt sich aus der Wurzel der durchschnittlichen

quadratischen Abweichung des prognostizierten \hat{y} vom tatsächlichen Wert y bei n Beobachtungen (Barrot 2007, S. 420).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (9)$$

Eine gängige Methode zur Beurteilung der Prognosegüte ist die Kreuzvalidierung (Hastie et al. 2009, S. 241). Bei einer k -fachen Kreuzvalidierung werden die Daten, mit denen das Modell erstellt wurde, in k etwa gleich große Datensets geteilt. Typisch ist die Aufteilung in 5 oder 10 Sets. Anschließend wird jeweils ein Set als Testdaten verwendet und die übrigen $k-1$ Daten (Trainingsdaten) zur Prognose. Der Vorgang wird k -mal wiederholt (Hastie et al. 2009, S. 242).

Binär Logistische Regression – Modellbildung

Ziel der logistischen Regression ist die Schätzung des Effekts der systematischen Komponente η_i

$$\eta_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_k x_{ik} \quad (10)$$

auf die Wahrscheinlichkeit π_i , dass ein Ereignis $y_i = 1$ eintritt (Fahrmeir et al. 2009, S. 190), vgl. Formel (11). Die Wahrscheinlichkeit π_i ist durch die logistische Regressionsfunktion zwischen null und eins $[0,1]$ definiert.

$$\pi_i = \frac{1}{1 + e^{-\eta_i}} \quad (11)$$

Als Pendant zu den Regressionskoeffizienten einer linearen Regression kann durch die odds ratio $e^{\hat{\beta}_j}$ für jede unabhängige Variable x_j bestimmt werden, wie stark sich die Wahrscheinlichkeit für Ereignis $y_i = 1$ erhöht, wenn sich der Wert der jeweiligen Variable um eins erhöht (Fahrmeir et al. 2009, S. 33). Statistiksoftware wie SPSS ermöglicht eine Berechnung der odds ratio (Backhaus et al. 2016, S. 311). **Voraussetzungen** für die Anwendung einer logistischen Regression sind eine geringe Multikollinearität der unabhängigen Variablen sowie mindestens 25 Datenpunkte pro Kategorie der abhängigen Variable (Backhaus et al. 2016, S. 347). In Abbildung 5.4 sind die wichtigsten **Maße für die Güte einer binär logistischen Regressionsfunktion** zusammengefasst. Zunächst wird durch

den Likelihood-Ratio-Test (LLR) das maximierte Log-Likelihood des Modells (0-Modell), welches nur die Konstante und keine Variablen enthält (LL_0) dem maximierten Log-Likelihood des vollständigen Modells (LL_V) gegenübergestellt. Durch Abgleich mit dem empirischen χ^2 kann auf Basis von zwei Freiheitsgraden die Signifikanz des Gesamtmodells beurteilt werden (Backhaus et al. 2016, S. 315–316). Die Signifikanz der einzelnen unabhängigen Variablen wird durch Abgleich der Wald-Statistik mit dem empirischen χ^2 bei einem Freiheitsgrad überprüft (Backhaus et al. 2016, S. 320). Mit den Pseudo- R^2 -Statistiken Cox & Snell- R^2 sowie Nagelkerkes R^2 wird beurteilt, wie gut das Modell an den Datensatz angepasst ist, wobei ein $R^2 > 0,2$ auf eine akzeptable und ein $R^2 > 0,4$ auf eine gute Modellgüte hindeutet (Albers 2007, S. 203–204). Zur Berechnung wird auf (Backhaus et al. 2016, S. 317) verwiesen. Weiter muss ein Wahrscheinlichkeitstrennwert definiert werden, ab welchem das Modell das Eintreten von Ereignis $y_i = 1$ als wahrscheinlich einstuft. Über Klassifizierungstabellen wird dann der Anteil angegeben, der insgesamt richtig klassifiziert wurde (Trefferquote), sowie der Anteil zu dem Ereignis $y_i = 1$ (Sensitivität) und Ereignis $y_i = 0$ (Spezifität) richtig zugeteilt wird (Backhaus et al. 2016, S. 299). Die Trefferquote wird mit einer zufälligen Gruppenzuteilung (PCC) verglichen (Albers 2007, S. 203), um die Qualität zu bestimmen. Die Klassifizierung wird zudem durch die ROC-Kurve beurteilt. Sensitivität und Spezifität werden dabei graphisch für verschiedene Trennwerte geplottet und ein AUC-Wert (Area Under Curve) zur Beurteilung der Vorhersagegüte berechnet (Backhaus et al. 2016, S. 301). Ab einem $AUC > 0,7$ ist das Modell akzeptabel (Backhaus et al. 2016, S. 302). Die in Abbildung 5.4 aufgeführten Gütemaße können mit Statistikprogrammen wie SPSS berechnen werden.

Überprüfung der Signifikanz	Pseudo-R ² Statistiken	Klassifizierungstabelle	ROC-Kurve
p-Wert < α	$0,2 < R_{CS}^2 < 0,4$ akzeptabel $0,4 < R_{CS}^2$ gut	Trefferquote > PCC [%] Sensitivität ($y_i=1$) [%] Spezifität ($y_i=0$) [%]	AUC < 0,7 ungenügend $0,7 < AUC < 0,8$ akzeptabel $0,8 < AUC < 0,9$ exzellent $0,9 < AUC$ außerordentlich
Sig. Gesamtmodell → LLR-Statistik wenn $LLR = -2 (LL_0 - LL_V) > \chi_2^2$	$0,2 < R_N^2 < 0,4$ akzeptabel $0,4 < R_N^2 < 0,5$ gut $0,5 < R_N^2$ sehr gut	wobei $PCC = a^2 + (1-a)^2$ mit a = Anteil einer der 2 Gruppen an der Gesamtzahl der Beobachtungen	
Sig. Einzelvariablen → Wald-Statistik wenn $W = \left(\frac{\hat{\beta}_j}{s_{\hat{\beta}_j}} \right)^2 > \chi_1^2$ mit $s_{\hat{\beta}_j}$ Standardfehler von $\hat{\beta}_j$			

Abbildung 5.4: Maße zur Überprüfung der Signifikanz und Güte binär logistischer Regressionen (in Anlehnung an Albers 2007, S. 203–204; Fahrmeir et al. 2009, 33 ff; Backhaus et al. 2016, S. 311–347)

Binär logistische Regression – Anwendung bei der Prognose einer neuen Beobachtung

Bei einer neuen Beobachtung mit den Werten x_{*1} bis x_{*k} der k unabhängigen Variablen wird über die Regressionskoeffizienten β_0 bis β_k des a priori geschätzten Modells durch Formel (10) und (11) die Wahrscheinlichkeit π_i für das Eintreten von Ereignis $y_i = 1$ berechnet (Fahrmeir et al. 2009, S. 190). Die Prognosegüte einer logistischen Regression wird über Klassifizierungstabellen bestimmt. Dafür werden der Anteil, der insgesamt richtig klassifiziert wurde (Trefferquote) sowie der Anteil, der richtig positiv (Sensitivität) respektive richtig negativ prognostiziert wurde (Backhaus et al. 2016, S. 299) angegeben. Die Fähigkeit des Modells, neue Beobachtungen den richtigen Gruppen zuzuordnen, kann unterstützend über den AUC-Wert erfolgen. Ein Modell mit einem hohen AUC-Wert „diskriminiert“ gut (Giancristofaro et al. 2003, S. 379–382) – es klassifiziert also die Beobachtungen gut in die richtigen Kategorien ein. Der *Bias*, Formel (12), gibt die Differenz des Mittelwerts der prognostizierten Wahrscheinlichkeiten aller Beobachtungen $M(\pi_i)$ vom Anteil der positiven Ereignisse $M(y_i = 1)$ aller Beobachtungen an. Bei einer guten Kalibrierung liegt der *Bias* nahe 0, sodass die Wahrscheinlichkeiten nicht über- oder unterschätzt werden (Giancristofaro et al. 2003).

$$Bias = M(\pi_i) - M(y_i = 1) \quad (12)$$

5.2.2 Reduktion der Modellkomplexität durch eine Hauptkomponentenanalyse

Mit einer Hauptkomponentenanalyse wird eine Vielzahl von Variablen durch möglichst wenige Faktoren (bzw. Komponenten) zusammengefasst. So wird die Datenstruktur reduziert (Backhaus et al. 2016, S. 413). In dieser Dissertation konnten aussagekräftige Modelle entwickelt werden, indem stark korrelierte Variablen zum Teil durch Faktoren ersetzt wurden, um diese bei der nachfolgenden Regression anstelle der Variablen zu verwenden (vgl. Abschnitt 6.2.3). Im Folgenden werden die Grundsätze zur Modellinterpretation und Anwendung erklärt. Ergänzend werden in Abbildung 5.5 die Variablenauswahl, das Prinzip der Durchführung sowie die Faktorextraktion veranschaulicht. Da die Methode mit gängigen Statistikprogrammen durchführbar ist, wird für eine detailliertere Erläuterung auf RENCHER verwiesen (Rencher 2002, S. 380–407).

Input ist eine Ausgangsmatrix A_{ij} , die die Werte aller Variablen $1 - k$ für $1 - n$ Beobachtungen enthält. Um die Berechnung zu vereinfachen, wird A_{ij} in eine standardisierte Matrix Z_{ij} umgewandelt, vgl. Formel (13), (14). Dabei wird die Differenz zwischen dem jeweiligen Wert der j -ten Variable einer Beobachtung i (x_{ij}) und dem Mittelwert aller Beobachtungswerte der j -ten Variable (\bar{x}_j) durch die Standardabweichung der j -ten Variable (s_j) dividiert (Backhaus et al. 2016, S. 394).

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (13)$$

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \rightarrow Z_{ij} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1k} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nk} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Für die Anwendung eignen sich nur Variablen, bei denen die Prüfgröße KMO größer als 0,5 ist. Diese beschreibt, in welchem Umfang Ausgangsvariablen zusammengehören und kann für jede Variable von der Diagonalen einer Anti-Image-Korrelationsmatrix abgelesen sowie für die gesamte Korrelationsmatrix berechnet werden (Backhaus et al. 2016, S. 399). Die Variablen j und die Faktoren f können geometrisch als Vektoren interpretiert werden, die in einem Koordinatensystem zueinander in Beziehung stehen. Diese Zusammenhänge können durch

Faktorladungen beschrieben und in einer Faktorladungsmatrix F_{jf} erfasst werden (Backhaus et al. 2016, S. 402–409). Durch spaltenweises Aufsummieren der quadrierten Faktorladungen werden die Eigenwerte λ_f der Faktoren berechnet. Diese sind ein Maß für die Varianz des Ausgangsdatensatzes, die der Faktor f erklärt. In der Hauptkomponentenanalyse werden nur Faktoren mit einem Eigenwert > 1 berücksichtigt, da jene mit einem geringeren Varianzklärungsanteil weniger Varianz erklären als eine einzelne Variable (Backhaus et al. 2016, S. 415). Unterstützend wird ein Scree-Test durchgeführt. Dabei werden die Eigenwerte absteigend geordnet. An der Stelle, an der die Differenz der Eigenwerte von zwei Faktoren am höchsten ist, entsteht ein Knick und nur die Faktoren links davon werden extrahiert und damit berücksichtigt (Backhaus et al. 2016, S. 416). Ab einer Faktorladung $fl_{ij} > 0,5$ wird ein Zusammenhang zwischen Variable und Faktor unterstellt (Backhaus et al. 2016, S. 418). Zur besseren Interpretation der Faktorladungen wird das Koordinatensystem um den Ursprung gedreht und es entsteht eine rotierte Faktorladungsmatrix. Um die Unkorreliertheit zwischen den einzelnen Faktoren zu bewahren, werden orthogonale Rotationsverfahren gewählt. Die Varimax-Rotation ist am weitesten verbreitet und z.B. in SPSS implementiert (Backhaus et al. 2016, S. 419).

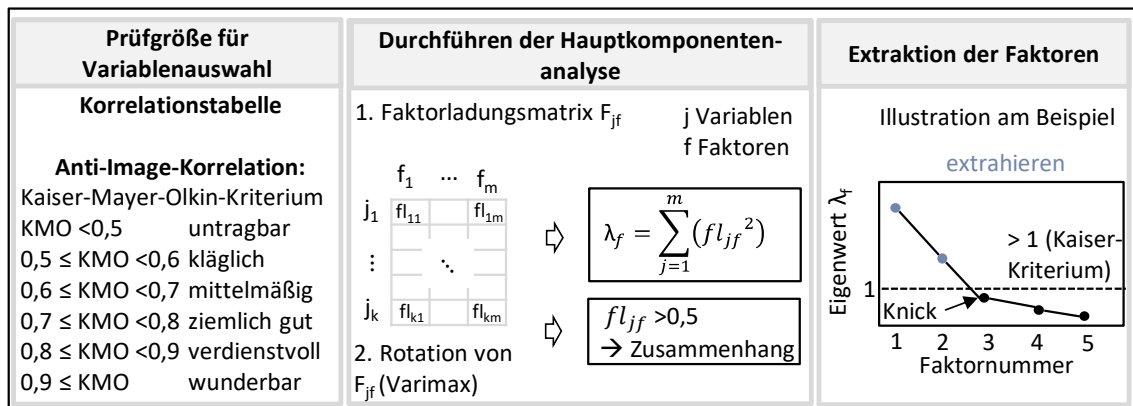


Abbildung 5.5: Hauptkomponentenanalyse: Variablenauswahl, Durchführung, Faktorextraktion (in Anlehnung an Backhaus et al. 2016, S. 399–419)

Schätzen der Faktorwerte für die Weiterverarbeitung

Die Hauptkomponentenanalyse dient in dieser Dissertation als Zwischenschritt, um stellvertretend für einige unabhängige Variablen Faktoren für die nachfolgende

Regressionsanalyse zu verwenden. Die dafür erforderlichen Faktorwerte (als Ersatz für die Variablenwerte) werden wiederum über Regressionen geschätzt. Die Regressionskoeffizienten zwischen den Variablen 1 - k und den Faktoren 1 - m werden in der Koeffizientenmatrix der Faktorwerte βf zusammengefasst.

$$\beta f = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \dots & \beta_{1m} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{k1} & \beta_{k2} & \dots & \beta_{km} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Die prognostizierten Faktorwerte f_w der einzelnen Beobachtungen werden durch Multiplikation der standardisierten Beobachtungswerte (Matrix Z, vgl. Formel (13) mit der Koeffizientenmatrix βf berechnet, vgl. Formel (16) (Backhaus et al. 2016, S. 421).

$$f_w = Z * \beta f \quad (16)$$

Bei jedem neuen Beobachtungswert erfolgt die Standardisierung der Werte aller Variablen 1 - k gemäß Formel (13) und anschließend die Schätzung der Faktorwerte f_w entsprechend Formel (16).

5.2.3 Wahrscheinlichkeitsverteilungen und statistische Schätzmethoden

In diesem Abschnitt werden die für die Arbeit notwendigen Grundlagen zu diskreten und stetigen Verteilungen, statistischen Schätzmethoden sowie zur PERT-Schätzung und Monte-Carlo-Simulation vermittelt.

Diskrete Verteilungen

In der Dissertation werden Daten hinsichtlich unterschiedlicher Merkmale analysiert. Ein Merkmal ist entweder diskret oder stetig; diskret bedeutet, dass die Anzahl an Ausprägungen abzählbar ist, wie etwa die Änderungsanzahl eines Bauteils (Fahrmeir et al. 2016, S. 15). Diskrete Verteilungen sind beispielsweise die Bernoulli- und die Binomialverteilung. Die Bernoulli-Verteilung beschreibt für eine Zufallszahl x die Wahrscheinlichkeit $p(x) = 1$ für das Eintreten eines Ereignisses und die Wahrscheinlichkeit $q(x) = 1 - p(x)$ für das Eintreten des

Gegenereignisses bei der einmaligen Durchführung eines Versuchs mit zwei möglichen Ausgängen, etwa bei einem Münzwurf (Mun 2008, S. 901). Die Binomialverteilung beschreibt die Durchführung n voneinander unabhängiger Bernoulli-Experimente, wobei die Wahrscheinlichkeit $p(x) = 1$ für das Eintreten eines Ereignisses bei jedem Experiment gleich ist (Mun 2008, S. 902). Neben der Punktschätzung der Wahrscheinlichkeit kann zudem ein Konfidenzintervall bestimmt werden, welches angibt, dass bei einem bestimmten Prozentsatz der Wiederholungen des Experiments der wahre Wert p innerhalb des Intervalls liegt (Montgomery 2011, S. 271). Da die Binomialverteilung an eine Normalverteilung approximiert wird, kann das $z_{\alpha/2}$ -Quantil verwendet werden, vgl. Formel (17) (Montgomery 2011, S. 271).

$$\hat{p} - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{n}} \leq p \leq \hat{p} + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{n}} \quad (17)$$

Stetige Verteilungen

Kann ein Merkmal alle Werte eines Intervalls annehmen, ist es stetig (Fahrmeir et al. 2016, S. 15). Für diese Arbeit relevante stetige Verteilungen sind die Normalverteilung, Lognormalverteilung und Betaverteilungen (Abbildung 5.6). Die Normalverteilung gilt als bedeutendste Wahrscheinlichkeitsverteilung, da sie viele natürliche Phänomene beschreibt. Sie ist definiert durch den Mittelwert \bar{x} , der zugleich den Erwartungswert $E(X) = \hat{\mu}$ darstellt und die Standardabweichung $\hat{\sigma}$, welche die symmetrische Streuung der Zufallswerte um den Mittelwert beschreibt. Ein Zufallswert ist mit größerer Wahrscheinlichkeit nahe dem Mittelwert als weit davon entfernt (Mun 2008, S. 913). Dies zeigt sich auch im Prognoseintervall einer neuen normalverteilten Beobachtung x_0 bei einer Stichprobengröße n und dem t-Quantil $t_{\alpha/2, n-1}$, vgl. Formel (18) (Montgomery 2011, S. 275).

$$\hat{\mu} - t_{\alpha/2, n-1} \hat{\sigma} \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \leq x_0 \leq \hat{\mu} + t_{\alpha/2, n-1} \hat{\sigma} \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (18)$$

	Eigenschaften und Anwendungsfälle	Wichtige Parameter
Normalverteilung	<ul style="list-style-type: none"> - Symmetrisch; Zufallswerte $x \in]-\infty; \infty[$ - Beispiele: IQ, Körpergrößen je Geschlecht 	<ul style="list-style-type: none"> - $\hat{\mu}, \hat{\sigma}$ $E(X) = \hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Lognormalverteilung	<ul style="list-style-type: none"> - Rechtsschief; Zufallswerte $x \in [0; \infty[$ - Verwenden, wenn Variationskoeffizient $> 0,3$ bzw. $> 0,5$ - Natürlicher Logarithmus führt zu Normalverteilung - Beispiele: Aktienpreise, Immobilienpreise 	<ul style="list-style-type: none"> - $\hat{\mu}, \hat{\sigma}$ $E(X) = e^{\left(\hat{\mu} + \frac{\hat{\sigma}^2}{2}\right)}$ Median $= E(X_{geom}) = e^{\hat{\mu}}$
Betaverteilung	<ul style="list-style-type: none"> - Zwei feste Grenzen; i.d.R. Zufallswerte $x \in [0; 1]$ - Kann unterschiedliche Formen annehmen, je nachdem welche Werte α und β annehmen. - Beispiele: %-Werte 	<ul style="list-style-type: none"> - α, β $E(X) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$

Abbildung 5.6: Eigenschaften, Anwendungsfälle und Parameter ausgewählter stetiger Verteilungen (in Anlehnung an Mun 2008; Taagepera 2008)

Die Lognormalverteilung ist über die Parameter $\hat{\mu}$ und $\hat{\sigma}$ definiert und beschreibt positive, rechtsschief verteilte Zufallswerte. Sie soll verwendet werden, wenn der Variationskoeffizient ($\hat{\sigma}/\hat{\mu}$) der Normalverteilung größer als 0,3 (Mun 2008, S. 912) bzw. 0,5 (Taagepera 2008) ist. Die meisten Zufallswerte liegen nahe an der unteren Grenze und es existieren nur wenige sehr hohe Werte, die zur Erhöhung des Erwartungswertes $E(X)$ beitragen. Daher wird zudem häufig der geometrische Mittelwert $E(X_{geom})$ gebildet, der zugleich der Median ist – also der Wert, bei dem 50 % der Zufallswerte darunter und 50 % darüber liegen (Mun 2008, S. 912).

Eine flexible Verteilung für positive Zufallswerte mit zwei festen Grenzen ist die Betaverteilung, die häufig für Prozentdaten verwendet wird. Die beiden Parameter α und β definieren Grenzen und Form der Verteilung sowie den Erwartungswert $E(X)$. (Mun 2008, S. 907)

Statistische Schätzmethoden

Die Parameter einer empirischen Verteilung können ausgehend von einer Stichprobe mit statistischen Schätzverfahren wie der Momenten-Methode und der Maximum-Likelihood-Methode (ML) ermittelt werden. Da der ML-Schätzer effizienter ist, also eine geringere Varianz zum Erwartungswert aufweist, wird er bevorzugt eingesetzt und auch in dieser Dissertation verwendet (Montgomery 2011, S. 239). Das Prinzip beruht darauf, dass bei einer Zufallsvariable X mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(x; \theta)$ und den Beobachtungswerten

x_1, x_2, \dots, x_n der unbekannte Parameter θ so geschätzt wird, dass die Likelihood-Funktion $L(\theta) = f(x_1; \theta) f(x_2; \theta) \dots f(x_n; \theta)$ maximiert wird (Montgomery 2011, S. 239). Mit einem Kolmogorov-Smirnov-Test kann anschließend überprüft werden, wie gut die empirische Verteilung der Beobachtungswerte eines Datensets mit der theoretischen Verteilung übereinstimmt, wobei die Nullhypothese von einer Übereinstimmung ausgeht (Massey 1951). Der Test kann für unterschiedliche Verteilungsarten in Matlab mit der Funktion `kstest` aufgerufen werden (Hausenblas 2018, S. 120).

PERT zur Schätzung einer Betaverteilung, auf Basis von Experteneinschätzungen

Neben historischen Daten wird in der Dissertation auch auf Experteneinschätzungen zurückgegriffen. Die von MALCOLM entwickelte PERT-Methode berücksichtigt die Unsicherheit von Experteneinschätzungen (Malcolm 1959). Anhand des wahrscheinlichsten Wertes m , des denkbar niedrigsten Wertes a , sowie des höchst denkbaren Wertes b wird eine Verteilung approximiert, welche die Form einer Betaverteilung hat und zwischen 0 und ∞ definiert ist (Malcolm 1959, S. 652). Die Parameter α und β werden über Formel (19) und (20) berechnet (Plehn 2017, S. 106).

$$\alpha = \frac{2}{3} \frac{b + 4m - 5a}{b - a} \left(1 + \frac{4(m - a)(b - m)}{(b - a)^2} \right) \quad (19)$$

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{5b - 4m - a}{b - a} \left(1 + \frac{4(m - a)(b - m)}{(b - a)^2} \right) \quad (20)$$

Zur Herleitung sei auf (Malcolm 1959, S. 651–652) und (Plehn 2017, S. 104–106) verwiesen.

Erzeugen von Zufallszahlen und Monte Carlo Simulation

Ist die Verteilung eines Merkmals bekannt, können Pseudo-Zufallszahlen erzeugt werden, die der Verteilung folgen, um diese zu approximieren (Nahrstedt 2015, S. 2). Das Prinzip basiert auf dem Gesetz der großen Zahlen, welches beschreibt, dass bei einer hinreichenden Anzahl an Zufallszahlen das Ergebnis der Zufallsexperimente immer mehr dem theoretisch erwartbaren Ergebnis entspricht (Nahrstedt 2015, S. 2). Unter den vorhandenen Zufallsgeneratoren gilt der Mersenne-Twister-Generator als besonders gut. Er ist in Statistiksoftware wie R und Matlab implementiert (Müller-Gronbach et al. 2012, S. 3). Bei einer Monte-Carlo-Simulation wird ein Modell möglicher Ausprägungen einer abhängigen

Variable erstellt, indem die Wahrscheinlichkeitsverteilung nicht-konstanter Ausprägungen der unabhängigen Variablen genutzt wird (IBM Cloud Education 2020). Die Approximation des zu erwartenden Ergebnisses erfolgt durch mehrmaliges Generieren von jeweils neuen Zufallszahlen der abhängigen Variablen (IBM Cloud Education 2020). Zufallszahlen bzw. Monte-Carlo-Simulationen werden in den Abschnitten 6.2, 6.3 und 6.4 angewandt.

5.3 Methoden der Kostenschätzung und Kurzkalkulation

Während die Selbstkosten alle beim Kostenträger entstehenden Kosten umfassen, sind Herstellkosten direkt dem Herstellungsprozess eines Produkts zuordenbar und beinhalten beispielsweise keine Entwicklungskosten, vgl. Abbildung 5.7 (Ehrlenspiel et al. 2014, S. 7). Die in der Arbeit quantifizierten Änderungskosten für Werkzeuge und Arbeitsvorbereitung sowie Zusatzkosten einer Änderung beeinflussen die Selbstkosten und zu Teilen die Herstellkosten.

Die zu entwickelnde Methode soll vor Entscheidung der Serientechnologie eingesetzt werden und unterschiedliche Kosten möglichst aufwandsarm quantifizieren (vgl. Anforderungen in 4.1). Daher werden im Folgenden **Methoden der Kostenschätzung und Kurzkalkulation** vorgestellt, die bereits in frühen Phasen eingesetzt werden und nur wenige Einflussgrößen berücksichtigen (Ehrlenspiel et al. 2014, S. 461–463). Abbildung 5.7 zeigt einen Überblick über die Methoden. Eine **Kostenschätzung durch Experten** ist schneller als eine Berechnung, muss aber auf Basis abrufbarer Erfahrung mit ähnlichen Bauteilen erfolgen, um eine entsprechende Schätzgenauigkeit zu erhalten (Ehrlenspiel et al. 2014, S. 464). In dieser Dissertation wird sie angewandt, wenn gesicherte empirische Daten für die Kalkulation fehlen. Bei einer **Suchkalkulation** werden auf Basis ähnlicher, bereits realisierter Objekte die Kosten eines neuen Produkts ermittelt. Hierfür müssen kostenbestimmende Vergleichsmerkmale identifiziert und diesbezüglich ähnliche Objekte identifiziert werden. Das Verfahren ist aufgrund der einfachen Anwendbarkeit in der Praxis verbreitet (Ehrlenspiel et al. 2014, S. 466) und wird auch in der Dissertation angewandt, vgl. Abschnitt 6.1. Sind die Kosten maßgeblich von einer Einflussgröße wie der Masse abhängig, kann die **Kostenermittlung über diese Einflussgröße** erfolgen (Ehrlenspiel et al. 2014, S. 467–469). Bei additiven Verfahren ist das

Bauteilvolumen entscheidend für die Herstellkosten (Rickenbacher et al. 2013; Möhrle 2018, S. 154), weshalb etwa bei der Vorselektion die **Volumenkostenmethode** verwendet wird (vgl. Abschnitt 6.1). Über **Bemessungsgleichungen** werden Zusammenhänge zwischen Kosten und wesentlichen (etwa technischen) Einflussgrößen in einer geschlossenen Formel erfasst (Ehrlenspiel et al. 2014, S. 470). In dieser Dissertation werden für die Kalkulation von Zusatzkosten Gleichungen aufgestellt, mit welchen die Höhe entsprechender Kosten kalkuliert wird (vgl. Abschnitt 6.4). Darüber hinaus sei die Verwendung von **Kostenfunktionen** erwähnt, wenn **mehrere Einflussgrößen für die Höhe der Kosten** verantwortlich sind und deren Einflussstärke beispielsweise über lineare Regressionen bestimmt werden kann (Ehrlenspiel et al. 2014, S. 470–477).

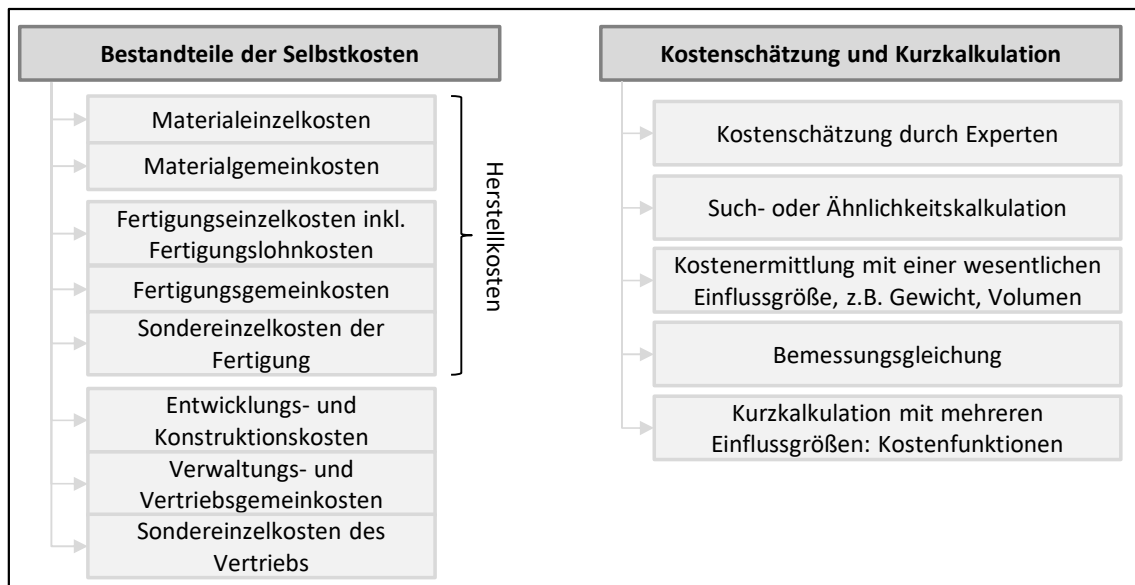


Abbildung 5.7: Bestandteile der Selbstkosten (links: in Anlehnung an Schlink 2017, S. 181) und Methoden zur Kostenschätzung und Kurzkalkulation (rechts: in Anlehnung an Ehrlenspiel et al. 2014, S. 466–477)

6 Detaillierung der Methode

In diesem Kapitel erfolgt die Detaillierung der Gesamtmethode. In den Abschnitten 6.1 – 6.5 werden die fünf Schritte von Baustein 1 vorgestellt. Es wird beantwortet, wie das Änderungsverhalten von Bauteilen (Forschungsfrage 1) und die Änderungsflexibilität einer entsprechenden AM-Version a priori bewertet werden können (Forschungsfrage 2), um das Potenzial, das die Wahl der Fertigungstechnologie hinsichtlich Änderungsflexibilität im PEP hat, zu beurteilen. In Abschnitt 6.5 erfolgt die Berechnung einer Gesamtpotenzialzahl. Anhand von Baustein 2 wird in drei Schritten (Abschnitt 6.6 – 6.8) beurteilt, bei welchen Bauteilen AM aufgrund erforderlicher Änderungsflexibilität im weiteren Lebenszyklus die passende Fertigungstechnologie darstellt (Forschungsfrage 3).

6.1 Baustein 1: Schritt 1 – Vorselektion

Um die Anforderung einer aufwandsarmen Bewertung zu adressieren, erfolgt in Schritt 1 von Baustein 1 eine Vorselektion. Aus tausenden Bauteilen eines Fahrzeugs (Schedlbauer 2008, S. 23) sollen diejenigen vorselektiert werden, für die AM unter Beachtung der notwendigen Änderungsflexibilität als Serientechnologie technisch und wirtschaftlich mit erhöhter Wahrscheinlichkeit geeignet ist. Das dreistufige Vorgehen ist in Abbildung 6.1 veranschaulicht.

Da die Wirtschaftlichkeit additiver Herstellverfahren stückzahlabhängig ist, (vgl. Abbildung 2.6), sind Fahrzeugprojekte mit niedriger Stückzahl für die Anwendung der Methode zu bevorzugen. Ein Großteil der geometrischen Änderungen wird in weniger als einem Drittel aller Baugruppen durchgeführt (vgl. Abbildung 3.7). Aus diesem Grund wird in Stufe A zunächst ein Fokus auf Bauteile dieser Baugruppen gelegt. Damit wird die Anzahl der zu bewertenden Bauteile reduziert und die Wahrscheinlichkeit gesteigert, Bauteile zu bewerten, die Änderungen haben werden. Stand heute sind AM-Bauteile, verglichen zu konventionell hergestellten Bauteilen, mit zunehmendem Bauteilvolumen unwirtschaftlich (Schumacher

2022, S. 54). Daher werden in Stufe B Bauteile mit einer höheren Erfolgschance auf eine wirtschaftliche Herstellung über AM-Technologien identifiziert. Die bis dato vorhandenen Schwächen der AM-Technologien (vgl. Abbildung 2.5) führen dazu, dass nicht alle automobilen Serienbauteile technisch über AM realisierbar sind, weshalb in Stufe C eine Fokussierung auf technisch über AM herstellbare Bauteile erfolgt.

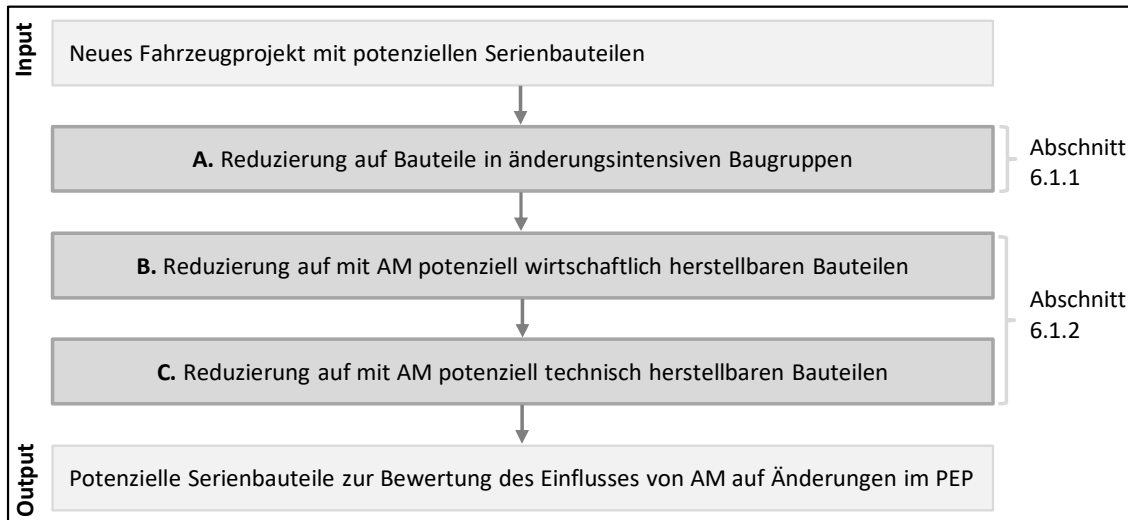


Abbildung 6.1: Baustein 1: Schritt 1 - Vorselektion

6.1.1 Reduktion auf Bauteile in Baugruppen mit häufigen Änderungen

Für ein neues Fahrzeugprojekt werden Bauteile aus Baugruppen mit potenziell vielen Änderungen gemäß dem in Abbildung 6.2 dargestellten Vorgehen selektiert. Hierfür werden zunächst Änderungsdaten aus n historischen Referenzprojekten extrahiert. Es wird eine **A-posteriori-Analyse** angewandt, da aus der Studie zu Änderungen im PEP bekannt ist, dass bestimmte Baugruppen, unabhängig vom Fahrzeugprojekt, viele geometrische Änderungen haben und daher eine Übertragbarkeit auf ein neues Fahrzeug möglich ist (vgl. Abbildung 3.7). Für jedes Referenzprojekt erfolgt zunächst eine separate Datenextraktion der Änderungsanträge mit den Attributen Antrags-ID, Status, Erstelldatum, Änderungskostenart, betroffene Bauteile und Baugruppenzuordnung der Bauteile. Die Daten werden durch

Anwendung von Filtern auf die relevante Datenmenge reduziert. Mit Filter 1, dem Status, wird die Datenmenge auf genehmigte Anträge begrenzt. Alle nicht genehmigten oder stornierten Änderungen werden so ausgeschlossen. Weiter werden nur Anträge ab der Bestellung der ersten Werkzeuge bis 18 Monate nach Serienstart ausgewählt (Filter 2). Änderungen davor sind im Sinne der Aufgabenstellung nicht relevant, Änderungen danach sind aufgrund der geringen Anzahl zu vernachlässigen (vgl. Abbildung 3.4). Informationen zur Änderungsart sind in Datenbanken nicht zwingend verfügbar (vgl. Studie 1, in Abschnitt 3.1). Um den Aufwand einer manuellen Kategorisierung von Änderungsarten zu umgehen, werden Änderungen mit Einfluss auf Werkzeugänderungskosten ausgewählt (Filter 3). Dies ist dadurch zu rechtfertigen, dass ein Großteil der Werkzeugänderungen ohnehin aufgrund geometrischer Bauteiländerungen durchgeführt wird (vgl. Abbildung 3.3) und daher bei Baugruppen mit vielen Werkzeugänderungen viele geometrische Änderungen zu erwarten sind. Baugruppen aus dem Bereich Antrieb werden ausgeschlossen, weil Antriebe nicht fahrzeugspezifisch entwickelt werden und einen anderen PEP haben (Filter 4). Nach der Fokussierung kann über Formel (21) die Summe der Bauteiländerungen $BT_{\ddot{A}_i}$ je Baugruppe BG_i berechnet werden (Berechnungsschritt 1).

$$\frac{\sum BT_{\ddot{A}_i}}{BG_i} \quad (21)$$

Die zweite Datengrundlage bildet die Stückliste des Referenzprojekts mit den Attributen Bauteil, Baugruppenzuordnung und Bauteilart. Äquivalent zu Filter 4 der Änderungsdaten erfolgt das Aussortieren der Bauteile aus den Antriebsbaugruppen über Filter 5. Außerdem werden Normteile, Halbzeuge sowie Hilfs- und Betriebsstoffe aussortiert (Filter 6). Diese verfügen über keine fahrzeugspezifischen Werkzeuge, sodass keine Werkzeugänderungen auftreten. Damit kann in Schritt 2 für jede Baugruppe i die Anzahl der relevanten Bauteile BT_i summiert werden.

$$\frac{\sum BT_i}{BG_i} \quad (22)$$

Der Quotient aus der Summe der Bauteiländerungen $\sum BT_{\ddot{A}_i}$ und der Anzahl der relevanten Bauteile einer Baugruppe $\sum BT_i$ ergibt die relative Änderungshäufigkeit einer Baugruppe $BG_{\ddot{A}H_i}$ des Referenzfahrzeugprojekts (Schritt 3).

$$BG_ÄH_i = \frac{\sum BT_Ä_i}{\sum BT_i} \quad (23)$$

Für n Referenzfahrzeuge, die die Baugruppe i enthalten, wird die mittlere relative Änderungshäufigkeit einer Baugruppe $\phi BG_ÄH_i$ über Formel (24) berechnet. Dabei werden für jede Baugruppe i die relativen Änderungshäufigkeiten $BG_ÄH_{ij}$ über alle $1 - n$ Referenzfahrzeuge, in denen die Baugruppe verbaut ist, aufsummiert und durch die Anzahl der Referenzfahrzeuge n dividiert (Schritt 4).

$$\phi BG_ÄH_i = \frac{\sum_{j=1}^n BG_ÄH_{ij}}{n} \quad (24)$$

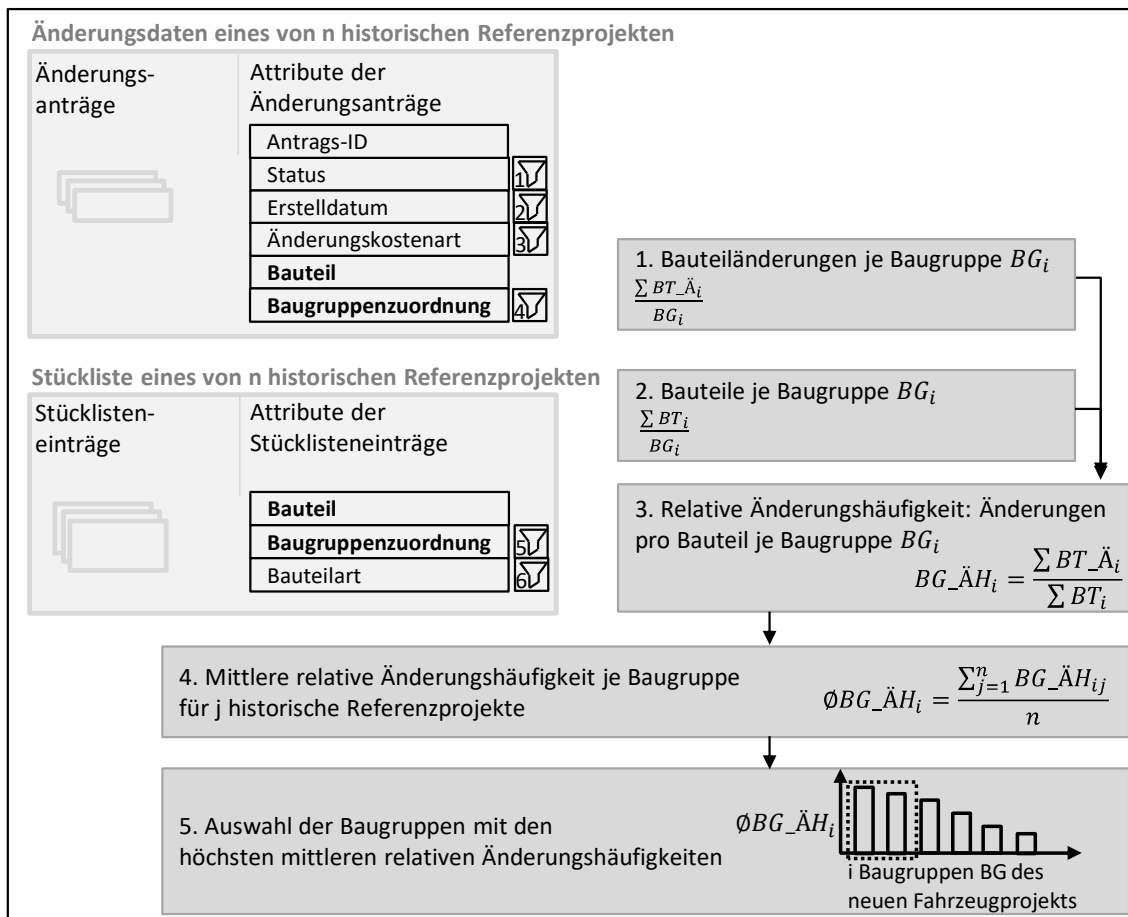


Abbildung 6.2: Fokussierung auf Bauteile in Baugruppen mit vielen Änderungen

Anschließend werden die Baugruppen anhand der mittleren relativen Änderungshäufigkeiten $\phi BG_ÄH_i$ absteigend sortiert. Unter Berücksichtigung der Studienergebnisse (Abbildung 3.7)

gilt die Empfehlung, das Drittel mit der höchsten mittleren Änderungshäufigkeit $\emptyset BG_ÄH_i$ zu fokussieren. Für alle Folgeschritte der Bewertung eines neuen Fahrzeugprojekts werden nur Bauteile aus diesen Baugruppen weiter betrachtet.

6.1.2 Reduktion auf AM-Potenzialbauteile

Da in frühen Phasen der Produktentstehung die Bauteile nicht vollständig auskonstruiert sind und keine finalen Herstellkosten vorhanden sind, wird eine **Suchkalkulation** durchgeführt. EHRENSPIEL ET AL. empfiehlt, bei Suchkalkulationen möglichst ähnliche Produkte zu verwenden (Ehrlenspiel et al. 2014, S. 466). Daher dient die Stückliste eines in Stückzahl, Segment und Fahrzeugart möglichst gut vergleichbaren Projekts als Datenbasis. Relevante Attribute der Stückliste sind Bauteilname, Masse, Material und Dichte, generische Bauteilnummer, Baugruppenzuordnung und Bauteilart. Für die Anwendung müssen Bauteile in einer Stückliste – am Beispiel einer Stoßstange erklärt – neben der Sachnummer eine generische Bezeichnung (z.B. Stoßstange) oder eine generische Nummer (z.B. 123456) haben, die für alle Fahrzeuge des Herstellers identisch ist. Diese dient als Primärschlüssel der Datenbank, um später vom Bauteil des Referenzprojekts auf das Bauteil des neuen Fahrzeugprojekts zu schließen. Über Filter 1 werden die Bauteile aus Baugruppen mit geringer Änderungshäufigkeit ausgeschlossen, über Filter 2 Normteile, Halbzeuge und Hilfs- und Betriebsstoffe. Außerdem sollen nur Einzelbauteile ausgewählt werden, da bei Zusammenbauten die **Volumenkostenmethode**, mit der die **Suchkalkulation** kombiniert wird, nicht geeignet ist. Die Volumenkosten werden auch bei SCHUMACHER als ein Mittel zur Selektion von AM-Potenzialbauteilen erwähnt (Schumacher 2022, S. 67–72). Für alle übrigen k Bauteile werden in Schritt 1 die Volumina V_BT_k aus dem Quotient der Masse m_k und der Dichte ρ_k berechnet.

$$V_BT_k = \frac{m_k}{\rho_k} \quad (25)$$

Anschließend werden für diese Bauteile in Schritt 2 die Herstellkosten HK_BT_k aus der Einkaufsdatenbank des Referenzprojekts ermittelt und in Schritt 3 die Volumenkosten der

werkzeuggebundenen Bauteile VK_WG_k aus dem Quotienten der Herstellkosten HK_BT_k und des Volumens V_BT_k berechnet.

$$VK_WG_k = \frac{HK_BT_k}{V_BT_k} \quad (26)$$

Für eine aufwandsarme Berechnung wird das Volumen als einzige Kosteneinflussgröße verwendet. Rechtzufertigen ist dies durch den starken Einfluss auf die Herstellkosten eines AM Bauteils (Rickenbacher et al. 2013; Möhrle 2018, S. 154). Für jedes Material ist ein Volumenkostenwert VK_AM_m in der Einheit €/cm³ durch die AM-Experten anzugeben. Abhängig vom Material wird jedem Bauteil k so ein Wert für die Volumenkosten VK_AM_k zugeschrieben (Schritt 4).

$$VK_AM_k = VK_AM_m \quad (27)$$

Über den Quotienten aus der Differenz zwischen werkzeuggebunden VK_WG_k und additiven VK_AM_m Volumenkosten des Bauteils und den werkzeuggebundenen Volumenkosten VK_WG_k wird in Schritt 5 ein Volumenkostenvergleichsfaktor VK_V_k berechnet, welcher, je Bauteil k , eine Aussage über den relativen Volumenkostenunterschied der beiden Technologien trifft.

$$VK_V_k = \frac{VK_WG_k - VK_AM_k}{VK_WG_k} \quad (28)$$

AM Technologien verfügen über Vorteile gegenüber werkzeuggebundenen, woraus sich Potenziale wie Änderungsflexibilität oder Gewichtsreduktion ergeben, vgl. Abbildung 2.5. Diese tragen dazu bei, dass Herstellkosten eines AM-Bauteils jene der werkzeuggebundenen Version übersteigen dürfen und AM dennoch das bessere Gesamtkonzept darstellen kann. Außerdem ist bei der Übertragung von Volumenkosten des Referenzprojekts auf ein neues Fahrzeugprojekt eine Abweichung zu erwarten, da Bauteile und Kosten auch bei sehr hoher Ähnlichkeit nicht identisch sind. Daher wird ein Toleranz-Bereich mit +/- x % festgelegt. Damit wird definiert, bis zu welchem Volumenkostenvergleichsfaktor VK_V_k zwischen AM und werkzeuggebundenen Volumenkosten Bauteile als Fokusbauteile gelten und für den Technologievergleich eines neuen Fahrzeugs weiter berücksichtigt werden (Schritt 6). Über den Schlüssel der generischen Bauteilnummer werden die Fokusbauteile des neuen Projekts identifiziert und von AM-Experten auf technische Herstellbarkeit überprüft (Schritt 7). Für

Bauteile, die der Überprüfung standhalten, erfolgt nachfolgend die Prognose des Änderungsverhaltens, vgl. Abschnitt 6.2.

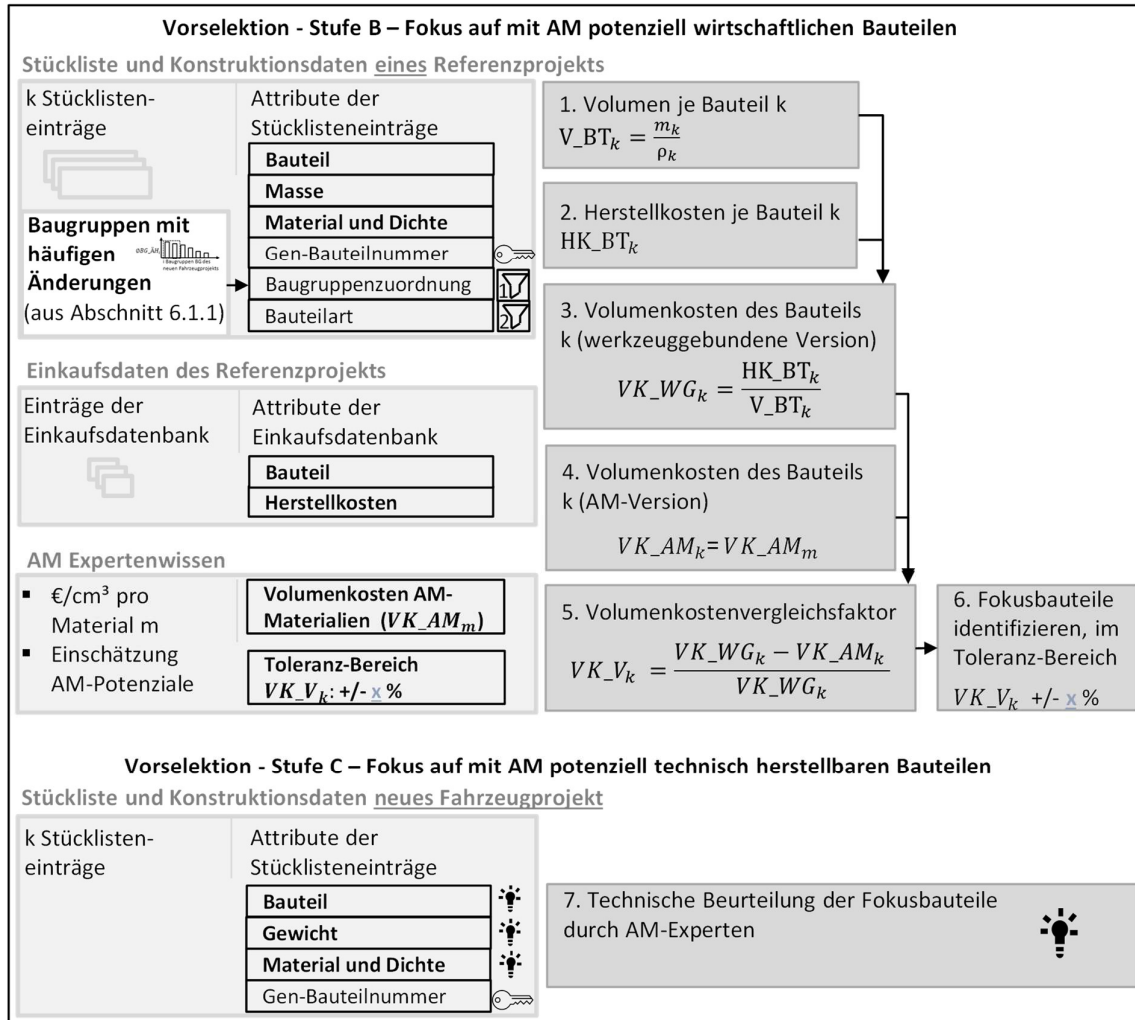


Abbildung 6.3: Fokus auf mit AM potenziell wirtschaftlichen und technisch herstellbaren Bauteilen

6.2 Baustein 1: Schritt 2 – Prognose des Änderungsverhaltens der werkzeuggebundenen Bauteilversion

Aufbauend auf einer Literaturanalyse (Abschnitt 2.2) und einer empirischen Studie zu Änderungen im PEP des Automobilbaus (Abschnitt 3.1) wird in diesem Abschnitt ein Modell zur Prognose des geometrischen Änderungsverhaltens einer werkzeuggebundenen

Bauteilversion entworfen. Aufgrund der umfangreichen Verfügbarkeit von Änderungsdaten (Köhler 2009, S. 64) wird ein empirisches Vorgehen gewählt (siehe Abbildung 6.4). Das Vorgehen ist an den Stufen der Prognose nach ARMSTRONG und dem generischen Ablauf eines Forschungsprojekts nach RIESENHUBER angelehnt (Armstrong 2001, S. 8; Riesenhuber 2007, S. 4). Es ist auf andere Automobilhersteller übertragbar und die empirischen Erkenntnisse zeigen eine neue Perspektive auf die Forschung zu Änderungen, indem explizit geometrische Bauteiländerungen im PEP analysiert werden.

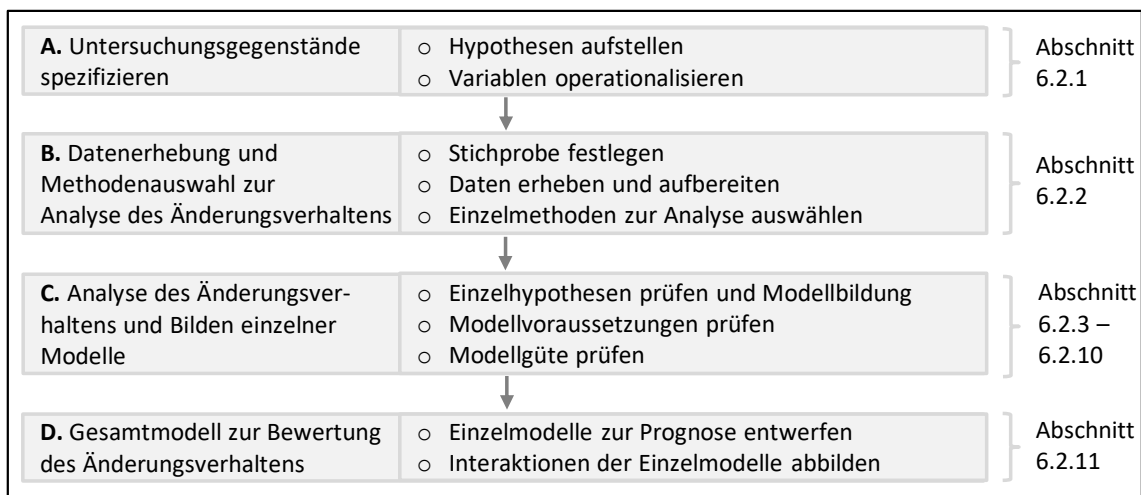


Abbildung 6.4: Vorgehen zur empiriebasierten Prognose des Änderungsverhaltens der werkzeuggesteuerten Bauteilversion

Zunächst sollen die Untersuchungsgegenstände, also die unabhängigen Variablen und Zielvariablen, spezifiziert werden. Dafür werden Hypothesen aufgestellt und die entsprechenden Variablen operationalisiert, d.h. messbar gemacht (Abschnitt 6.2.1). Daraufhin werden die notwendigen Daten erhoben und einzelne Methoden ausgewählt, um das Bauteiländerungsverhalten zu analysieren (Abschnitt 6.2.2). Im Rahmen der Analyse und der Modellbildung (Abschnitte 6.2.3 - 6.2.10) werden die Hypothesen überprüft und Modelle für die einzelnen Bestandteile des Änderungsverhaltens erstellt. Das Änderungsverhalten eines Bauteils wird gegliedert in das Auftreten von Änderungen, die fertigungsspezifischen Änderungskosten, den spätesten Änderungszeitpunkt im PEP sowie die fertigungsspezifische Änderungsdauer. Je Modell werden die Modellvoraussetzungen und die Güte überprüft. Anschließend werden die entworfenen Modelle in Abschnitt 6.2.11 in Prognosemodelle

überführt und die Interaktionen zwischen den einzelnen Modellen aufgezeigt. Dadurch ist eine gesamthafte Prognose des Änderungsverhaltens einer werkzeuggebundenen Bauteilversion möglich. Die Bestimmung der Prognosegüte der einzelnen Modelle erfolgt nicht in diesem Kapitel, sondern im Zuge der Ergebnisvalidierung in Abschnitt 7.1.2. Während das in Abschnitt 6.2 skizzierte Vorgehen allgemeingültig anwendbar ist, sollten die identifizierten Wirkzusammenhänge bei anderen OEMs möglichst reproduziert werden, bevor sie dort angewandt werden.

6.2.1 Spezifizieren der Untersuchungsgegenstände

Basierend auf den in der Literatur identifizierten Ursachen (vgl. Abschnitt 2.2.4) und Auswirkungen technischer Änderungen (vgl. Abschnitt 2.2.5) sowie den Erkenntnissen der Studie zum Änderungsverhalten im PEP (vgl. Abschnitt 3.1.2) wurde ein theoretisches Erklärungsmodell zum Änderungsverhalten von Bauteilen erstellt (vgl. Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7). Das theoretische Erklärungsmodell gilt speziell für geometrische Bauteiländerungen im PEP von Automobilen, wie sie in Abschnitt 2.2.2 definiert sind, und wird in den Abschnitten 6.2.3 bis 6.2.10 für Einzelbauteile empirisch überprüft. Abschnitt 6.2.11 enthält die daraus entstandenen Prognosemodelle. Die Entwicklung des theoretischen Erklärungsmodells und die Operationalisierung erfolgten zu Teilen im Rahmen der Betreuung der Studienarbeiten von BAUCH und SYKORA (Bauch 2020; Sykora 2021).

Die geometrische (GV) und funktionale Verknüpfung (FV) mit anderen Bauteilen erhöht die Gefahr einer Änderungsausbreitung (Hamraz et al. 2015). Die Funktionale Komplexität (FK), die Werkzeugkosten (WKZ) und die Masse (m) beschreiben die Bauteilkomplexität und Bedeutsamkeit und beeinflussen damit die Dringlichkeit der Änderungsumsetzung. Die Informationsunsicherheit wird durch eine niedrige Prognosegüte in der virtuellen Erprobung (PG) sowie einem hohen Neuheitsgrad (N) des Bauteils ausgedrückt. Mit der Variable Großserienprojekt (GS) wird die Art der Organisation operationalisiert. Ein Fahrzeugprojekt mit einer Stückzahl über 50.000 Einheiten gilt als Großserie. Die Grenze ist nicht trennscharf – es sollen vielmehr Manufakturen von Großserienproduktionen abgegrenzt werden. Weitere

Variablen sind die änderungstreibenden Anforderungen, die aus den Änderungsursachen (vgl. Abbildung 3.11) abgeleitet sind. Dazu zählt, ob ein Bauteil homologationsrelevant (HR), designrelevant (DR) oder crashrelevant (CR) ist, ein erhöhtes Montagerisiko und damit potenziell verbundene Probleme haben wird (RM), ein erhöhtes Risiko für akustische Auffälligkeiten (AA) hat oder eine Funktion zum Korrosionsschutz (FKS) erfüllt. Die Skalenniveaus sind für alle Bauteileigenschaften sowie die Zielvariablen in Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7 dargestellt. Likert-skalierte Daten werden, gemäß SULLIVAN, wie metrische behandelt (Sullivan et al. 2013).

Das **Auftreten geometrischer Änderungen** wird anhand von drei Zielvariablen operationalisiert. Die kategoriale Zielvariable der Wahrscheinlichkeit einer geometrischen Änderung (GÄ) beschreibt, ob ein Bauteil im PEP eine geometrische Änderung haben wird. Sie beschreibt, ob ein Bauteil im Zeitraum zwischen dem Zeitpunkt im PEP, zu dem die ersten Werkzeuge bestellt werden und 18 Monaten nach Serienstart eine geometrische Änderung mit Einfluss auf die Werkzeugkosten hat. Die Anzahl der Änderungen außerhalb dieses Betrachtungszeitraums ist vernachlässigbar (vgl. Studie in Abschnitt 3.1). Der Betrachtungszeitraum gilt für alle Zielvariablen. Die Wahrscheinlichkeit einer geometrischen Änderung (GÄ) wird mutmaßlich durch Änderungsausbreitung, erhöhte Bauteilkomplexität, Informationsunsicherheit, komplexe Organisationen (mutmaßlich in Großserienprojekten), sowie durch hohe änderungstreibende Anforderungen befeuert (vgl. Abschnitte 2.2.4, 2.2.5, 3.1.2). Zudem wird die kategoriale Zielvariable Änderungsintensität (ÄI) definiert. Sie gibt Auskunft, ob ein Bauteil mehr als eine geometrische Änderung im PEP haben wird und damit als änderungsintensiv gilt. Es gelten dieselben hypothetischen Wirkzusammenhänge wie für die Änderungswahrscheinlichkeit (GÄ). Die Änderungsanzahl (ÄA) beschreibt die Anzahl geometrischer Änderungen eines Bauteils im PEP. Sie wird nicht über kausale Zusammenhänge bestimmt.

Die **fertigungsspezifischen Änderungskosten** umfassen alle über den PEP entstehenden, metrisch skalierten Änderungskosten für Werkzeuge (WZÄK) und Arbeitsvorbereitung (AVÄK), wobei die WZÄK den Hauptanteil bilden (vgl. Studie in Abschnitt 3.1). Die Höhe der WZÄK im PEP steigt mutmaßlich mit zunehmender Änderungsausbreitung. Außerdem führt eine höhere

Komplexität potenziell zu kostenintensiveren Änderungen. Höhere WZÄK können auch aufgrund von Informationsunsicherheit (durch Neuheit des Bauteils oder geringe Prognosegüte in der virtuellen Erprobung) entstehen, weil die Änderung dadurch schwieriger umzusetzen ist (vgl. Abschnitt 2.2.5). Laut der Studie in Abschnitt 3.1 sind zudem die Werkzeugänderungskosten bei Bauteilen in Großserienfahrzeugen höher (vgl. Tabelle 3.2). Da änderungstreibende Anforderungen zu mehr Änderungen führen, sind auch dadurch höhere WZÄK zu erwarten (vgl. Abschnitte 2.2.4, 2.2.5). Die Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung (AVÄK) sind mutmaßlich vom Änderungsumfang abhängig. Da bei hohen Werkzeugänderungskosten (WZÄK) von einem hohen Änderungsumfang auszugehen ist, dürften die AVÄK von den WZÄK abhängig sein.

Der späteste Zeitpunkt im PEP, zu dem ein Antrag für eine geometrische Bauteiländerung gestellt wird (ÄZP), beschreibt, ob das Bauteil zu späten geometrischen Änderungen tendiert. Es wird vermutet, dass bei erhöhter Bauteilkomplexität Probleme später erkannt und daher Änderungen häufiger spät auftreten. Gleiches gilt bei hoher Informationsunsicherheit, die durch einen hohen Neuheitsgrads (N) oder eine niedrige Prognosegüte der virtuellen Erprobung (PG) entsteht (vgl. Abschnitt 2.2.5). Basierend auf der Zeitlichkeit der Änderungsursachen werden für crashrelevante Bauteile frühere Änderungen erwartet. Für Bauteile mit erhöhtem Risiko einer akustischen Auffälligkeit (AA) oder einer Funktion zum Korrosionsschutz (FKS) werden spätere Änderungen erwartet (vgl. Tabelle 3.3).

Die Zusatzkosten von Änderungen nach Serienstart (vgl. Abschnitt 6.4.2) hängen direkt von der **fertigungsspezifischen Änderungsdauer fÄD** eines Bauteils ab (vgl. Abschnitt 3.2.2). Einordnung und Bestandteile der fertigungsspezifischen Änderungsdauer sind in Abbildung 6.5 veranschaulicht. In Datenbanken ist die Dauer zwischen Änderungsfreigabe bis zum Zeitpunkt, zu dem die geänderte Version des Bauteils im Fahrzeugwerk eintrifft, erfasst. Über Terminpläne von Änderungen, die nur sehr vereinzelt vorliegen, ist bekannt, dass die fertigungsspezifische Dauer im Wesentlichen aus Werkzeugtransport, Werkzeugänderung sowie dem Wiederanlauf der Fertigung besteht. Die in der Datenbank erfasste Änderungsdauer umfasst darüber hinaus notwendige Prozesse vor einer Werkzeugänderung: Bestellprozesse durch den Einkauf, die Vorproduktion von Bauteilen, parallel zur

Werkzeugänderung laufende Änderungsaufgaben sowie der anschließende Bauteiltransport zum Fahrzeugwerk. Da, bis auf den Bauteiltransport, alle Bestandteile vom Änderungsumfang abhängen, dürfte die Höhe des fertigungsspezifischen Anteils der Änderungsdauer (fÄÄD) unabhängig von der Änderungsdauer ÄD selbst sein. Der Zusammenhang soll empirisch überprüft werden.

Es wird weiter vermutet, dass eine höhere Informationsunsicherheit zu einer längeren Änderungsdauer (ÄD) und damit zu einer längeren fertigungsspezifischen Änderungsdauer (fÄÄD) führt. Außerdem wird die Hypothese aufgestellt, dass in der Organisationseinheit eines Großserienprojekts mehr Kapazitäten zur Änderungsumsetzung zur Verfügung stehen und dadurch eine Bauteiländerung schneller umgesetzt wird. Eine höhere Bauteilkomplexität könnte zu einer längeren Änderungsdauer führen, weil ein höherer Aufwand zu erwarten ist. Die mit der Komplexität einhergehende höhere Bedeutung des Bauteils könnte hingegen die Dringlichkeit in der Umsetzung steigern und damit wiederum die Änderungsdauer verkürzen. Somit sind beide Wirkrichtungen denkbar. (vgl. Abschnitte 2.2.5)

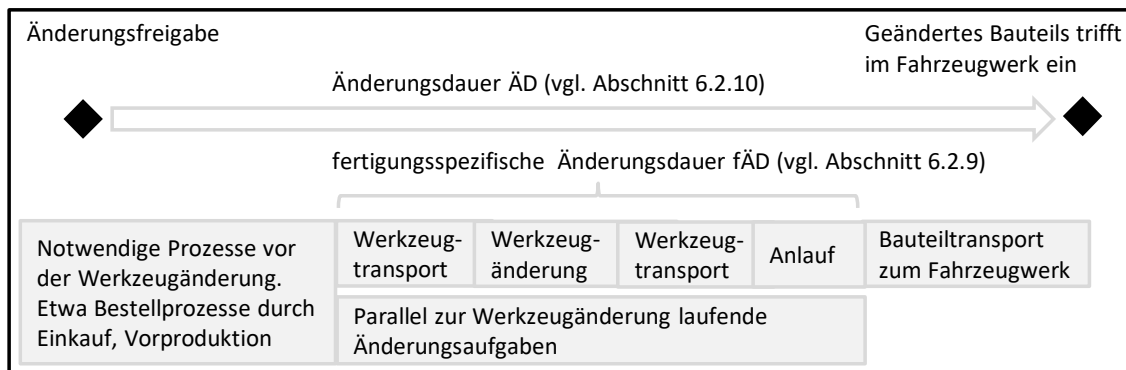


Abbildung 6.5: Operationalisierung der Änderungsdauer und der fertigungsspezifischen Dauer (entstanden aus der Analyse von Änderungsterminplänen)

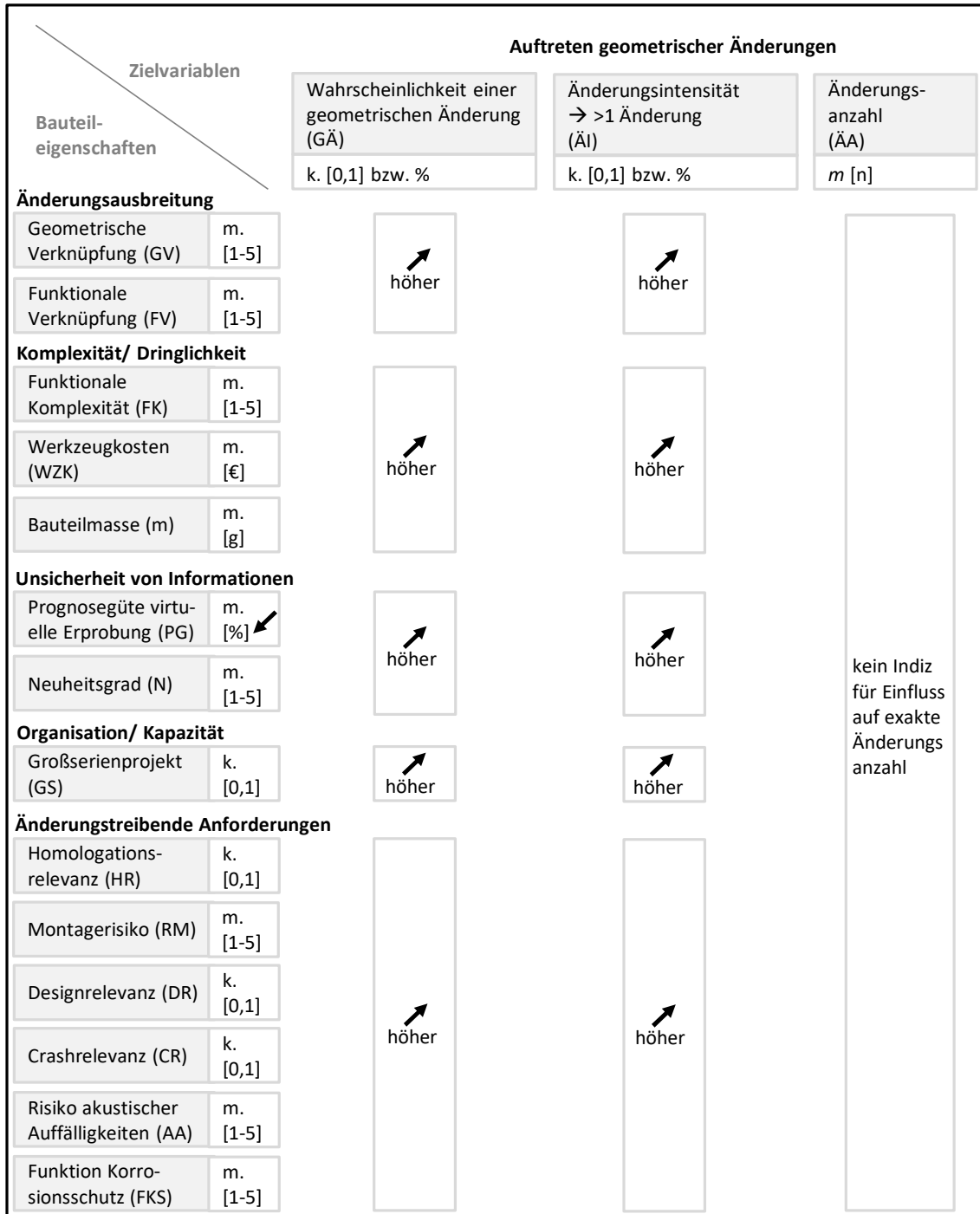


Abbildung 6.6: Hypothetisches Erklärungsmodell zum Bauteiländerungsverhalten – Teil 1

Zielvariablen Bauteileigenschaften		Fertigungsspezifische Änderungskosten		Zeitpunkt Änderung	Fertigungsspezifische Änderungsdauer fÄD (ab Serienstart)	
		Werkzeug (WZÄK) m. [€]	Arbeitsvorbereitung (AVÄK) m. [€]	Spätester Zeitpunkt (ÄZP) m. [MvS]	Änderungsdauer (ÄD) m. [d]	Fertigungsspezifischer Anteil (fÄÄD) m. [%]
Änderungsausbreitung						
Geometrische Verknüpfung (GV)	m. [1-5]	↑	WZÄK beeinflussen AVÄK	kein Indiz	kein Indiz	ÄD hat keinen Einfluss → gleich
Funktionale Verknüpfung (FV)	m. [1-5]	↑				
Komplexität/ Dringlichkeit						
Funktionale Komplexität (FK)	m. [1-5]		↑		Indizien für beides: ↕	
Werkzeugkosten (WZK)	m. [€]	↑		↑ später	↕ länger/kürzer	
Bauteilmasse (m)	m. [g]					
Unsicherheit von Informationen						
Prognosegüte virtuelle Erprobung (PG)	m. [%]	↓		↑ später	↑ länger	
Neuheitsgrad (N)	m. [1-5]	↑				
Organisation/ Kapazität						
Großserienprojekt (GS)	k. [0,1]	↑		kein Indiz	↓ kürzer	
Änderungstreibende Anforderungen						
Homologationsrelevanz (HR)	k. [0,1]			kein Indiz		
Montagerisiko (RM)	m. [1-5]					
Designrelevanz (DR)	k. [0,1]					
Crashrelevanz (CR)	k. [0,1]	↑		↓ früher		
Risiko akustischer Auffälligkeiten (AA)	m. [1-5]					
Funktion Korrosionsschutz (FKS)	m. [1-5]			↑ später		

Abbildung 6.7: Hypothetisches Erklärungsmodell zum Bauteiländerungsverhalten – Teil 2

6.2.2 Datenerhebung und Methodenauswahl zur Analyse

In Abbildung 6.8 sind unabhängige Variablen und Zielvariablen, die Art der Datenerhebung, eine Beschreibung der Stichprobe sowie die verwendeten Methoden zur Datenauswertung und Modellerstellung dargestellt.

Zielvariable (ZV)	Unabhängige Variablen (UV)	Art der Datenerhebung	Stichprobe	Methoden der Datenauswertung/Modellerstellung
Geometrische Änderung (GÄ)	Bauteileigenschaften	UV: Fragebogen ZV: Datenbank	N=223 Bauteile	PCA + Logistische Regression
Änderungsintensität (ÄI)	Bauteileigenschaften	UV: Fragebogen ZV: Datenbank	N= 105 Bauteile mit Änderungen	Logistische Regression
Änderungsanzahl (ÄA)	keine	ZV: Datenbank	N=63 Bauteile mit > 1 Änderungen	Deskriptive Auswertung
Werkzeug-Änderungskosten (WZÄK)	Bauteileigenschaften	UV: Fragebogen ZV: Datenbank	N= 105 Bauteile mit Änderungen	Lineare Regression
Arbeitsvorbereitungs-änderungskosten (AVÄK)	WZÄK	UV: Datenbank ZV: Datenbank	N= 67 geänderte „In-House“ Bauteile	Lineare Regression
Änderungszeitpunkt (ÄZP)	Bauteileigenschaften	UV: Fragebogen ZV: Datenbank	N=130 Bauteile mit Änderungen	Lineare Regression
Fertigungsspezifischer Anteil der Änderungsdauer (fÄÄD)	a. ÄD b. keine	UV: Datenbank ZV: Datenbank + Terminpläne	N=23 Änderungen in Serienfertigung mit Terminplan	a. Lineare Regression b. ML-Schätzung
Änderungsdauer in der Serienfertigung (ÄD)	Bauteileigenschaften	UV: Fragebogen ZV: Datenbank	N=30 Bauteile mit Änderungen in Serienfertigung	Lineare Regression

Abbildung 6.8: Änderungsverhalten: Art der Datenerhebung, Stichprobe und Datenauswertung

Die Werte der Zielvariablen werden, bis auf den fertigungsspezifischen Anteil der Änderungsdauer fÄÄD, welcher aus Terminplänen von Änderungen ermittelt wird, aus Datenbanken extrahiert. Die 14 Bauteileigenschaften (vgl. Abschnitt 6.2.1) werden über einen Fragebogen von Entwicklungsingenieuren für einzelne Bauteile befüllt. Anhang 11 zeigt den Fragebogen. Die Werte der Bauteileigenschaften sind metrisch (WZK, m, PG), Likert-skaliert von 1 bis 5 (GV, FV, FK, N, RM, AA, FKS) oder kategorial mit ja/nein (GS, DR, CR). Die kategorial-

skalierten Werte werden für die nachfolgende Datenauswertung in Dummy-Variablen mit 1/0-Ausprägungen transformiert.

Die Datenbasis bilden Bauteile aus drei unterschiedlichen Fahrzeugprojekten und Marken. Das kleinste Fahrzeug ist dem Segment C zuzuordnen, weshalb das Modell nicht für Fahrzeuge darunter anwendbar ist. Aufgrund dieser Fokussierung ist der Erhebungsaufwand handhabbar, denn für jedes Bauteil müssen die zuständigen Entwickler kontaktiert werden. Alle Fahrzeuge sind zum Erhebungszeitpunkt bereits mindestens 18 Monate in Serie, damit alle Auswirkungen auf die Zielvariablen erfasst werden können. Die Entwicklungsingenieure sollen die 14 Bauteileigenschaften mit dem Wissen befüllen, das sie in der Konzeptphase hatten, d.h. bevor Serientechnologien entschieden und Werkzeuge bestellt wurden. So ist die Anforderung einer Bewertung mit vorhandenem Wissen vor Technologieentscheid erfüllt. Insgesamt füllten 53 Entwicklungsingenieure einen Fragebogen aus.

Für die Modellbildung der Wahrscheinlichkeit einer geometrischen Änderung (**GÄ**) liegen die Variablenwerte von 223 Bauteile vor, wovon 105 Bauteile eine geometrische Änderung hatten. Da die Zielvariable kategorial ist (Änderung ja/nein), erfolgt die Datenauswertung durch eine logistische Regression. Der Regression geht eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) voraus, um die stark korrelierenden Bauteileigenschaften zu Faktoren zusammenzufassen (vgl. Abschnitt 5.2.2). Die Anwendung einer PCA kann grundsätzlich für alle Zielvariablen vor der Modellerstellung erwogen werden. Im Rahmen der durchgeführten Auswertungen konnte dadurch jedoch nur bei der Zielvariable der geometrischen Änderung (**GÄ**) ein Modell mit höherer Güte erzeugt werden. Daher wird die PCA bei den übrigen Modellen nicht angewandt. Auch für die Modellerstellung der Änderungsintensität (**ÄI**), ebenfalls kategorial skaliert (> 1 Änderung ja/nein), wird eine logistische Regression angewandt, basierend auf 105 später im PEP geometrisch geänderten Bauteilen. Ergänzend wird für 63 Bauteile mit mehr als einer geometrischen Änderung eine deskriptive Analyse der Änderungsanzahl (**ÄA**) durchgeführt. Das Prognosemodell der Werkzeugänderungskosten (**WZÄK**), eine metrische Zielvariable, wird auf Basis der 105 geänderten Bauteile über eine lineare Regression erstellt. Die Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung (**AVÄK**), ebenfalls metrisch skaliert, sind nur für in-house gefertigte Bauteile verfügbar. Daher wird für die Modellerstellung eine Datenbasis

von 67 vom OEM hergestellten und geometrisch geänderten Bauteilen verwendet. Über eine lineare Regression wird der Zusammenhang zwischen Werkzeugänderungskosten und den Arbeitsvorbereitungsänderungskosten analysiert. Bei der Modellbildung des spätesten Änderungszeitpunkts eines Bauteils (**ÄZP**) (metrisch skaliert) kann auf 130 geänderte Bauteile zurückgegriffen werden. Der Grund ist, dass für den ÄZP die Werkzeugkosten (WZK) keinen signifikanten Einfluss haben (vgl. Abschnitt 6.2.8). Daher können auch Bauteile in das Modell einbezogen werden, für welche die Entwicklungsingenieure den Fragebogen ausfüllten aber keine Werkzeugkosten nannten. Dies war bei 25 von 130 Bauteilen der Fall. Für die Modellbildung des fertigungsspezifischen Anteils der Änderungsdauer (**fAÄD**) werden 23 Terminpläne von Bauteiländerungen analysiert, die nach Serienstart umgesetzt wurden. In Schritt a wird über eine lineare Regression untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen Änderungsdauer (ÄD) und dem fertigungsspezifischen Anteil (fAÄD) besteht. Besteht kein Zusammenhang, wird in Schritt b über die Maximum-Likelihood-Methode der fertigungsspezifische Anteil (fAÄD) geschätzt, der fortfolgend unabhängig von der Änderungsdauer (ÄD) gilt. Über die Multiplikation der metrisch skalierten Änderungsdauer (ÄD) mit dem fertigungsspezifischen Anteil (fAÄD) kann folglich die fertigungsspezifische Änderungsdauer (fÄD) – die letztlich interessierende Zielvariable – prognostiziert werden. Die dafür notwendige Prognose der Änderungsdauer (ÄD) erfolgt über eine lineare Regression ausgehend von den Eigenschaften von 30 Bauteilen, bei denen geometrische Änderungen nach Start der Serienfertigung umgesetzt wurden. Der Umweg ist notwendig, weil die fertigungsspezifische Änderungsdauer nur in Terminplänen erfasst ist. Da diese selten vorhanden sind (23 Terminpläne bei der Durchsicht von mehreren hundert Änderungsanträgen), konnten die entsprechenden 14 Bauteileigenschaften nicht für exakt diese geänderten Bauteile von den Entwicklern erfasst werden, um direkt eine lineare Regression zwischen den 14 Bauteileigenschaften und der fertigungsspezifischen Änderungsdauer (fÄD) durchzuführen.

6.2.3 Modellbildung der Änderungswahrscheinlichkeit

Geometrische Verknüpfung (GV), Funktionale Verknüpfung (FV) und Funktionale Komplexität (FK) korrelieren nach COHEN bei den 223 zufällig ausgewählten Bauteilen mit $> 0,5$ stark (Cohen 1988, S.83). Gleiches gilt für die Werkzeugkosten (WK) und die Masse (m). Eine vollständige Korrelationstabelle ist in Anhang 12 abgebildet. Mit einem KMO $> 0,5$ sind alle fünf Variablen für eine Hauptkomponentenanalyse geeignet. Siehe dazu die Anti-Image-Korrelationsmatrix sowie die detaillierte Beurteilung der Eignung in Anhang 12. Durch die Hauptkomponentenanalyse werden die fünf Eigenschaften auf zwei Faktoren reduziert, deren Eigenwerte $\lambda_f > 1$ sind. Die Faktoren erklären eine Gesamtvarianz von 81,1 % der fünf Eigenschaften (Visualisierung von Kaiser-Kriterium und Scree-Test in Anhang 13). Ein Zusammenhang nach BACKHAUS ET AL. besteht zwischen Faktor 1 und GV, FV und FK (Backhaus et al. 2016, S.418) – nachfolgend als Funktions- und Schnittstellenkomplexität (Fkt1. FSK) bezeichnet. Faktor 2 – als Werkzeugkomplexität (Fkt.2 WK) bezeichnet – korreliert mit WZK und m (Bauch 2020, S. 75–78). Initiale und rotierte Faktorladungsmatrizen sind in Anhang 13 abgebildet. Tabelle 6.1 zeigt die Matrix der Regressionskoeffizienten der Faktorwerte $\beta f_{G\ddot{A}}$. Werden die Werte der fünf Bauteileigenschaften standardisiert – über Formel (13), (14) und mit der Matrix $\beta f_{G\ddot{A}}$ multipliziert – über Formel (16) – entstehen je Bauteil die Faktorenwerte, die in der nachfolgenden logistischen Regression verwendet werden.

Tabelle 6.1: Änderungswahrscheinlichkeit – Koeffizientenmatrix der Faktorwerte (Bauch 2020, S. 78)

Regressionskoeffizientenmatrix der Faktorwerte βf		
Variable	Faktor	
	Fkt1. FSK	Fkt2. WK
GV	0,411	-0,068
FV	0,432	-0,110
FK	0,362	0,014
WZK	-0,080	0,532
m	-0,076	0,530

Extraktion: Hauptkomponentenanalyse. Rotation: Varimax mit Kaiser-Normalisierung.

Zunächst werden die **Einzelhypothesen** über die Wald-Statistik überprüft, indem jeweils binär logistische Regressionen zwischen Bauteileigenschaften bzw. Faktoren und der Änderungswahrscheinlichkeit (GÄ) durchgeführt werden. Das Ergebnis ist in Tabelle 6.2

abgebildet, die dazugehörigen Regressionskoeffizienten und Wald-Statistiken in Anhang 14. Die Prognosegüte der virtuellen Erprobung (PG), das Risiko akustischer Auffälligkeiten (AA) sowie die Erfüllung einer Funktion zum Korrosionsschutz (FKS) haben auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ keinen signifikanten Einfluss auf das Auftreten einer geometrischen Änderung (GÄ). Für die Erstellung des Gesamtmodells bleiben sie daher unberücksichtigt. Zur präventiven Vermeidung von Multikollinearität (Voraussetzung einer logistischen Regression, siehe Abschnitt 5.2.1) werden die fünf Variablen (GV, FV, FK, WZK, G) durch die ebenfalls signifikanten Faktoren (Fkt1. FSK und Fkt2. WK) ersetzt. (Bauch 2020, S. 78–80)

Tabelle 6.2: Änderungswahrscheinlichkeit – Signifikanzprüfung der Einzelhypothesen mittels Wald-Test (Darstellung in Erweiterung zu Bauch 2020, S. 80)

V:	GV	FV	FK	Fkt1. FSK	WZK	m	Fkt2. WK	PG	N	GS	HR	RM	DR	CR	AA	FKS
H:	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
E:	,000 *, +	,000 *, +	,000 *, +	,000 *, +	,000 *, +	,000 *, +	,000 *, +	,837	,000 *, +	,027 *, -	,005 *, +	,037 *, +	,004 *, +	,000 *, +	,339	,065

V: Variable, H: Hypothese, E: Empirie. * Bei $\alpha=0,05$ (2-seitig) signifikant. +/- positiver/negativer Einfluss (GÄ)

Bei der nachfolgenden Schätzung des **Gesamtmodells** werden das Montagerisiko (RM) ($p = 0,957$) und die Homologationsrelevanz (HR) ($p = 0,807$) aufgrund unzureichender Signifikanz des Wald-Tests nicht in das logistische Regressionsmodell aufgenommen. Funktions- und Schnittstellenkomplexität (Fkt1. FSK), Werkzeugkomplexität (Fkt2. WK), Designrelevanz (DR), Crashrelevanz und Neuheitsgrad hingegen haben einen statistisch signifikanten positiven Einfluss (odds-ratio $e^{\hat{\beta}_j} > 1$) auf das Auftreten einer geometrischen Änderung (GÄ) (siehe Tabelle 6.3). Das Modell hat gemäß dem Likelihood-Ratio-Test eine globale Signifikanz von $p < 0,001$ (Bauch 2020, S. 79–80).

Tabelle 6.3: Logistisches Regressionsmodell zu Änderungswahrscheinlichkeit (in Anlehnung an Bauch 2020, S. 80)

Variable	$\hat{\beta}_j$	$s_{\hat{\beta}_j}$	Wald	p-Wert	$e^{\hat{\beta}_j}$	95% Konfidenzintervall für $e^{\hat{\beta}_j}$	
						Untergrenze	Obergrenze
Fkt1. FSK	0,403	0,181	4,951	0,026*	1,496	1,049	2,134
Fkt2. WK	2,281	0,640	12,702	0,000*	9,790	2,792	34,328
DR	0,848	0,335	6,403	0,011*	2,335	1,211	4,505
CR	0,698	0,321	4,718	0,030*	2,009	1,070	3,770
N	0,463	0,152	9,291	0,002*	1,589	1,180	2,140
Konstante	-1,714	0,480	12,750	0,000*	0,180		

* Auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Prüfen der In-sample-Modellgüte (siehe Abbildung 6.9)

Die Pseudo-R²-Statistiken $R_{CS}^2 = 0,281$ und $R_N^2 = 0,376$ deuten auf ein akzeptable Modellgüte hin. Bei einem Trennwert von 0,5 ergibt sich eine Trefferquote von 75 % bei einer Spezifität von 79 % und einer Sensitivität von 70 %. Das Modell ist damit so konzipiert, dass es bei möglichst wenigen Bauteile fälschlicherweise eine geometrische Änderung prognostiziert (21 %). Ein AUC-Wert von 0,799 deutet auf eine, vom Trennwert unabhängig beurteilbare, akzeptable Klassifizierung der in-sample Daten der Stichprobe hin (Bauch 2020, S. 81–82).

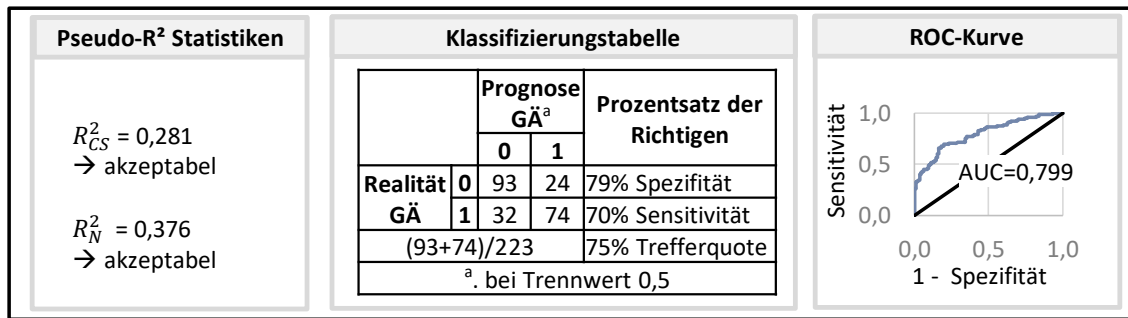


Abbildung 6.9: Änderungswahrscheinlichkeit – Prüfen der In-sample-Modellgüte (in Anlehnung an Bauch 2020, S. 80–82)

6.2.4 Modellbildung der Änderungsintensität

Bei der Überprüfung der **Einzelhypothesen** durch einzelne logistische Regressionen zwischen den Bauteileigenschaften und der Änderungsintensität (ÄI) sind laut Wald-Statistik die Crashrelevanz (RM), das Montagerisiko (RM), die Werkzeugkosten (WK) und die Masse (m) signifikant auf dem $\alpha = 0,05$ Niveau (Tabelle 6.4). Entsprechende Regressionskoeffizienten und Wald-Statistiken der Einzelregressionen sind in Anhang 15 zu finden.

Tabelle 6.4: Änderungsintensität – Signifikanzprüfung der Einzelhypothesen mittels Wald-Test

V:	GV	FV	FK	WZK	m	PG	N	GS	HR	RM	DR	CR	AA	FKS
H:	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
E:	,641	,989	,712	,002	,007	,511	,257	,800	0,545	,001	,253	0,002	0,468	0,070

V: Variable, H: Hypothese, E: Empirie. * Bei $\alpha=0,05$ (2-seitig) signifikant. +/- positiver/negativer Einfluss (ÄI)

Im daraus entwickelten **Gesamtmodell** haben Werkzeugkosten (WZK), Crashrelevanz (CR) und Montagerisiko (RM) einen signifikanten positiven Einfluss darauf (odds-ratio $e^{\hat{\beta}_j} > 1$), dass ein Bauteil änderungsintensiv ist (ÄI), d.h. mehr als eine Änderung im PEP hat (Tabelle 6.5). Das Modell ist gemäß Likelihood-Ratio-Test signifikant mit $p < 0,001$. WZK, CR und RM korrelieren untereinander nicht stark (vgl. Anhang 12). Somit ist auch die Voraussetzung der logistischen Regression, dass keine Multikollinearität vorliegt, erfüllt.

Tabelle 6.5: Logistische Regressionsmodell der Änderungsintensität

Variable	$\hat{\beta}_j$	$s_{\hat{\beta}_j}$	Wald	p-Wert	$e^{\hat{\beta}_j}$	95% Konfidenzintervall für $e^{\hat{\beta}_j}$	
						Untergrenze	Obergrenze
CR	1,006	0,501	4,025	0,045*	2,734	1,023	7,201
RM	0,711	0,268	7,018	0,008*	2,035	1,203	3,444
WZK	0,000003	0,000001	5,250	0,022*	1,000003	1,000000	1,000006
Konstante	-2,787	0,795	12,296	0,000*	0,062		

* Auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Prüfen der In-sample-Modellgüte (vgl. Abbildung 6.10)

Die Güte des Modells gilt als akzeptabel mit $R_{CS}^2 = 0,273$ und $R_N^2 = 0,368$. Die In-sample Trefferquote liegt bei einem Trennwert von 0,5 bei 71 %, die Spezifität bei 65 %, die Sensitivität bei 74 %. Die In-sample-Klassifizierung gilt mit einem AUC-Wert von 0,813 als exzellent.

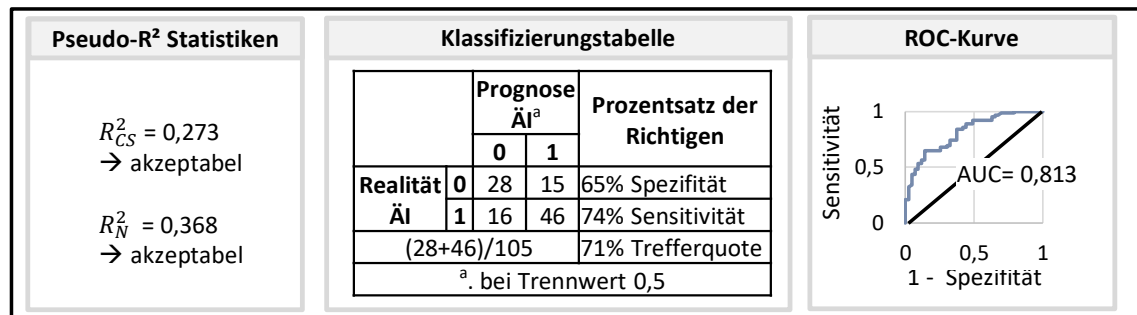


Abbildung 6.10: Änderungsintensität – Prüfen der In-sample-Modellgüte

6.2.5 Modellbildung der Änderungsanzahl

Die deskriptive Analyse der Anzahl geometrischer Änderungen von $n = 63$ Bauteilen mit mehr als einer Änderung im PEP (änderungsintensive Bauteile) zeigt, dass 52,4 % zwei Änderungen, 20,6 % drei und 27,0 % mehr als drei Änderungen haben. Zudem sind in Abbildung 6.11 die, gemäß Formel (17) berechneten, 95 % - Konfidenzintervalle der Anteile veranschaulicht. So hat ein Großteil der änderungsintensiven Bauteile zwei bis drei Geometrieänderungen im PEP.

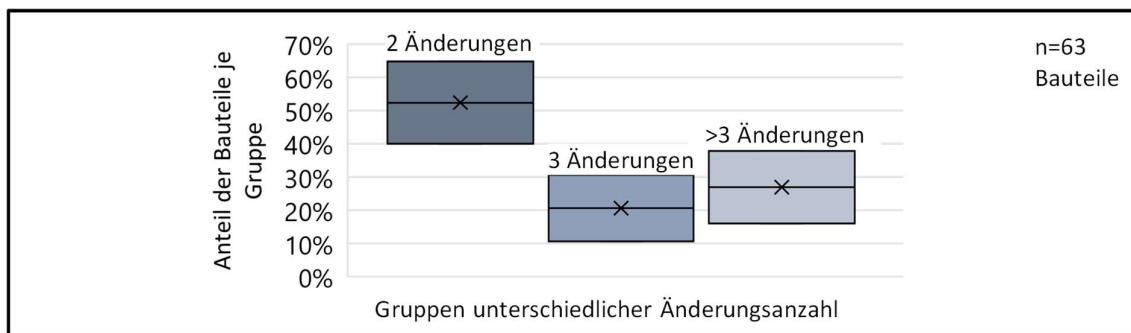


Abbildung 6.11: Anteil geometrischer Änderungen (Erwartungswert und 95% Konfidenzintervall)

6.2.6 Modellbildung der Werkzeugänderungskosten

Die Modellvoraussetzungen nach linearen Zusammenhängen zwischen den Bauteileigenschaften und den Werkzeugänderungskosten werden über Streudiagramme analysiert (Anhang 16). Da Masse (m), Werkzeugkosten (WZK) und Werkzeugänderungskosten (WZÄK) ansonsten nicht normalverteilt wären, werden sie logarithmiert. Von den **Einzelhypothesen** haben, auf dem $\alpha = 0,05$ Niveau, nur Prognosegüte (PG), Designrelevanz (DR) und Crashrelevanz (CR) keinen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Werkzeugänderungskosten (vgl. Tabelle 6.6). Gemäß der Streudiagramme zwischen den standardisierten Residuen und der Zielgröße (Anhang 18) ist die Voraussetzung nach Homoskedastizität jeweils erfüllt. Zudem sind die Störgrößen der Einzelregressionen unkorreliert, vgl. Durbin-Watson-Statistiken alle nahe 2 (Anhang 17) (Bauch 2020, S. 83–85).

Tabelle 6.6: Werkzeugänderungskosten – Signifikanzprüfung der Einzelhypothesen mittels t-Test (Darstellung in Erweiterung zu Bauch 2020, S. 84)

V:	GV	FV	FK	ln(WZK)	ln(m)	PG	N	GS	HR	RM	DR	CR	AA	FKS
H:	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
E:	,000 *, +	,002 *, +	,000 *, +	,000 *, +	,000 *, +	,395	,030 *, +	,002 *, +	,035 *, +	,000 *, +	,979	,101	,018 *, +	,002 *, +

V: Variable, H: Hypothese, E: Empirie. *. Bei $\alpha=0,05$ (2-seitig) signifikant. +/- positiver/negativer Einfluss ln(WZÄK)

Obwohl in den Einzelregressionen 11 Bauteileigenschaften signifikant waren, enthält das beste **Gesamtmodell** zur Werkzeugänderungskostenprognose (lnWKÄK) nur das Montagerisiko (RM) und die logarithmierten Werkzeugkosten (lnWZK). Das Hinzufügen weiterer Variablen verbessert die Modellgüte nicht (Bauch 2020, S. 86). Tabelle 6.7 zeigt die Regressionskoeffizienten $\hat{\beta}_j$.

Tabelle 6.7: Regressionsmodell logarithmierter Werkzeugänderungskosten (in Anlehnung an Bauch 2020, S. 86)

Variable	$\hat{\beta}_j$	$\hat{\beta}_j$ standardisiert	p-Wert
Konstante	7,419		0,000*
RM	0,317	0,211	0,002*
ln(WZK)	0,669	0,680	0,000*

* Auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Prüfen der Modellvoraussetzungen und der In-sample-Modellgüte (vgl. Abbildung 6.12)

Das Modell ist, gemäß F-Test, signifikant mit $p < 0,001$ und erfüllt alle Voraussetzungen einer linearen Regression (vgl. Abbildung 6.12). Die beiden unabhängigen Variablen haben einen linearen Einfluss auf die logarithmierten Werkzeugänderungskosten und die Multikollinearität der unabhängigen Variablen ist niedrig ($VIF_j = 1,063$). Das Streudiagramm zwischen standardisierten Residuen und der Zielgröße sowie der Breusch-Pagan-Test deuten auf homoskedastische Störgrößen hin – eine Durbin-Watson-Statistik von $d=1,930$ auf unkorrelierte Störgrößen. Das Modell erklärt 56,8 % der Varianz der Werkzeugänderungskosten. (Bauch 2020, S. 85–87).

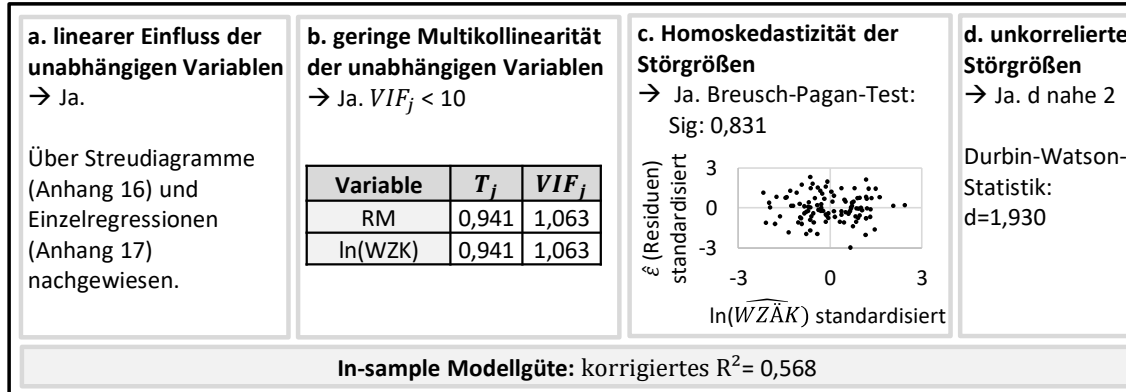


Abbildung 6.12: Werkzeugänderungskosten: Gesamtmodell – Modellvoraussetzungen und Güte (in Anlehnung an Bauch 2020, S. 85–87)

6.2.7 Modellbildung der Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung

Das **Modell** zur Bestimmung der Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung ist in Tabelle 6.8 dargestellt. Es zeigt den Einfluss der logarithmierten Werkzeugänderungskosten $\ln(\text{WZÄK})$ auf die logarithmierten Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung $\ln(\text{AVÄK})$.

Tabelle 6.8: Regressionsmodell logarithmierter Arbeitsvorbereitungsänderungskosten ($\ln(\text{AVÄK})$)

Variable	$\hat{\beta}_j$	$\hat{\beta}_j$ standardisiert	p-Wert
Konstante	-0,835		0,097**
$\ln(\text{WZÄK})$	0,909	0,920	0,000*

* auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant. ** auf Niveau von 0,1 signifikant.

Prüfen der Modellvoraussetzungen und der In-sample-Modellgüte (vgl. Abbildung 6.13)

Das Modell ist, gemäß F-Test, signifikant mit $p < 0,001$. Zudem besteht ein linearer Einfluss zwischen den Variablen. Die Störgrößen sind homoskedastisch (Residuen-Diagramm der Störgrößen, Signifikanz des Breusch-Pagan-Test von 0,559) und unkorreliert (Durbin-Watson $d=1,501$) (vgl. Abbildung 6.13).

Durch die Werkzeugänderungskosten können 84,4 % der Varianz der Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung erklärt werden.

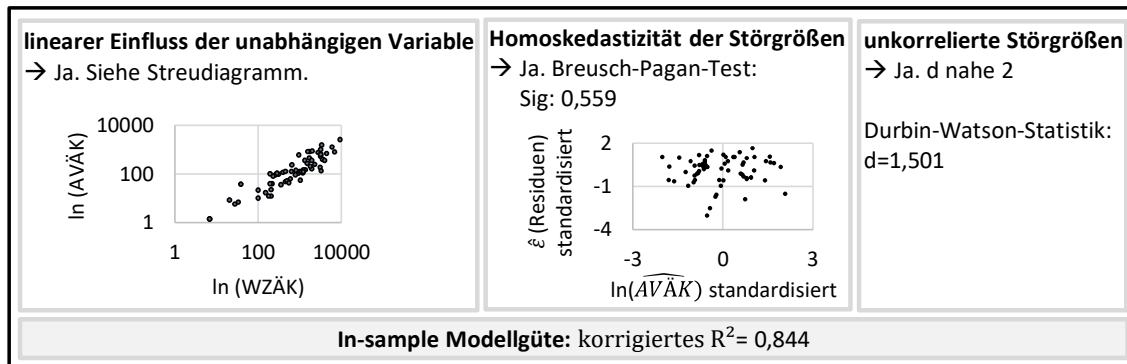


Abbildung 6.13: Arbeitsvorbereitungsänderungskosten: Gesamtmodell – Modellvoraussetzungen und Güte

6.2.8 Modellbildung des spätesten Änderungszeitpunkts

Die Überprüfung der **Einzelhypothesen** zwischen Bauteileigenschaften und dem spätesten Änderungszeitpunkt (ÄZP) ergab Folgendes: Eine höhere Prognosegüte in der virtuellen Erprobung (PG) führt dazu, dass der späteste Änderungszeitpunkt früher im PEP ist. Eine höhere funktionale Komplexität (FK), ein höheres Risiko akustischer Auffälligkeiten (AA), ein höheres Montagerisiko (RM), der Neuheitsgrad (N) sowie die Tatsache, dass ein Bauteil crashrelevant (CR) ist oder eine Funktion zum Korrosionsschutz (FKS) erfüllt, führen zu späteren Änderungen. Die Modellvoraussetzungen der Einzelregressionen sind erfüllt (Linearität: Streudiagramme vgl. Anhang 19; Homoskedastizität: Einzelne Streudiagramme zwischen Residuen und Zielvariable, vgl. Anhang 21; unkorrelierte Störgrößen: Durbin-Watson d jeweils nahe 2, vgl. Anhang 20, (Sykora 2021, S. 73–78).

Tabelle 6.9: Spätester Änderungszeitpunkt – Signifikanzprüfung der Einzelhypothesen mittels t-Test (Darstellung in Erweiterung zu Sykora 2021, S. 77)

V:	GV	FV	FK	ln(WZK)	ln(m)	PG	N	GS	HR	RM	DR	CR	AA	FKS
H:	keine	keine	-	-	-	+	-	keine	keine	keine	keine	+	-	-
E:	,079	,886	,046	,481	,128	,001	,015	,877	,773	,000	,186	,019	,015	,034
			*,-			*,+	*,-			*,-		*,-	*,-	*,-

V: Variable, H: Hypothese, E: Empirie. * Bei $\alpha=0,05$ (2-seitig) signifikant. +/- frühere/spätere Änderung (ÄZP)

Die in den Einzelregressionen signifikanten Variablen sind die Grundlage des **Gesamtmodells**. Das Modell mit der besten Güte (korrigiertes R^2) enthält die Regressoren Montagerisiko (RM) und Prognosegüte der virtuellen Erprobung (PG), vgl. Tabelle 6.10.

Tabelle 6.10: Regressionsmodell des spätesten Änderungszeitpunkts (ÄZP)

Variable	$\hat{\beta}_i$	$\hat{\beta}_i$ standardisiert	p-Wert
Konstante	9,488		0,029*
RM	-3,876	-0,351	0,000*
PG	10,175	0,201	0,015*

* Auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Prüfen der Modellvoraussetzungen und der In-sample-Modellgüte (vgl. Abbildung 6.14)

Das Modell ist, gemäß F-Test, signifikant mit $p < 0,001$. Die Voraussetzungen des linearen Einflusses der beiden unabhängigen Variablen auf die Zielgröße ÄZP sind erfüllt. Die Multikollinearität zwischen den unabhängigen Variablen ($VIF_j = 1,052$) ist gering. Die Störgrößen sind homoskedastisch (Streudiagramme zwischen standardisierten Residuen und Zielvariable sowie nicht-signifikanter Breusch-Pagan-Test) und unkorreliert (Durbin-Watson d nahe 2). Durch das Modell können 18,2 % der Varianz des spätesten Änderungszeitpunktes eines Bauteils erklärt werden (vgl. Abbildung 6.14).

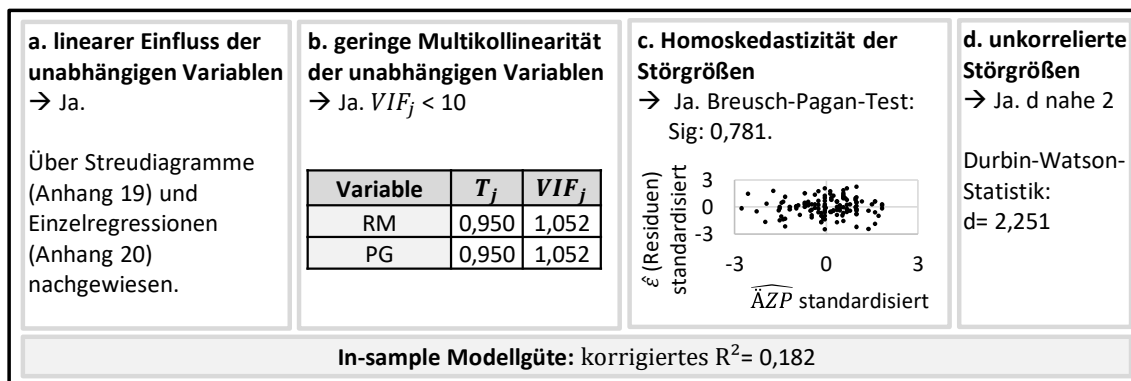


Abbildung 6.14: Spätester Änderungszeitpunkt: Gesamtmodell – Modellvoraussetzungen

6.2.9 Modellbildung des fertigungsspezifischen Anteils an der Änderungsdauer

Der fertigungsspezifische Anteil an der Änderungsdauer ($f_{\ddot{A}D}$) wird ermittelt, indem aus 23 Terminplänen die fertigungsspezifische Dauer $f\ddot{A}D$ (Werkzeugtransport, Änderung, Anlauf und Qualitätsschleifen) durch die gesamte Änderungsdauer ($\ddot{A}D$) (Zeit zwischen Freigabe der Änderung bis Eintreffen des ersten geänderten Bauteils im Fahrzeugwerk) geteilt wird.

$$f_{\ddot{A}D} = \frac{f\ddot{A}D}{\ddot{A}D} \quad (29)$$

Durch eine lineare Regression der unabhängigen Variable Änderungsdauer $\ddot{A}D$ auf die Zielvariable $f_{\ddot{A}D}$ konnte kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden (Ergebnis F-Test: $p = 0,110$). Da $f_{\ddot{A}D}$ also nicht von $\ddot{A}D$ beeinflusst wird, kann die fertigungsspezifische Änderungsdauer ($f\ddot{A}D$) über Multiplizieren der Änderungsdauer $\ddot{A}D$ mit dem fertigungsspezifischen Anteil $f_{\ddot{A}D}$ berechnet werden.

$$f\ddot{A}D = f_{\ddot{A}D} * \ddot{A}D \quad (30)$$

Der fertigungsspezifische Anteil $f_{\ddot{A}D}$ wird über die Maximum-Likelihood-Methode, auf Basis der 23 Terminpläne, geschätzt. Das Ergebnis ist ein durchschnittlicher fertigungsspezifischer Anteil an der Änderungsdauer $f_{\ddot{A}D}$ von $\mu = 60,0\%$ bei einer Standardabweichung von $\sigma = 21,7\%$. Ein Nachweis zur Normalverteilung der Daten erfolgte mittels Kolmogorov-Smirnov-Tests (Signifikanz von 0,149). Da die Daten normalverteilt sind, wird zur Prognose als Erwartungswert der Mittelwert verwendet.

6.2.10 Modellbildung der Änderungsdauer

Hohe Werkzeugkosten eines Bauteils (WZK), eine hohe Prognosegüte in der virtuellen Erprobung (PG) sowie die Tatsache, dass das Bauteil in einem Großserienfahrzeug verbaut ist (GS), führen gemäß durchgeführter Einzelregressionen zu einer kürzeren Änderungsdauer ($\ddot{A}D$), vgl. Tabelle 6.11. Die Modellvoraussetzungen der Einzelregressionen sind erfüllt (vgl. Anhang 23, Anhang 24, Anhang 25).

Tabelle 6.11: Änderungsdauer – Signifikanzprüfung der Einzelhypothesen mittels t-Test

V:	GV	FV	FK	ln(WZK)	ln(m)	PG	N	GS	HR	RM	DR	CR	AA	FKS
H:	keine	keine	+/-	+/-	+/-	-	+	-	keine	keine	keine	keine	keine	keine
E:	,644	,196	,522	,046	,052	,017	,908	,034	,522	,644	,739	,291	,189	,470
V: Variable, H: Hypothese, E: Empirie. * Bei $\alpha=0,05$ (2-seitig) signifikant. +/- längere/kürzere Dauer (ΔD)														

Das **Gesamtregressionsmodell** ist signifikant mit $p = 0,002$ (F-Test). Es enthält die Regressoren Großserienfahrzeug (GS) und Prognosegüte der virtuellen Erprobung (PG), vgl. Tabelle 6.12.

Tabelle 6.12: Regressionsmodell Änderungsdauer (ΔD)

Variable	$\hat{\beta}_j$	$\hat{\beta}_j$ standardisiert	p-Wert
Konstante	217,3381		0,000*
GS	-61,141	-0,440	0,008*
PG	-126,012	-0,478	0,004*

* Auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Prüfen der Modellvoraussetzungen und der In-sample-Modellgüte (vgl. Abbildung 6.15)

Die Modellvoraussetzungen einer linearen Regression sind erfüllt. Es bestehen lineare Zusammenhänge zwischen unabhängigen Variablen und der Zielvariable, eine geringe Multikollinearität der unabhängigen Variablen sowie Homoskedastizität, Unkorreliertheit und Normalverteilung (Überprüfung, da $n < 40$ ist) der Störgrößen. Das Modell erklärt 33,1 % der Varianz in der Änderungsdauer.

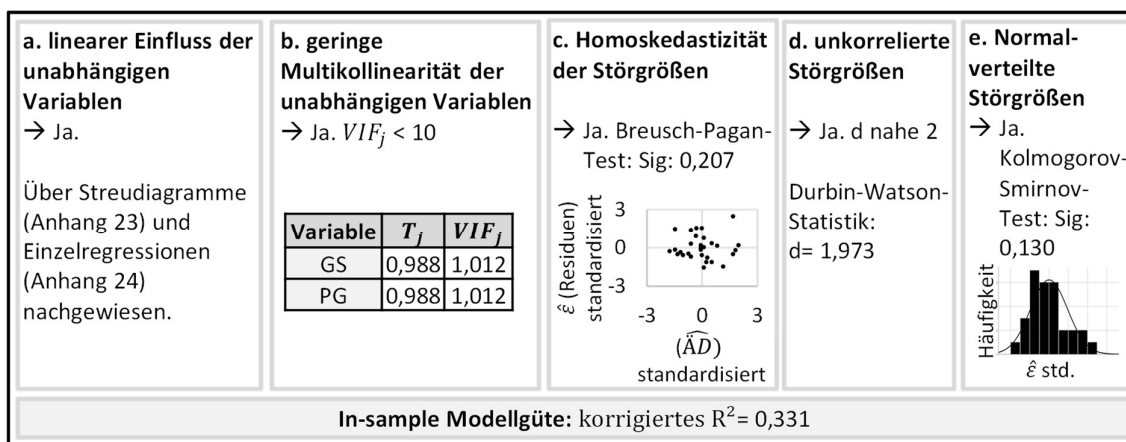


Abbildung 6.15: Änderungsdauer: Gesamtmodell – Modellvoraussetzungen und Güte

6.2.11 Gesamtmodell zur Bewertung des Änderungsverhaltens

In Abbildung 6.16 ist das Gesamtmodell zur Prognose des Änderungsverhaltens der werkzeuggebundenen Bauteilversion abgebildet. Zunächst erfolgt die Prognose zum Auftreten einer geometrischen Änderung. Schritt 1 ist es, die Änderungswahrscheinlichkeit $\pi_{G\ddot{A}}$ eines Bauteils zu bestimmen. Nur bei einer für den Anwender ausreichend hohen Wahrscheinlichkeit wird die Bewertung fortgeführt. Dem folgt die Prognose der Wahrscheinlichkeit $\pi_{\ddot{A}I}$, dass ein Bauteil änderungsintensiv ist, also mehr als eine geometrische Änderung im PEP haben wird. Ist nach Ermessen des Anwenders auch die Änderungsintensität $\pi_{\ddot{A}I}$ hoch, wird dem Anwender eine Übersicht zur Änderungsanzahl von Bauteilen historischer Referenzprojekte aufgezeigt, vgl. Abschnitt 6.2.5. Diese ist deskriptiver Natur und keine kausalanalytische Prognose. Anschließend werden die fertigungsspezifischen Änderungskosten (fÄK) des Bauteils prognostiziert, indem die Summe aus den prognostizierten Werkzeugänderungskosten (WZÄK) und den Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung (AVÄK) gebildet wird. Danach wird der späteste Änderungszeitpunkt (ÄZP) des Bauteils im PEP prognostiziert. Ist dieser nahe am oder nach Serienstart, wird zusätzlich die fertigungsspezifische Änderungsdauer (fÄD) prognostiziert. Die fÄD ist das Produkt der prognostizierten Änderungsdauer (ÄD) und des prognostizierten fertigungsspezifischen Anteils an der Änderungsdauer (fAÄD) und wird benötigt, um potenzielle Zusatzkosten, die bei Änderungen nach Serienstart entstehen (Abschnitt 6.4.2), zu berechnen.

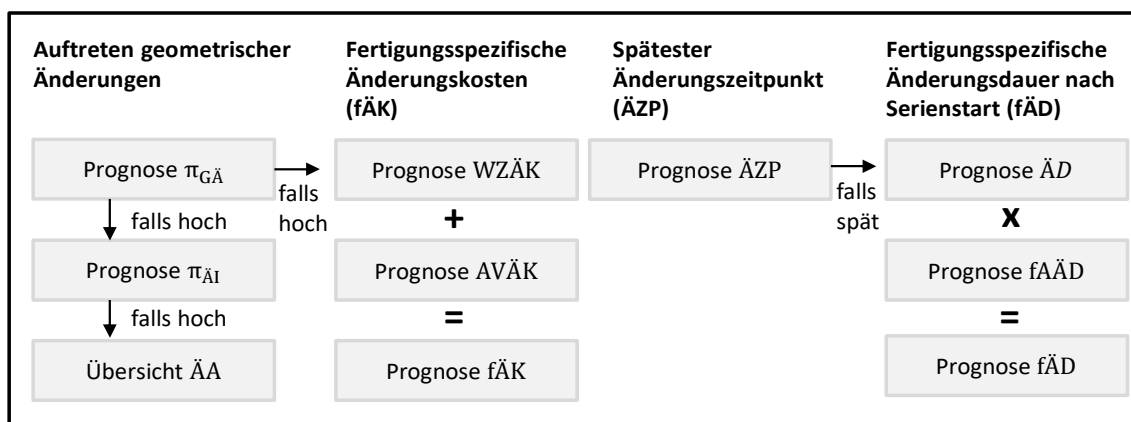


Abbildung 6.16: Gesamtmodell zur Prognose des Änderungsverhaltens

Nachfolgend wird beschrieben, welche Nutzerangaben für die Einzelmodelle erforderlich sind und wie die Modelle funktionieren und interagieren, um ein Gesamtmodell zur Prognose des Änderungsverhaltens einer werkzeuggebundenen Bauteilversion zu bilden. Statistikprogramme wie SPSS haben einen Großteil der Formeln hinterlegt (mit SPSS erfolgte auch die Modellbildung in den Abschnitten 6.2.3 - 6.2.10), sodass die Sequenzen damit durchführbar sind. Um eine praxistaugliche Anwendung zu ermöglichen, wird eine alternative Programmierumgebung empfohlen, mit der die Interaktion sämtlicher Einzelschritte automatisiert durchführbar ist. Die empirisch gewonnenen Wirkzusammenhänge der Abschnitte 6.2.3 - 6.2.10 werden als Eingangswerte verwendet. Damit wird die Nachvollziehbarkeit erhöht. Da das Änderungsverhalten je nach OEM abweichen kann, sollten unternehmensspezifische Daten erhoben, ausgewertet und die jeweiligen Ergebnisse als Eingangswerte der Modelle verwendet werden. In den nachfolgenden Abbildungen, die jeweils einen Überblick zur Funktionalität eines Einzelmodells liefern, stellen die blau umrandeten Felder die Input-Parameter dar, die bauteilspezifisch für jede Prognose vom Nutzer angepasst werden müssen.

Auftreten von Änderungen

In Abbildung 6.17 ist das Vorgehen zur Prognose der geometrischen Änderungswahrscheinlichkeit $\pi_{G\ddot{A}}$ am Beispiel eines neuen Bauteils * veranschaulicht.

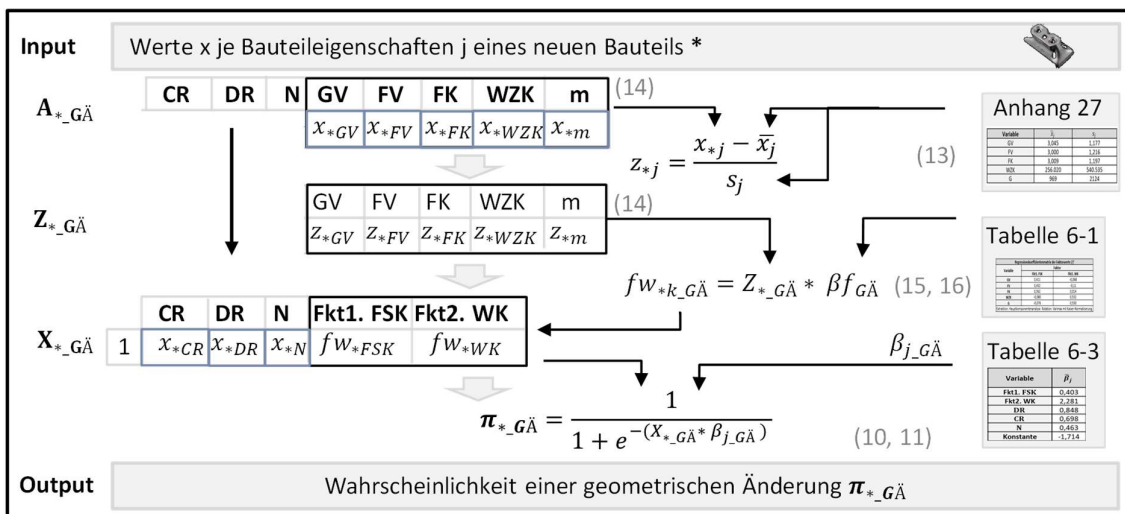


Abbildung 6.17: Prognose der Wahrscheinlichkeit einer geometrischen Änderung

Die Variablenwerte x der bei der Wahrscheinlichkeitsprognose einer geometrischen Änderung (GÄ) signifikanten Bauteileigenschaften j (CR, DR, N, GV, FV, FK, WZK, m) sind der Input. Zunächst wird ein Vektor $A_{*_G\ddot{A}}$ mit den Werten der Bauteileigenschaften GV, FV, FK, WZK und m erzeugt, für die durch eine Hauptkomponentenanalyse Faktorwerte berechnet werden sollen. Über eine Standardisierung, Formel (13) durch die Mittelwerte \bar{x}_j und Standardabweichungen s_j der Bauteileigenschaften (vgl. Anhang 27) aller Bauteile, mit denen das Modell initial erstellt wurde, wird der Vektor $Z_{*_G\ddot{A}}$ (vgl. Formel (14)) gebildet. Durch eine Multiplikation mit der Koeffizientenmatrix der Faktorwerte $\beta_{G\ddot{A}}$ (vgl. Formel (15) und Tabelle 6.1) werden aus den Werten der fünf Bauteileigenschaften die zwei Faktorwerte $fw_{*k_{G\ddot{A}}}$ berechnet (Formel (16)). Der resultierende Vektor $X_{*_G\ddot{A}}$ enthält die Werte der Variablen, die nicht Teil der Hauptkomponentenanalyse sind (CR, DR, N) sowie die Werte der beiden Faktoren FSK (Funktions- und Schnittstellenkomplexität) und WK (Werkzeugkomplexität) des Bauteils *. Die Wahrscheinlichkeit einer geometrischen Änderung wird über Multiplikation des Vektors $X_{*_G\ddot{A}}$ mit den Regressionskoeffizienten $\beta_{j_{G\ddot{A}}}$ (Tabelle 6.3) berechnet, Formel (10), (11).

Auch die Prognose, ob das Bauteil * änderungsintensiv ist ($\pi_{*_\ddot{A}I}$ hoch), erfolgt über eine logistische Regression. Dafür sind der Vektor $X_{*_\ddot{A}I}$ mit den Werten der Bauteileigenschaften Crashrelevanz (CR), Montagerisiko (RM) und Werkzeugkosten (WZK) sowie die Regressionskoeffizienten $\beta_{j_{\ddot{A}I}}$ (vgl. Tabelle 6.5) erforderlich, Formel (10), (11). Das Vorgehen ist in Abbildung 6.18 zusammengefasst.

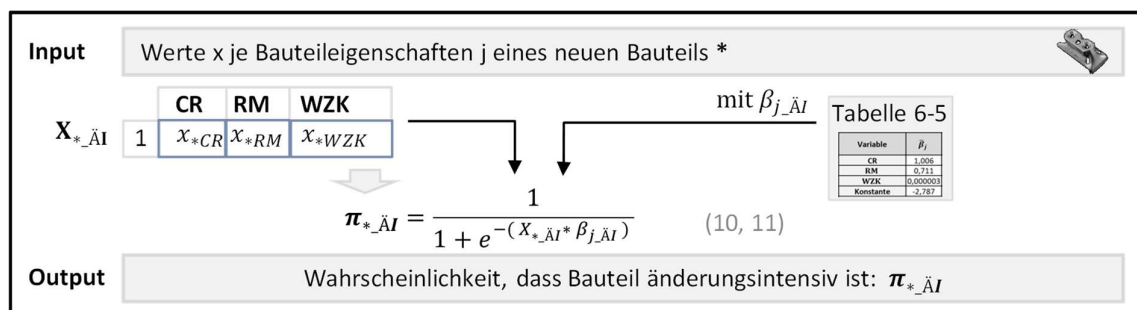


Abbildung 6.18: Prognose der Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil änderungsintensiv ist

Fertigungsspezifische Änderungskosten (fÄK)

Für die Prognose der fertigungsspezifischen Änderungskosten $\hat{y}_{*fÄK}$ eines Bauteils * werden zunächst die logarithmierten Werkzeugänderungskosten $\hat{y}_{*ln(WZÄK)}$ berechnet. Dies erfolgt über eine Regression des Vektors $X_{*ln(WZÄK)}$ mit den dazugehörigen Regressionskoeffizienten $\beta_{jln(WZÄK)}$ (Tabelle 6.7) mittels Formel (6). Der Vektor $X_{*ln(WZÄK)}$ enthält die Werte der zur Prognose der Werkzeugänderungskosten signifikanten Variablen – das Montagerisiko (RM) und die logarithmierten Werkzeugkosten (lnWZK). Ein Exponenzieren der logarithmierten Werkzeugänderungskosten $\hat{y}_{*ln(WZÄK)}$ ergibt den Erwartungswert $\hat{y}_{*WZÄK}$ der Werkzeugänderungskosten (Output 1). Die logarithmierten Werkzeugänderungskosten $\hat{y}_{*ln(WZÄK)}$ sind gleichzeitig die unabhängige Variable, gespeichert in Vektor $X_{*ln(AVÄK)}$, um mithilfe des Regressionskoeffizienten $\beta_{jln(AVÄK)}$ (aus Tabelle 6.8) die logarithmierten Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung zu prognostizieren. Durch Exponenzieren wird der Erwartungswert der Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung $\hat{y}_{*AVÄK}$ erzeugt (Output 2). Die Summe aus den beiden Erwartungswerten $\hat{y}_{*WZÄK}$ und $\hat{y}_{*AVÄK}$ ergibt den Erwartungswert der fertigungsspezifischen Änderungskosten $\hat{y}_{*fÄK}$ (Output 3).

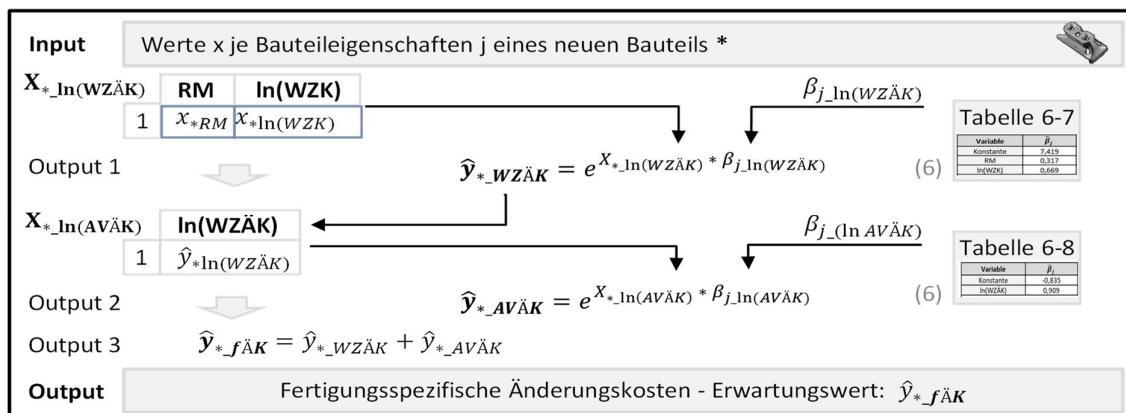


Abbildung 6.19: Prognose der fertigungsspezifischen Änderungskosten – Erwartungswert

Um die Prognoseunsicherheit transparent zu machen, werden zusätzlich die Prognoseintervalle der Werkzeugänderungskosten $PI_{*WZÄK}$ sowie der fertigungsspezifischen Änderungskosten $PI_{*fÄK}$ berechnet (vgl. Abbildung 6.20).

Das Prognoseintervall $PI_{*_{\ln(WZÄK)}}$ wird über Formel (7) berechnet. Dafür sind der Erwartungswert der logarithmierten Werkzeugänderungskosten $\hat{y}_{*_{\ln(WZÄK)}}$ sowie die Variablenwerte der Bauteile, mit denen das Modell erstellt wurde (gespeichert in Matrix $X_{j_{\ln(WZÄK)}}$), erforderlich. Außerdem werden die in Matrix $Y_{\ln(WZÄK)}$ gespeicherten, realen und prognostizierten logarithmierten Werkzeugänderungskosten benötigt, um die Residuenquadratsumme SS_E (Formel (4)) und die Varianz $\hat{\sigma}^2$ (Formel (5)) zu berechnen. Ein Exponenzieren von $PI_{*_{\ln(WZÄK)}}$ ergibt das Prognoseintervall $PI_{*_{WZÄK}}$ des Bauteils (Output 4), das abhängig von der gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit α ist.

Das obere Prognoseintervall der logarithmierten Werkzeugänderungskosten $\ln(oPI_{1-\alpha, *_{\ln(WZÄK)}})$ dient als Input, um mithilfe des Erwartungswertes $\hat{y}_{*_{\ln(WZÄK)}}$ und des z-Wertes $z_{\alpha/2}$ die Standardabweichung $\sigma_{*_{\ln(WZÄK)}}$ des Prognoseintervalls zu berechnen. Dies ist möglich, da gilt: $\sigma = (x - \mu) / z$ (Montgomery 2011, S. 123) mit $x = \ln(oPI_{1-\alpha, *_{\ln(WZÄK)}})$ und $\mu = \hat{y}_{*_{\ln(WZÄK)}}$. Dann werden 10.000 zufallsverteilte Werte $ZV_{*_{i, \ln(WZÄK)}}$ mit Erwartungswert $\hat{y}_{*_{\ln(WZÄK)}}$ und Standardabweichung $\sigma_{*_{\ln(WZÄK)}}$ erzeugt und in Matrix $X_{*_{\ln(AVÄK)}}$ gespeichert. Für jeden Zufallswert $ZV_{*_{i, \ln(WZÄK)}}$ erfolgt mit Formel (6) eine Prognose des Erwartungswertes der logarithmierten Arbeitsvorbereitungsänderungskosten $\hat{y}_{*_{i, \ln(AVÄK)}}$; über Formel (7) wird dann das Prognoseintervall der logarithmierten Arbeitsvorbereitungsänderungskosten $PI_{*_{i, \ln(AVÄK)}}$ berechnet. Für jedes Prognoseintervall sind, gemäß der Formel, neben dem Erwartungswert $\hat{y}_{*_{i, \ln(AVÄK)}}$ die in Matrix $X_{j_{\ln(AVÄK)}}$ gespeicherten Werte der unabhängigen Variable $\ln(WZÄK)$ erforderlich, mit denen das Modell initial erstellt wurde. Außerdem werden die realen und prognostizierten logarithmierten Arbeitsvorbereitungsänderungskosten aus Matrix $Y_{\ln(AVÄK)}$ benötigt, vgl. Formel (3), (4), (5). Ausgehend vom Prognoseintervall wird für jeden der 10.000 Zufallswerte über den z-Wert eine Standardabweichung $\sigma_{*_{i, \ln(AVÄK)}}$ berechnet. Für jeden der 10.000 Zufallswerte $ZV_{*_{i, \ln(WZÄK)}}$ der logarithmierten Werkzeugänderungskosten werden weitere 10.000 Zufallswerte $ZV_{*_{i, k, \ln(AVÄK)}}$ erzeugt, die jeweils um den Erwartungswert $\hat{y}_{*_{i, \ln(AVÄK)}}$ und die Standardabweichung $\sigma_{*_{i, \ln(AVÄK)}}$ verteilt sind. Parallel dazu wird jeder der 10.000 Zufallswerte der logarithmierten Werkzeugänderungskosten 10.000-mal kopiert, damit die

Anzahl an Zufallswerten mit denen der logarithmierten Arbeitsvorbereitungsänderungskosten übereinstimmt. Die 100.000.000 Zufallswerte der logarithmierten Arbeitsvorbereitungsänderungskosten werden in Matrix $\hat{Y}_{* \ln(AV\ddot{A}K)}$ gespeichert, die der logarithmierten Werkzeugänderungskosten in Matrix $X_{* \ln(WZ\ddot{A}K)}$. Die Zufallswerte beider Kostenarten werden elementweise aufsummiert und exponenziert. Aus dem Ergebnis werden, je nach interessierender Irrtumswahrscheinlichkeit α , die Quantile und dadurch das Prognoseintervall $PI_{* \text{f}\ddot{A}K}$ der fertigungsspezifischen Änderungskosten berechnet (Output 5). Mithilfe der Zufallszahlen wird so das tatsächliche Prognoseintervall $PI_{* \text{f}\ddot{A}K}$ numerisch approximiert.

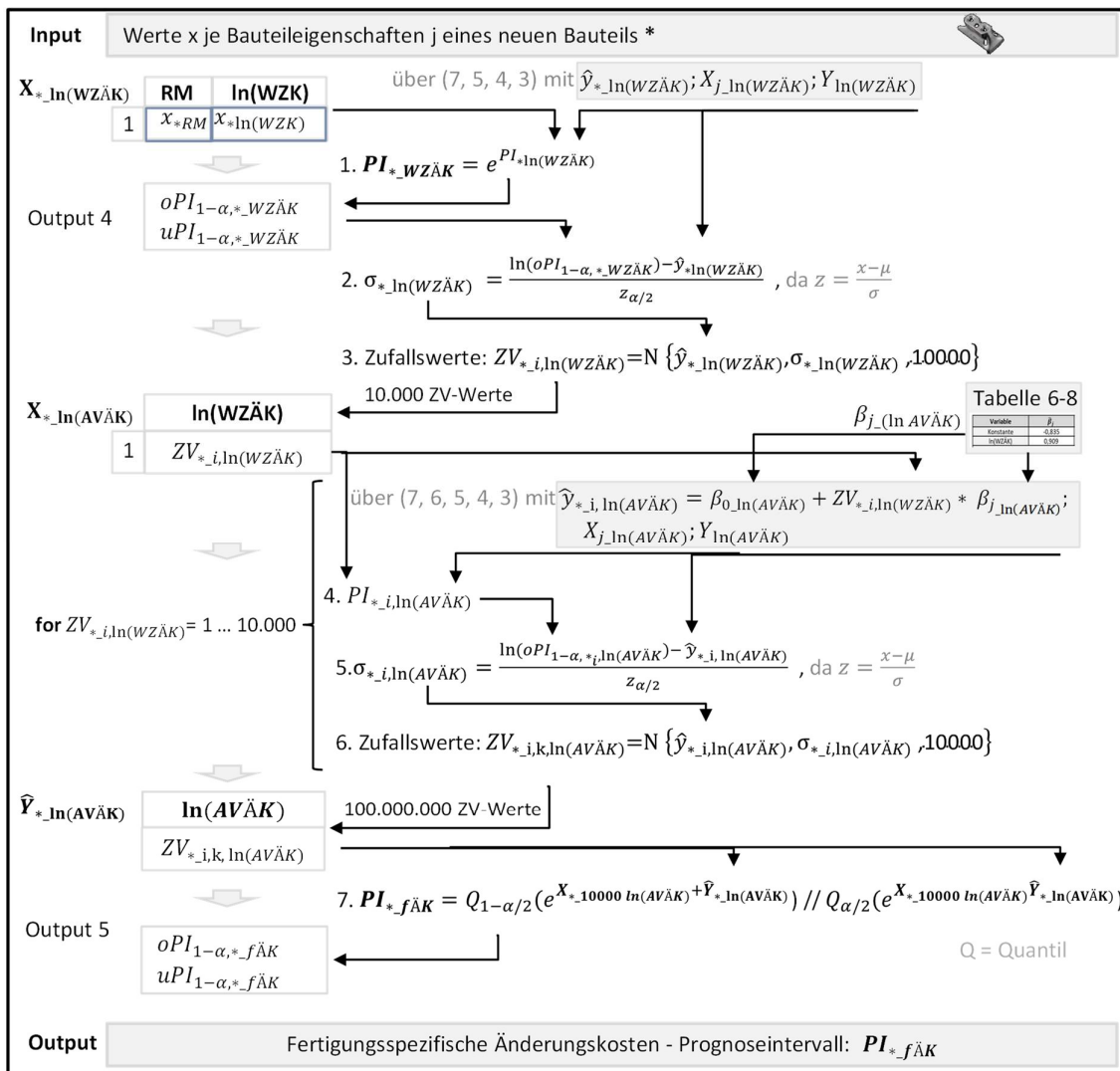


Abbildung 6.20: Prognose der fertigungsspezifischen Änderungskosten – Prognoseintervall

Spätester Änderungszeitpunkt (ÄZP)

Der Erwartungswert $\hat{y}_{*_ÄZP}$ des spätesten Änderungszeitpunktes eines Bauteils * wird über eine lineare Regression mit den Werten des Montagerisikos (RM) und der Prognosegüte der virtuellen Absicherung (PG) sowie den entsprechenden Regressionskoeffizienten $\beta_{j_ÄZP}$ (vgl. Abbildung 6.21) prognostiziert. Das Prognoseintervall $PI_{*_ÄZP}$ wird über Formel (7) berechnet. Dafür sind der Erwartungswert $\hat{y}_{*_ÄZP}$, die Werte der unabhängigen Variablen (Matrix $X_{j_ÄZP}$) sowie die tatsächlichen und prognostizierten Werte der Zielvariable (Matrix $Y_{ÄZP}$) notwendig, vgl. Formel (3), (4), (5).

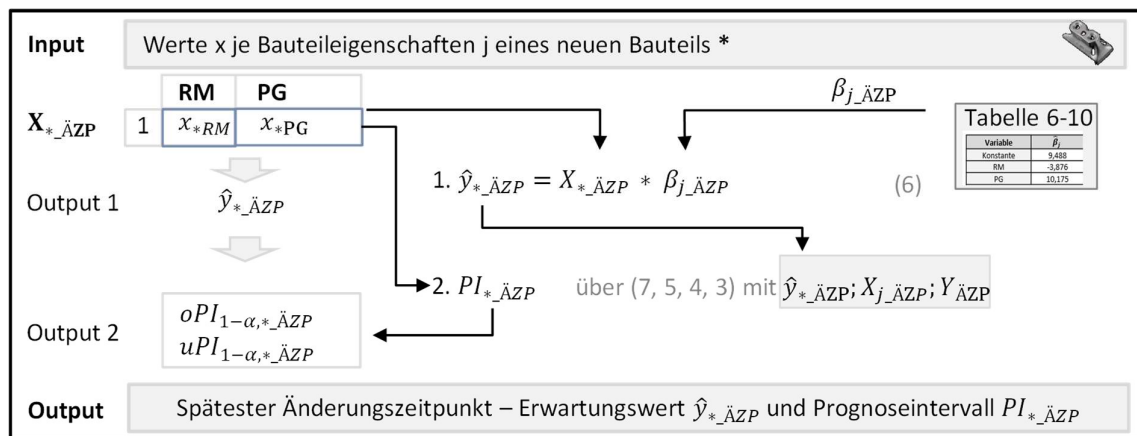


Abbildung 6.21: Prognose des spätesten Änderungszeitpunkts

Fertigungsspezifische Änderungsdauer (fÄD)

Die Prognose der fertigungsspezifischen Änderungsdauer ist in Abbildung 6.22 dargestellt. Der Erwartungswert der Änderungsdauer $\bar{ÄD}$ wird über eine Regression mit den Werten der Bauteileigenschaften Großserie (GS) und Prognosegüte der virtuellen Absicherung (PG), gespeichert in Matrix $X_{*_ÄD}$, und den Regressionskoeffizienten $\beta_{j_ÄD}$ berechnet, Formel (6). Durch eine Multiplikation mit dem Mittelwert des fertigungsspezifischen Anteils an der Änderungsdauer $\bar{x}_{fÄD}$ wird der Erwartungswert der fertigungsspezifischen Änderungsdauer $\hat{y}_{*_fÄD}$ eines Bauteils * kalkuliert, Formel (30). Dies ist die prognostizierte fertigungsspezifische Dauer einer Änderung, die nach Serienstart umgesetzt wird (Output 1).

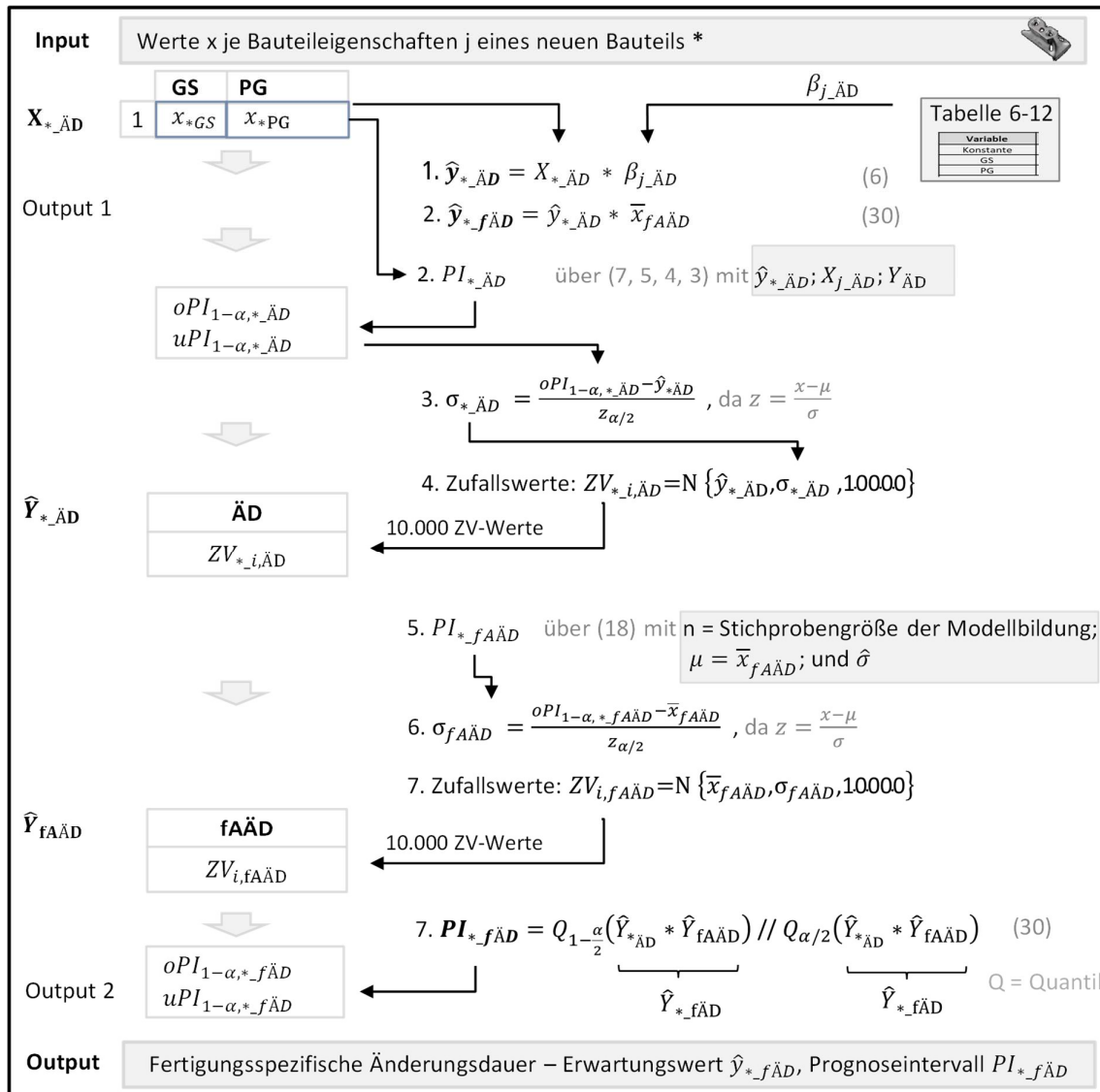


Abbildung 6.22: Prognose der fertigungsspezifischen Änderungsdauer (einer Änderung nach Serienstart)

Zur Berechnung des Prognoseintervalls der fertigungsspezifischen Änderungsdauer $PI_{*_fÄD}$ wird zunächst das Prognoseintervall der Änderungsdauer $PI_{*_ÄD}$ und die Standardabweichung $\sigma_{*_ÄD}$ berechnet. Dann werden 10.000 Zufallswerte entlang einer Normalverteilung mit Erwartungswert $\hat{y}_{*_ÄD}$ und Standardabweichung $\sigma_{*_ÄD}$ erzeugt und in Matrix $\hat{Y}_{*_ÄD}$ abgespeichert. Mit Formel (18) wird ein Prognoseintervall des fertigungsspezifischen Anteils an der Änderungsdauer $PI_{*_fAÄD}$ berechnet. Daraus wird die Standardabweichung $\sigma_{fAÄD}$ des Prognoseintervalls kalkuliert. Nun werden 10.000 Zufallswerte mit Erwartungswert $\bar{x}_{fAÄD}$ und

Standardabweichung $\sigma_{f\ddot{A}D}$ erzeugt und in Matrix $\hat{Y}_{f\ddot{A}D}$ gespeichert. Das Prognoseintervall der fertigungsspezifischen Änderungsdauer $PI_{*f\ddot{A}D}$ wird erzeugt, indem die Zufallswerte der Änderungsdauer $\hat{Y}_{*f\ddot{A}D}$ und des fertigungsspezifischen Anteils $\hat{Y}_{f\ddot{A}D}$ miteinander multipliziert werden und das interessierende Quantil, je nach Irrtumswahrscheinlichkeit α , berechnet wird.

6.3 Baustein 1: Schritt 3 – Prognose der Änderungsflexibilität einer AM-Bauteilversion

Stand heute liegen kaum Änderungsdaten von AM-Serienbauteilen vor, vgl. Abschnitt 4.1. Daher wurde ein expertenbasierter Ansatz entwickelt. Mit diesem ist es möglich, die Kosten und Dauer beliebiger geometrischer Änderungen einer AM-Bauteilversion, abhängig vom Änderungszeitpunkt im PEP, zu prognostizieren.

6.3.1 Methodenüberblick und erforderliche Eingaben

Abbildung 6.23 zeigt die Methode, wobei in den Schritten 1 - 5 alle erforderlichen Angaben für den in Schritt 6 anzuwendenden Algorithmus gesammelt werden.



Abbildung 6.23: Methode zur Bewertung des AM-Änderungsaufwands (in Erweiterung zu Kratzer et al. 2021b)

Zunächst wird eine Bauteilkategorie festgelegt, für welche die Prognose gelten soll. Um die Anforderungen eines angemessenen Aufwands zu erfüllen, wird die Prognose nicht für jedes einzelne Bauteil durchgeführt. Stattdessen soll sie für Bauteile eines Bereichs gelten, der anhand von Stückzahl, Bauteilvolumen, technischen Anforderungen und notwendigen Fertigungsschritten von den Anwendern der Methode definiert wird. Vorgespräche mit AM-Serienexperten des Automobilbaus zeigten, dass diese Kategorien den Aufwand in der Arbeitsvorbereitung beeinflussen. Abhängig von der Bauteilkategorie und dem Erfahrungswissen der Planer werden in Schritt 2 Bauteilmerkmale (etwa Abmessungen oder Radien) und fertigungsspezifische Merkmale (etwa Stützstrukturen) definiert. Da beide grundsätzlich von einer Änderung betroffen sein können, werden sie nachfolgend Änderungsmerkmale genannt. Anschließend wird über eine Experteneinschätzung in einer DSM-Matrix A_W die Wahrscheinlichkeit erfasst, mit der die Änderung eines Merkmals (z.B. Wandstärke) in der Zeile zu einer Änderung eines anderen Merkmals (z.B. Stützstruktur) in der Spalte führt (vgl. Abbildung 6.24). In einer weiteren DSM wird die Auswirkungsstärke A_A erfasst. Angelehnt an CLARKSON ET AL. wird über Multiplikation von Wahrscheinlichkeit und Auswirkungsstärke das Änderungsrisiko berechnet und in Matrix A_R abgespeichert (Clarkson et al. 2004). Alle Werte sind zwischen 0 (0 %) und 1 (100 %). Die Kenntnis der Abhängigkeiten ist notwendig, um bei einer Änderung alle weiteren betroffenen Merkmale zu identifizieren. Anschließend werden alle Arbeitsvorbereitungsschritte (AV-Schritte wie Herstellung eines Sonderbetriebsmittels oder Programmieren eines Messsystems), die von geometrischen Änderungen betroffen sein können, von den Planern über eine Ja/Nein-Analyse erfasst. Daraufhin werden die Änderungsmerkmale in den Zeilen und die AV-Schritte in den Spalten der Matrizen B_W , B_A , und B_R aufgetragen und die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkungsstärke und damit das Risiko erfasst, mit der die Änderung eines Merkmals zur Änderung eines AV-Schritts führt. So können durch den Algorithmus später die betroffenen AV-Schritte identifiziert werden. (Kratzer et al. 2021b)

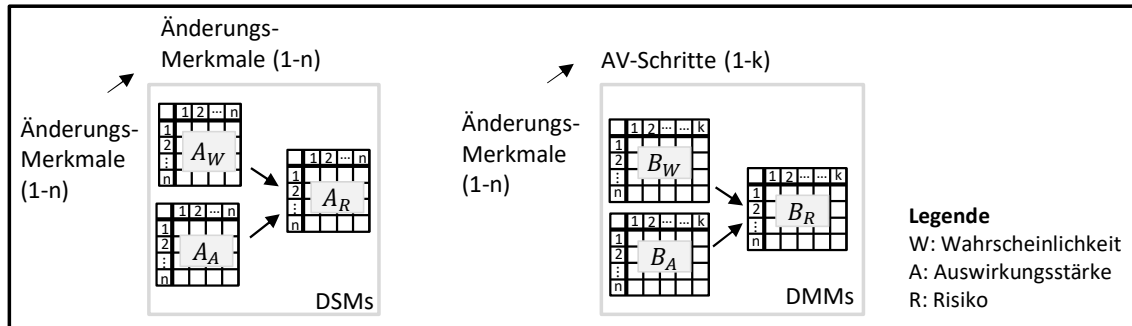


Abbildung 6.24: Schritt 2 – Aufnahme relevanter Abhängigkeiten in DSMs und DMMs (in Erweiterung zu Kratzer et al. 2021b)

Anschließend wird, angelehnt an PLEHN, mithilfe des Erfahrungswissens der Planer in Schritt 3 der minimale (a), wahrscheinlichste (m) und maximale Wert der Kosten k_{AV} und Dauer d_{AV} der einzelnen AV-Schritte erfasst, vgl. Abbildung 6.25 (PLEHN 2017, S. 112). Dadurch kann später mithilfe der in Abschnitt 5.2.3 vorgestellten PERT-Methode für jeden AV-Schritt eine Beta-Verteilung der Kosten und Dauer erzeugt werden. Die Methode wurde zum Umgang mit Unsicherheiten entwickelt (Malcolm 1959) und wird auch von PLEHN bei der Prognose der Änderungskosten angewandt. Sie ist notwendig, da die Methode sehr früh im PEP Anwendung findet und für eine Bauteilkategorie (nicht nur ein einzelnes Bauteil) funktionieren soll. (Kratzer et al. 2021b)

AV-Schritte (1-k)	3a. Kosten k_{AV} (€)			3b. Dauer d_{AV} (Arbeitstage)			Legende a: niedrigste Schätzung m: wahrscheinlichste Schätzung b: höchste Schätzung
	a	m	b	a	m	b	
1							
:							
k							

Abbildung 6.25: Schritt 3 – Aufnahme von Kosten u. Dauer der AV-Schritte (in Anlehnung an Kratzer et al. 2021b)

Da im PEP noch nicht durchgeführte AV-Schritte bei einer Änderung nicht wiederholt werden müssen, werden sie im Algorithmus zur Berechnung der Änderungskosten und Dauer auch nicht berücksichtigt. Um eine zeitpunktabhängige Prognose zu ermöglichen, erfolgt daher eine zeitliche Einordnung der AV-Schritte (vgl. Abbildung 6.26). Um diese zu erleichtern, werden in 4a die wichtigsten Meilensteine (MS) des PEP, für den die Prognose gelten soll, aus verfügbaren Terminplänen übernommen. Der Start des PEP gilt dabei als Referenzpunkt Null,

anhand dessen in Schritt 4b die zeitliche Einordnung der Meilensteine erfolgt. (Kratzer et al. 2021b)

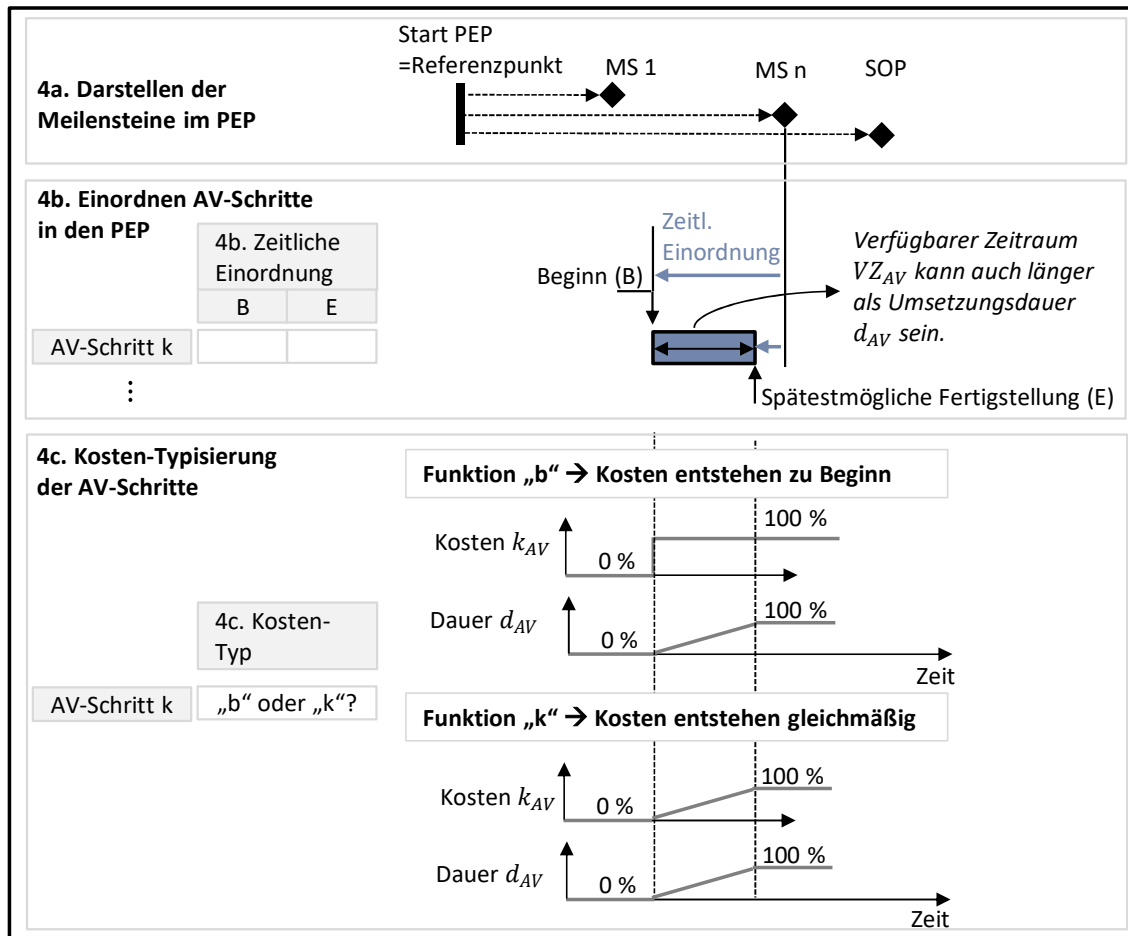


Abbildung 6.26: Schritt 4 – Zeitliche Einordnung der AV-Schritte (in Erweiterung zu Kratzer et al. 2021b)

Dabei wird für jeden AV-Schritt definiert, wann dieser beginnt (B) und wann dieser spätestens fertiggestellt sein muss (E). Die beiden Zeitpunkte werden anhand des Abstands in Wochen zum nächsten wichtigen Meilenstein im PEP definiert. Somit ist eine intuitive Angabe möglich und die Zeitpunkte haben einen Bezug zum Referenzpunkt. Aus der Differenz von B und E ergibt sich der verfügbare Zeitraum VZ_{AV} zur Umsetzung eines AV-Schritts. Die in Schritt 3 angegebene Dauer d_{AV} kann von diesem Zeitraum abweichen. Zum einen, weil sie in Arbeitstagen und nicht in Tagen oder Wochen angegeben ist, zum anderen, weil manche AV-Schritte zwar in einem Zeitraum VZ_{AV} durchgeführt werden, aber nicht in 100 % der

verfügbaren Zeit an dem Schritt gearbeitet wird. Der Algorithmus der zeitpunkabhängigen Prognose berücksichtigt die AV-Schritte zu dem Anteil, zu dem sie im PEP bereits durchgeführt wurden (vgl. Abschnitt 6.3.2). Der Anteil der Dauer d_{AV} wird daher zwischen Beginn und spätestmöglicher Fertigstellung des AV-Schritts so modelliert, dass dieser gleichmäßig über den Zeitraum ansteigt, bis der Schritt zum Zeitpunkt E zu 100 % durchgeführt ist. Dies gilt auch für den Anteil entstehender Kosten k_{AV} , sofern der Prozessplaner in Schritt 4c die Funktion „k“ für AV-Schritte wählt, bei denen die Kosten mit fortlaufendem Arbeitsfortschritt kontinuierlich entstehen. Darüber hinaus existieren AV-Schritte, wie etwa einige Bestellprozesse, deren Kosten zu Beginn anfallen und nicht widerrufen werden können. Hierfür wird Funktion „b“ gewählt. (Kratzer et al. 2021b)

Sowohl im PEP als auch bei der Umsetzung einer Änderung werden einige AV-Schritte sequenziell und andere parallel durchgeführt, sodass eine primitive Addition der Änderungsdauer d_{AV} einzelner, von der Änderung betroffener AV-Schritte nicht sinnvoll ist. Daher wird im Algorithmus die Methode des kritischen Pfades angewandt. In einem Projekt müssen manche Aktivitäten vor anderen durchgeführt werden. Durch Berücksichtigen dieser Vorgängerbeziehungen werden Pfade nicht-parallelisierbarer Aktivitäten (in unserem Fall AV-Schritte), zwischen Projektstart und Ende erfasst. Da am Ende alle Aktivitäten erledigt sein müssen, beschreibt der längste Pfad (der kritische Pfad) die kürzeste mögliche Fertigstellungsdauer (Nahmias et al. 2015, S. 548–549). Die für den Algorithmus erforderlichen Vorgänger-Beziehungen werden daher je AV-Schritt erfasst und in eine Matrix umgewandelt. In dieser Matrix bedeutet eine „1“ in der Zelle, dass ein AV-Schritt einer Zeilenüberschrift einen Vorgänger-AV-Schritt einer Spalte hat.

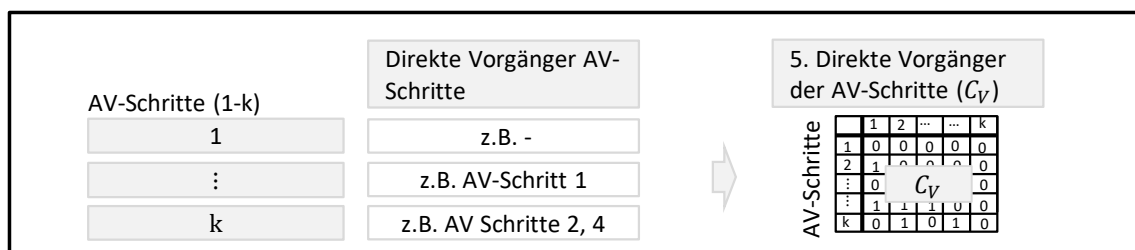


Abbildung 6.27: Schritt 5 – Aufnahme der direkten Vorgänger je AV-Schritt (in Erweiterung zu Nahmias et al. 2015, S. 548–554)

6.3.2 Algorithmus zur Berechnung zeitabhängiger Änderungsaufwände

Mit der Eingabe einer Bauteiländerung (etwa Radius) legt der Anwender eine Änderungsart fest und definiert die Anzahl der über den PEP verteilten Zeitpunkte, zu denen Änderungskosten und Dauer prognostiziert werden sollen. Ist bei einem PEP von 150 Wochen für den Anwender die Entwicklung möglicher Änderungsaufwände je 5 Wochen von Interesse, definiert er 30 gleichmäßig verteilte Zeitpunkte, zu denen der Algorithmus, dargestellt in Abbildung 6.28, durchgeführt wird.

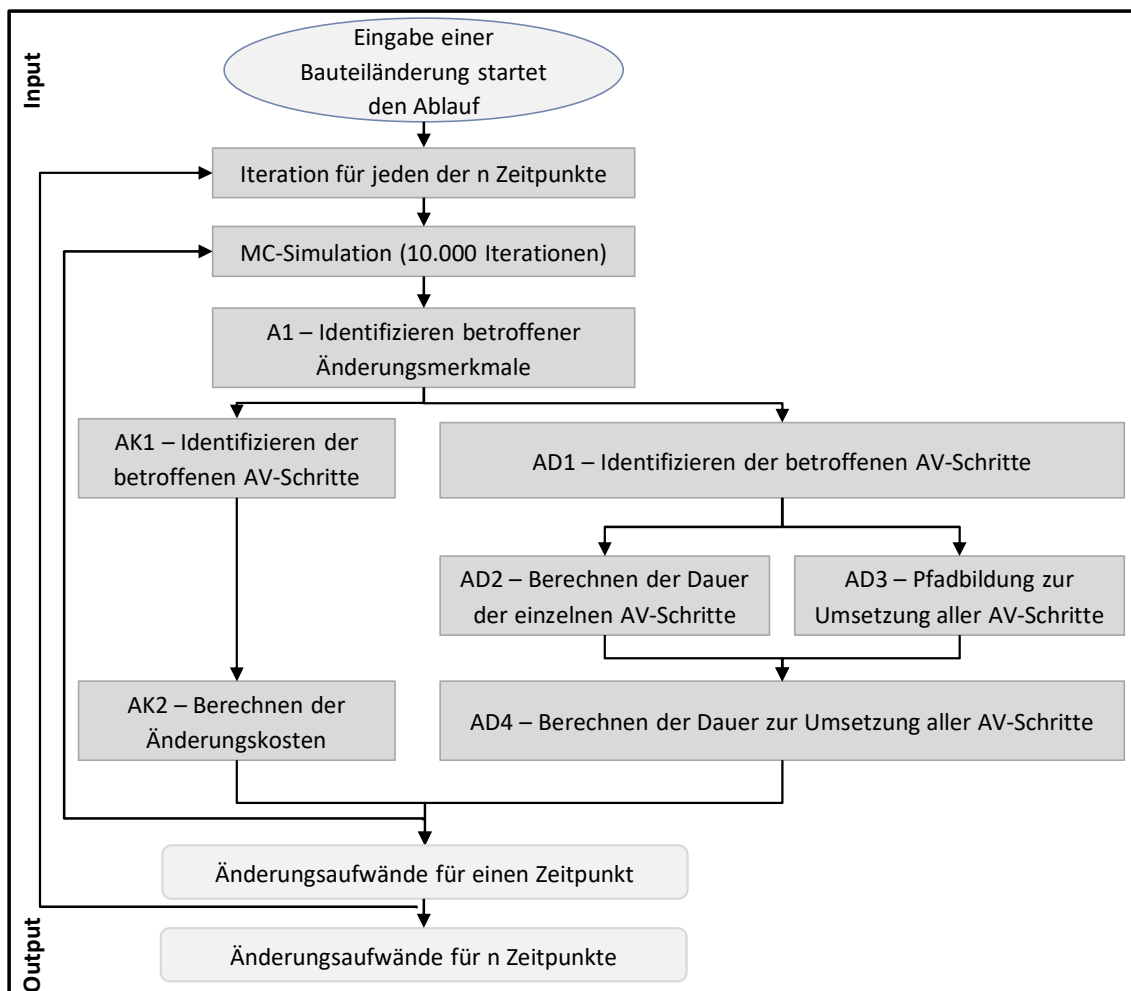


Abbildung 6.28: Algorithmus zur Berechnung zeitabhängiger Änderungsaufwände – Überblick (in Erweiterung zu Kratzer et al. 2021b)

In Abhängigkeit stehende Merkmale und AV-Schritte sind im Änderungsfall nur zu einem definierten Risiko betroffen (siehe Schritt 2 der Methode) und auch die erfassten Kosten und Dauern der AV-Schritte sind jeweils Dreipunkt-Schätzwerte (siehe Schritt 3). Daher wird, angelehnt an REBENTISCH et al. und PLEHN eine Monte-Carlo-Simulation gewählt, bei der die Änderung je Zeitpunkt in 10.000 Iterationen simuliert wird und sowohl für die prognostizierten Änderungskosten als auch für die Dauer ein Mittelwert gebildet wird (Plehn 2017, S. 117; Rebentisch et al. 2017). Bei der mehrmaligen Simulation der gleichen Bauteiländerung mit jeweils 10.000 Iterationen und nachfolgender Mittelwertbildung schwankte das Ergebnis um weniger als 1 %, weshalb 10.000 Iterationen als ausreichend eingestuft werden. Zunächst werden in Algorithmus A1 alle weiteren, durch Änderungsausbreitung betroffenen Merkmale identifiziert. Anschließend werden, je Zeitpunkt und MC-Iteration, über den Algorithmus AK1 die von den zu ändernden Merkmalen betroffenen AV-Schritte identifiziert und daraus in Algorithmus AK2 die Gesamtkosten berechnet (vgl. Kratzer et al. 2021b). Auch für die Prognose der Änderungsdauer werden die betroffenen AV-Schritte je Zeitpunkt identifiziert (AD1), die Änderungsdauer je AV-Schritt prognostiziert (AD2) und über die Vorgängerbeziehungen aus Schritt 5 die Umsetzungspfade aller betroffenen AV-Schritte berechnet (AD3). Mit der Information zu Pfaden und der Dauer einzelner AV-Schritte kann über den Algorithmus AD4 die minimale Umsetzungsdauer aller AV-Schritte bei einer Änderung simuliert werden. Nachfolgend werden die einzelnen Algorithmen im Detail erläutert.

Algorithmus, um betroffene Änderungsmerkmale zu identifizieren – A1

Abbildung 6.29 zeigt den Algorithmus, der ausgehend von der Eingabe eines Änderungsmerkmals prüft, welche weiteren Merkmale betroffen sind. Der unter Änderungsausbreitung bekannte Mechanismus (Clarkson et al. 2004) wird, angelehnt an PLEHN, über einen Breadth-First-Search-Algorithmus modelliert (Plehn 2017, S. 117–120). Dieser eignet sich besonders, da er zuerst alle direkt zum geänderten Merkmal in Beziehung stehenden Merkmale identifiziert, bevor geprüft wird, ob die Merkmale der nächsten Tiefenstufe betroffen sind (Plehn 2017, S. 85). In der Abbildung wird rechts beispielhaft dargestellt, wie Änderungsmerkmale der zweiten Tiefenstufe aufgrund einer initialen Änderung von Merkmal 2 identifiziert werden. So breitete sich die Änderung zunächst auf

Merkmal 1 und 3 aus (Tiefenstufe 1). Diese stehen wiederum in Abhängigkeit zu Merkmal 4 und 5 und den Merkmalen 7 und 8. In Tiefenstufe 2 findet aber nur eine Ausbreitung auf die Merkmale 4 und 8 statt. Die Logik ist, dass über eine MC-Simulation für jede Abhängigkeit zwischen zwei Merkmalen gleichverteilte Zufallszahlen $U(0,1)$ zwischen 0 und 1 erzeugt werden. Diese werden jeweils mit dem Änderungsausbreitungsrisiko r_{ij} zwischen zwei Merkmalen aus Matrix A_R verglichen. Unterschreitet die Zufallszahl u das Änderungsausbreitungsrisiko r_{ij} (bei gleichverteilten Zufallszahlen in etwa r_{ij} % der Fälle), so gilt das Merkmal als betroffen (Plehn 2017, S. 117–120). Im Beispiel sind nach Tiefenstufe 2 die Merkmale 2, 1, 3, 4 und 8 betroffen. Simulationen von CLARKSON ET AL. haben gezeigt, dass sich Änderungen ab einer Tiefenstufe von vier nicht mehr signifikant ausbreiten, weshalb die Tiefe darauf begrenzt wird (CLARKSON ET AL. 2004). Am Ende werden, je MC-Simulation, alle von der Änderung betroffenen Merkmale in einem Vektor $V_{\Delta M}$ abgespeichert.

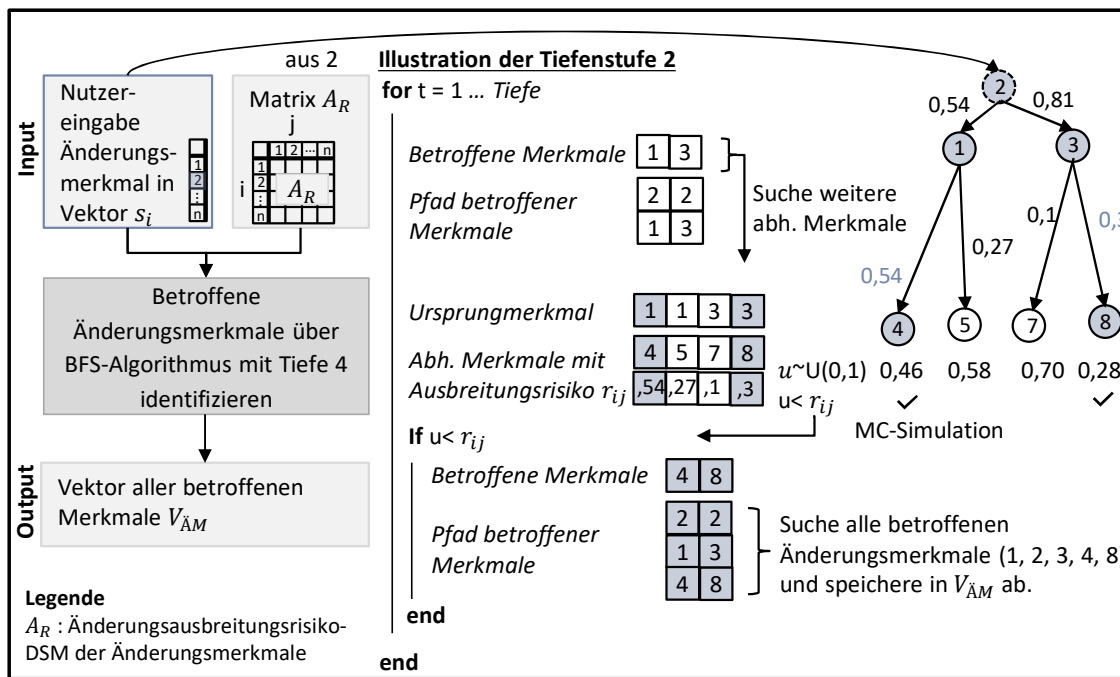


Abbildung 6.29: A1 – BFS-Algorithmus zur Identifizierung betroffener Änderungsmerkmale (in Anlehnung und Erweiterung zu Plehn 2017, S. 117–120)

Algorithmen zur Simulation der zeitabhängigen Änderungskosten – AK1 und AK2

Anschließend werden, ausgehend vom Vektor der betroffenen Änderungsmerkmale ($V_{\Delta M}$), alle betroffenen AV-Schritte identifiziert und in Vektor V_{AV_k} abgespeichert (Abbildung 6.30). Dies erfolgt ebenfalls durch das Erzeugen gleichverteilter Zufallszahlen. Diese werden mit dem Änderungsausbreitungsrisiko r_{ij} verglichen, das für jede Merkmal-zu-AV-Schritt-Kombination in Matrix B_R gespeichert ist. Unterschreitet die Zufallszahl u das jeweilige Änderungsausbreitungsrisiko r_{iy} , gilt der AV-Schritt in dieser MC-Iteration als betroffen, was bei etwa r_{iy} -% der Iterationen der Fall ist und daher eine gute Approximation der erwarteten Realität darstellt. (Kratzer et al. 2021b)

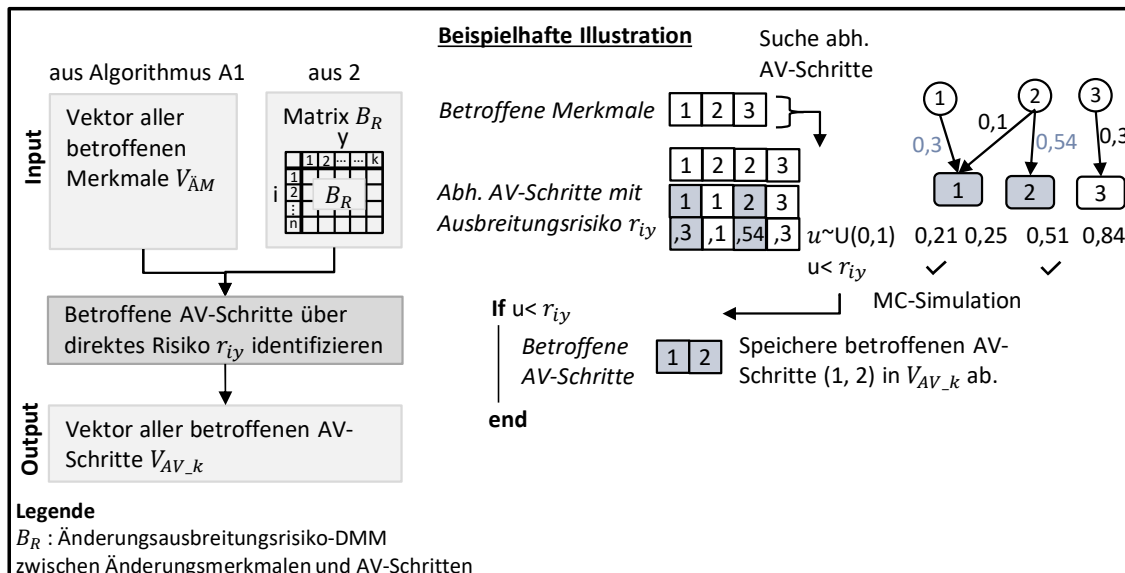


Abbildung 6.30: AK1 – Änderungskosten: Algorithmus, um betroffene AV-Schritte zu identifizieren

Nun wird für jeden Zeitpunkt und jede MC-Iteration der Algorithmus zur Berechnung der Änderungskosten (AK2, vgl. Abbildung 6.31) durchgeführt (Kratzer et al. 2021b). Für jeden der zuvor als betroffen identifizierten AV-Schritte wird der Kostentyp geprüft, der in Schritt 4c von den Experten angegeben wurde. Fallen die Kosten zu Beginn eines AV-Schritts an (Funktion b), führt eine nachfolgende Änderung (ÄZP nach B) zu Kosten. Die in Schritt 3a ermittelten Kosten (k_{AV} : a, m, b) eines AV-Schritts werden daher in der Matrix K_{AV} zwischengespeichert. Entstehen sie kontinuierlich über den AV-Schritt (Funktion k) und der Änderungszeitpunkt ist

im PEP nach der Fertigstellung des Schritts, ist der Schritt von der Änderung vollständig betroffen und die Kosten (k_{AV} : a, m, b) werden ebenso in Matrix K_{AV} zwischengespeichert.

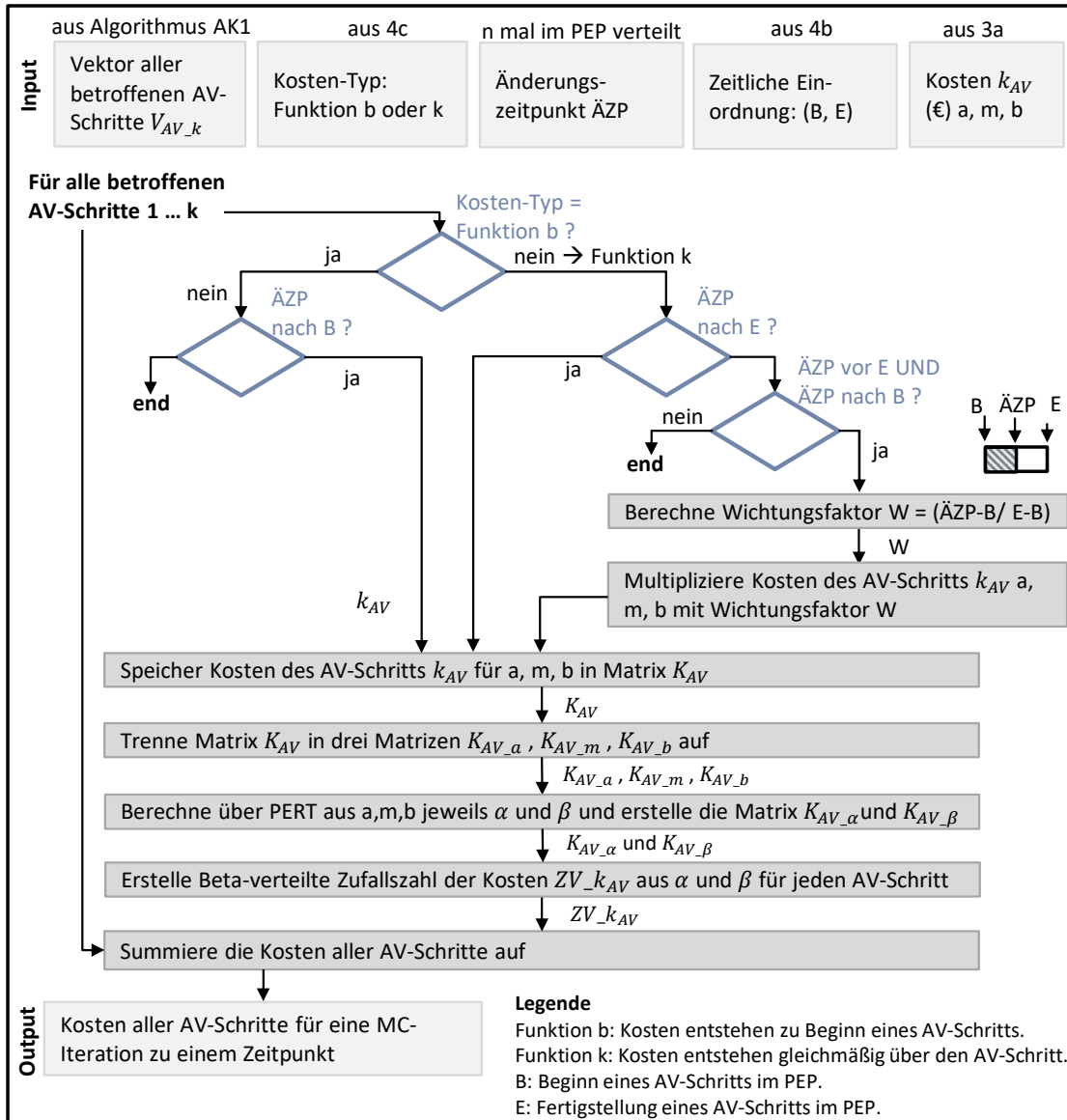


Abbildung 6.31: AK2 – Algorithmus zur Berechnung der Änderungskosten (in Erweiterung zu Kratzer et al. 2021b)

Liegt der simulierte Änderungszeitpunkt ÄZP zwischen Beginn B und Fertigstellung E eines AV-Schritts ist dieser zu dem Anteil betroffen, zu dem er bereits stattgefunden hat. Der Anteil wird mit einem Wichtungsfaktor $W = (\text{ÄZP}-B/E-B)$ berechnet. Die Kosten des AV-Schritts (k_{AV} : a, m, b) werden mit dem Wichtungsfaktor multipliziert und in Matrix K_{AV}

zwischengespeichert. Die abhängig von Kostentyp und Änderungszeitpunkt kalkulierten Kosten eines jeden AV-Schritts werden dann in drei separate Matrizen aufgeteilt, in der je AV-Schritt die minimalen, wahrscheinlichsten und maximalen Kosten K_{AV_a} , K_{AV_m} , K_{AV_b} enthalten sind. Daraus werden, in Anlehnung an PLEHN, über die PERT-Methode, vgl. Formel (19) und (20), die α und β -Werte einer Beta-Verteilung berechnet (Plehn 2017, S. 119). Aus der Betaverteilung wird dann für jeden AV-Schritt eine Zufallszahl erzeugt. Diese Zufallszahlen werden für alle betroffenen AV-Schritte aufsummiert und stellen die Änderungskosten eines Zeitpunkts und einer MC-Iteration dar. Der Vorgang wird 10.000-mal wiederholt (für jede MC-Iteration) und ein Mittelwert gebildet. Da dies für jeden der gleichmäßig über den PEP verteilten Zeitpunkte erfolgt, können so die zu erwartenden zeitabhängigen Änderungskosten prognostiziert werden. (Kratzer et al. 2021b)

Algorithmen zur Simulation der zeitabhängigen Änderungsdauer – AD1, AD2, AD3 und AD4

Analog zu Algorithmus AK1, mit welchem betroffene AV-Schritte für die Prognose der Änderungskosten identifiziert werden (vgl. Abbildung 6.30), erfolgt, ausgehend von den in Vektor $V_{\ddot{A}M}$ gespeicherten betroffenen Merkmalen, auch die Prognose der Änderungsdauer (siehe Abbildung 6.32). Zunächst werden gleichverteilte Zufallszahlen erzeugt. Diese werden mit der jeweiligen Änderungswahrscheinlichkeit eines Merkmals auf einen AV-Schritt w_{iy} verglichen, welche je Merkmal zu AV-Schritt-Kombination in Matrix B_W erfasst wurde (vgl. Abbildung 6.24). Unterschreitet die zellenspezifische Zufallszahl u die jeweilige Änderungswahrscheinlichkeit w_{ij} , gilt der AV-Schritt in dieser MC-Iteration als betroffen und wird in Vektor V_{AV_d} gespeichert. Alle nicht betroffenen AV-Schritte werden in Vektor V_{nAV_d} abgelegt. Die Änderung eines AV-Schritts y durch ein Merkmal i erfolgt in w_{iy} -% der Fälle. Da AV-Schritte von Änderungen unterschiedlich stark betroffen sind (Auswirkungsstärke), entspricht das Verhältnis der Dauer unterschiedlicher AV-Schritte bei einer Änderung nicht dem Verhältnis, das ohne eine Änderung vorliegt. Dauert im PEP etwa AV-Schritt A sechs und AV-Schritt B 30 Arbeitstage und ist AV-Schritt A bei einer Änderung mit einer Auswirkungsstärke von 50 % und AV-Schritt B mit einer Auswirkungsstärke von 10 % betroffen, wäre die Änderungsdauer der beiden AV-Schritte mit jeweils drei Tagen identisch. Um die kürzeste Dauer zur gemeinsamen Umsetzung aller betroffenen AV-Schritte zu

berechnen, soll daher die Korrektur um die Auswirkungsstärke erfolgen. Dies gelingt, indem der AV-Schritt mit einer Wahrscheinlichkeit w_{iy} als betroffen gilt und erst in Algorithmus AD2 mit der Auswirkungsstärke multipliziert wird.

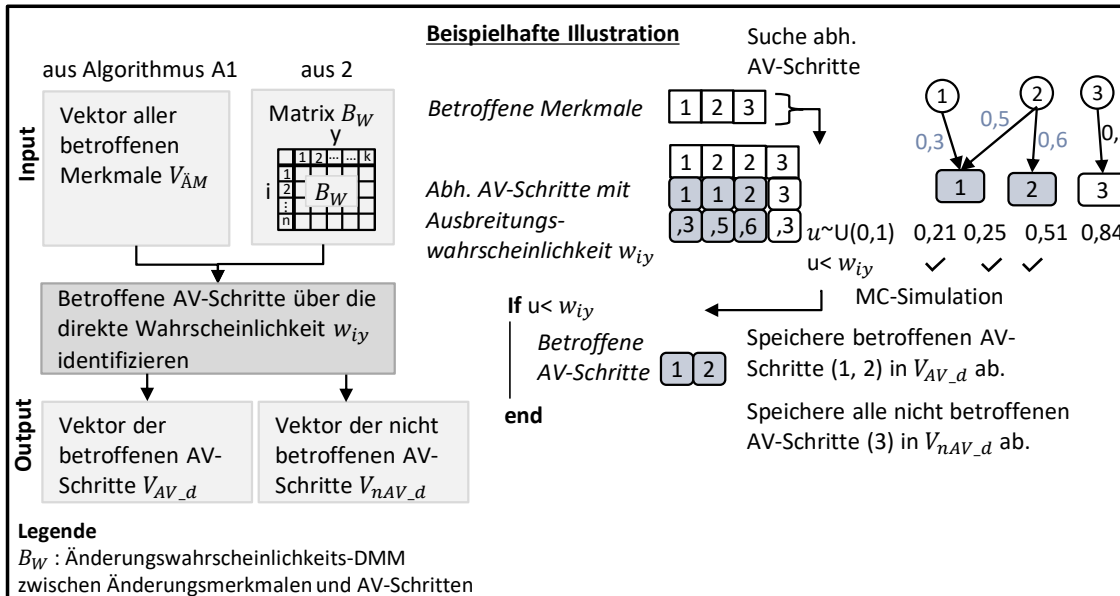


Abbildung 6.32: AD1 – Änderungsdauer: Betroffene AV-Schritte identifizieren (in Erweiterung zu Plehn 2017, S. 119–120)

Ziel von Algorithmus AD2 ist es, die Dauer aller von einer Änderung betroffenen AV-Schritte für eine MC-Iteration zu berechnen. Je nach Änderungszeitpunkt wird die in 3a erfasste Dauer eines AV-Schritts d_{AV} entweder vollständig (bei Änderung nach Fertigstellung E), gar nicht (bei Änderung vor Beginn B des AV-Schritts) oder mit dem eingeführten Wichtungsfaktor W zu dem Anteil berücksichtigt, zu dem der AV-Schritt bereits erfolgt ist. Denn nur dieser Anteil ist auch von der Änderung betroffen (Kratzer et al. 2021b). Die sich daraus ergebenden Werte der minimalen, wahrscheinlichsten und maximalen Dauer werden in drei separate Matrizen abgespeichert, woraus je AV-Schritt ein α und ein β -Wert erzeugt wird, der eine Beta-Verteilung definiert. Aus dieser Beta-Verteilung wird für jeden AV-Schritt eine Zufallszahl $ZV_{d_{AV}}$ für dessen Änderungsdauer generiert. Die Zufallszahl wird jeweils mit der maximalen Auswirkungsstärke multipliziert, mit welcher der AV-Schritt von einem Änderungsmerkmal betroffen sein kann. Das Ergebnis wird je AV-Schritt in Vektor $V_{AV_d_neu}$ abgespeichert. Der Vektor enthält also jeweils für eine MC-Iteration die Änderungsdauer aller betroffenen AV-

Schritte. Die Multiplikation mit der maximalen Auswirkungsstärke ist eine Vereinfachung, da zwar bekannt ist, dass ein AV-Schritt betroffen ist, ein Rückschluss, von welchem Merkmal die Änderung ausging, jedoch nicht mehr möglich ist.

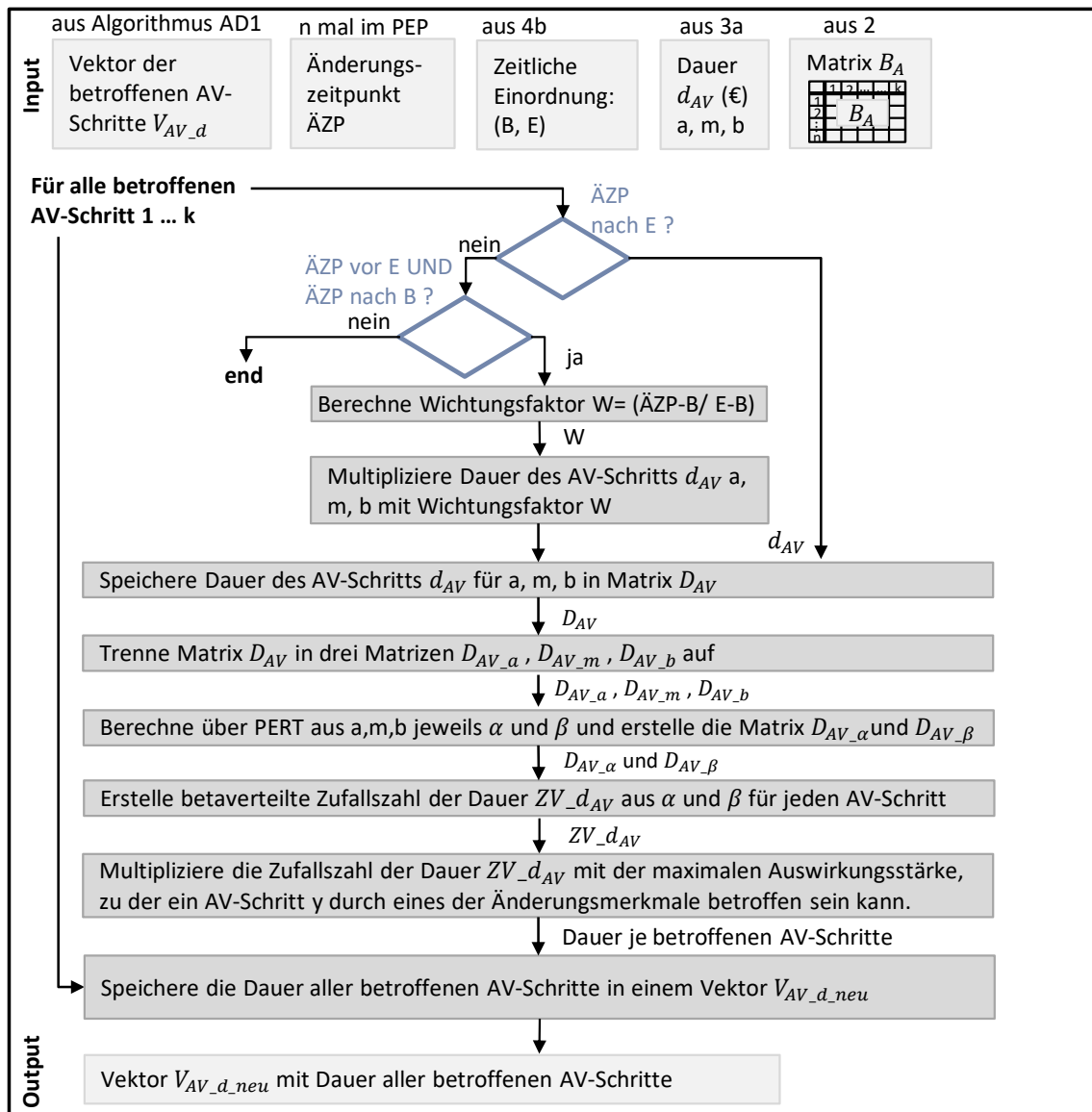


Abbildung 6.33: AD2 – Änderungsdauer: Berechnen der Dauer einzelner AV-Schritte (in Erweiterung zu Kratzer et al. 2021b)

Zudem ist denkbar, dass ein AV-Schritt aufgrund unterschiedlicher Merkmalsänderungen wiederholt werden muss (vgl. Abbildung 6.32, AV-Schritt 1 ist von der Änderung des Merkmals 1 sowie von der Änderung des Merkmals 2 betroffen). Um die Brauchbarkeit der maximalen

Auswirkungsstärke als Approximation zu beurteilen, wurde die Methode vorab auf ein AM-Bauteil angewandt. Die Voruntersuchung ergab, dass die einzelnen in Matrix B_A erfassten Auswirkungsstärken, ausgehend von den unterschiedlichen Merkmalen 1 - n, auf einen AV-Schritt y im Mittel um 17,5 % vom Maximum abweichen. Die maximale Auswirkungsstärke auf einen AV-Schritt (Maximalwert der Spalte des AV-Schritts in Matrix B_A) wird daher als ausreichend gute Approximation erachtet.

Parallel zu Algorithmus AD2, durch den die Dauer einzelner AV-Schritte berechnet wird, wird in Algorithmus AD3 eine Matrix M_{AV_Pf} erzeugt (siehe Abbildung 6.34). Darin enthalten sind alle theoretisch möglichen Pfade zusammenhängender, also nicht parallel zu bearbeitender AV-Schritte, die je MC-Iteration von der Änderung betroffen sind. Mithilfe der Pfade kann nachfolgend (in Algorithmus AD4) der längste Pfad identifiziert werden, welcher im Sinne der Methode des kritischen Pfades die kürzeste Änderungsdauer darstellt (vgl. Nahmias et al. 2015, S. 548). Input des Algorithmus sind die in Schritt 5 erfassten direkten Vorgänger eines jeden AV-Schritts (vgl. Abbildung 6.27). Aus den Vorgängerbedingungen wird, angelehnt an KULKARNI ET AL., ein gerichteter azyklischer Graph (DAG) mit allen AV-Schritten erzeugt (Kulkarni et al. 1986). Da bei einer Änderung jedoch nicht immer alle AV-Schritte betroffen sind, gingen die Verbindungen des DAGs verloren, wenn ein AV-Schritt entfernt wird. Ist beispielsweise Schritt 3 (Stützstruktur anpassen) ein direkter Vorgänger von Schritt 4 (Fertigungsdaten erzeugen), Schritt 3 jedoch von der Änderung nicht betroffen, wäre im illustrierten Beispiel (vgl. Abbildung 6.34) die Verbindung von Schritt 4 zu allen vorigen AV-Schritten aufgebrochen (etwa zu den Schritten 1, 2a, 2b). Um dies zu verhindern, wird eine transitive Hülle um den DAG gebildet, die auch alle indirekten Verbindungen der AV-Schritte im DAG erstellt. Dies erfolgt über den Warshall's Algorithmus, der bei ROSEN beschrieben ist (Rosen 2012, S. 603). Anschließend werden alle in dieser MC-Iteration nicht betroffenen, in Vektor V_{nAV_d} gespeicherten, AV-Schritte aus dem DAG entfernt. Die übrigen Pfade enthalten nun jeweils betroffene AV-Schritte, die nicht parallel bearbeitbar sind und in Matrix M_{AV_Pf} zwischengespeichert werden.

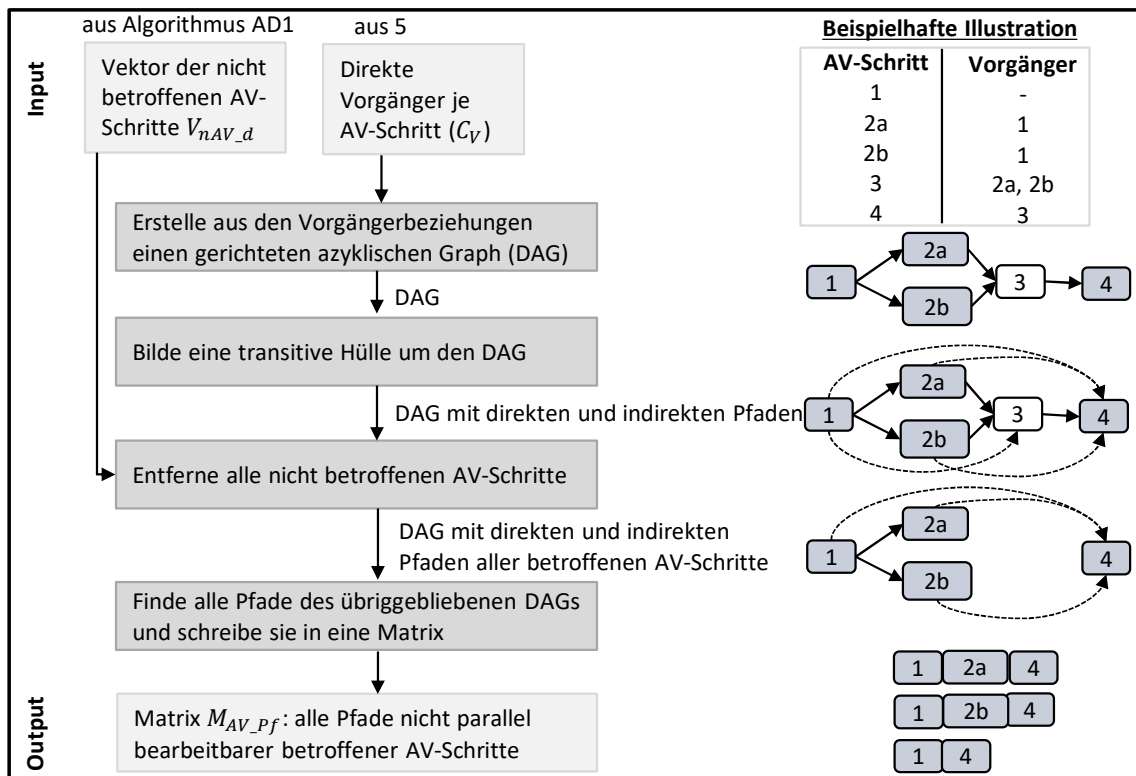


Abbildung 6.34: AD3 – Änderungsdauer: Pfadbildung zur Umsetzung aller AV-Schritte (in Erweiterung zu Rosen 2012, S. 596–604)

In Algorithmus AD4 werden die Pfade nicht parallel bearbeitbarer AV-Schritte aus Algorithmus AD3 um die Information der Änderungsdauer aus Algorithmus AD2 ergänzt (Abbildung 6.35).

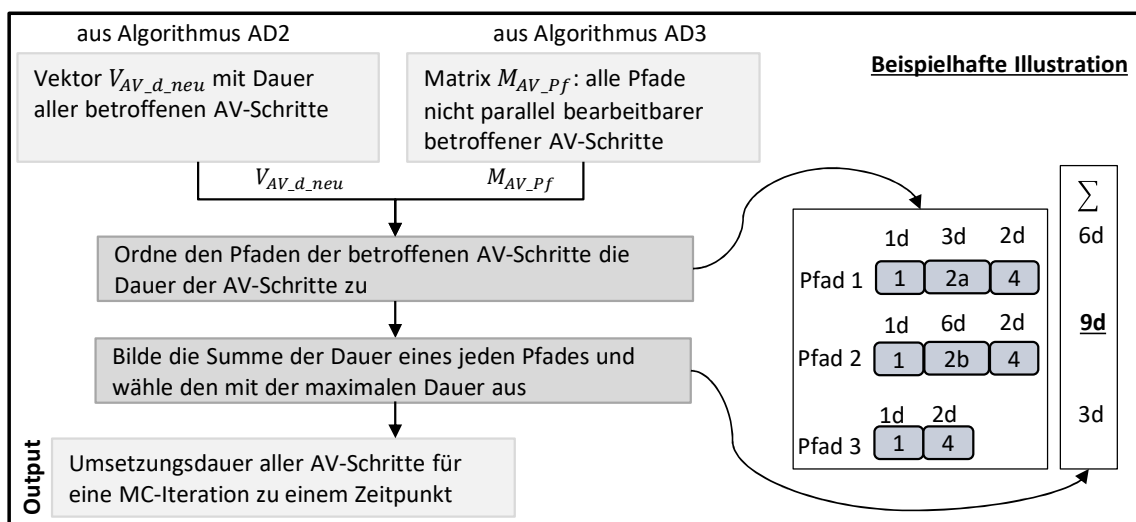


Abbildung 6.35: AD4 – Änderungsdauer: Berechnen der Dauer zur Umsetzung aller AV-Schritte

Dadurch, dass für jeden Pfad die Dauer der einzelnen AV-Schritte aufsummiert wird, kann gemäß NAHMIA ET AL. der Pfad mit der längsten Dauer, der sogenannte kritische Pfad identifiziert werden (Nahmias et al. 2015, S. 548–566). Dies ist die notwendige Dauer für die Umsetzung aller AV-Schritte innerhalb einer MC-Simulation, zu einem Zeitpunkt.

6.4 Baustein 1: Schritt 4 – Vergleich negativer Zusatzeffekte

Ziel von Schritt 4 ist es, die in Abschnitt 3.2 identifizierten Zusatzeffekte, die sich aus einer langen Änderungsumsetzung ergeben, quantifizieren zu können. Da sich die Zusatzeffekte vor und nach Serienstart unterscheiden, werden sie in zwei separaten Abschnitten behandelt (Abschnitt 6.4.1 und 6.4.2). Eine Anwendbarkeit des Schritts ist vor Technologieentscheidung erforderlich, um den Vorteil einer schnelleren Änderungsumsetzung, etwa bei AM-Bauteilen, transparent zu machen.

6.4.1 Negative Zusatzeffekte bei Änderungen vor Serienstart

Die Expertenbefragung in Abschnitt 3.2 zeigte, dass insbesondere zeitaufwändige Änderungen im PEP häufig nicht zur nächsten Bauphase umsetzbar sind. Dies führt zu geringerer Reife und dadurch zu späten, teuren Lösungen (siehe Anhang 4). Abbildung 6.36 stellt rechts eine Änderung vor Serienstart dar. Es sind beispielhaft Fahrzeugbauphasen eines PEP eingezeichnet. Die Änderungsdauer ΔD ist zwischen Freigabe des Änderungsantrags und dem Zeitpunkt der Umsetzung definiert (vgl. Abschnitt 6.2.9). Jede Bauphase hat einen Wareneingangstermin, zu dem die Bauteile spätestens im Werk sein müssen. Wird ein Antrag während Bauphase 1 gestellt, ist die Änderung entweder zum Wareneingang von Bauphase 2 („A“) umsetzbar – was der Idealprozess wäre – oder eben nicht (dann „B“). Um den Zusammenhang zwischen Änderungsdauer und Bauphasenumsetzung transparent zu machen, wurde folgendes Vorgehen entwickelt (vgl. Abbildung 6.36): Zunächst soll, basierend auf einer Zufallsstichprobe von Bauteiländerungen, der Anteil ermittelt werden, der nicht zur

nächsten Bauphase umgesetzt wurde (Output 1, siehe Abbildung 6.36). Davon ausgehend soll über eine Sensitivitätsanalyse der Anteil berechnet werden, der je nach Änderungsdauer ΔD_j von 0 bis m Tagen jeweils eine Bauphase früher umsetzbar gewesen wäre (Output 2). So wird transparent, inwieweit eine kürzere Änderungsdauer zu einem real wirksamen früheren Einsatz eines geänderten Bauteils führt. Abbildung 6.37 zeigt hierfür den Pseudocode.

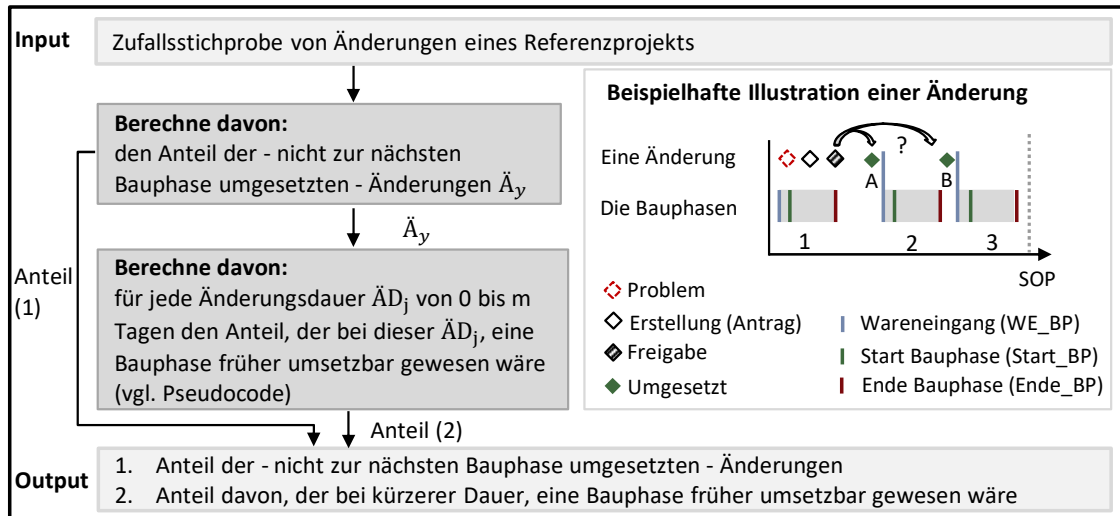


Abbildung 6.36: Erzeugen von Transparenz zu Zusatzeffekten von Änderungen vor Serienstart

Die Bauphasen werden von 1 bis n durchnummeriert. Zunächst wird je Änderung Δy , welche nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt wurde, die Nummer der Bauphase notiert, zu der die Änderung real umgesetzt wurde ($\text{Nummer_BP_umgesetzt}_y$). Für jede Änderungsdauer ΔD_j von 0 bis m Tagen wird dann berechnet, zu welchem Datum diese bei gleichbleibendem Erstelldatum und gleichbleibender Freigabedauer umsetzbar gewesen wäre (Zeile 3: $\text{Datum_umsetzbar}_{jy}$). Daraus wird die entsprechende Bauphase ermittelt ($\text{Nummer_BP_umsetzbar}_{jy}$), indem geprüft wird, vor welchem Bauphasenwareneingang die Änderung bei einer Dauer ΔD_j umsetzbar wäre (Zeile 6, 7: $\text{Datum_umsetzbar}_{jy} < \text{WE_BP}_i$). Zudem wird die Bauphase ermittelt, zu welcher der Änderungsantrag gestellt wurde ($\text{Nummer_BP_Antrag}_{jy}$). Dies erfolgt, indem geprüft wird, zwischen welchem Start einer Bauphase i und Wareneingang der Nächsten $i+1$ der Antrag erstellt wurde (Zeile 9-13: if

Erstelldatum_y < WE_BP_{i+1} und if Erstelldatum_y > Start_BP_i then Nummer_BP_Antrag_{iy} =
 i). Nummer_BP_Antrag_{iy} ist dabei die Bauphase, nach dessen Start der Antrag gestellt wurde.

```

1 for  $\Delta D_j \leftarrow 0$  to  $m$  Tage do
2   for  $\ddot{A}_y \leftarrow 1$  to  $k$  Änderungen do
3     Nummer_BP_umgesetzty  $\leftarrow$  Bauphasennummer, zu der Änderung umgesetzt wurde
4     Datum_umsetzbarjy  $\leftarrow$  Erstelldatumy + Freigabedauery +  $\Delta D_{jy}$ 
5     for BPi  $\leftarrow 1$  to  $n$  Bauphasen do
6       if Datum_umsetzbarjy < WE_BPi then
7         | Nummer_BP_umsetzbarjy  $\leftarrow i$ 
8       end if
9       if Erstelldatumy < WE_BPi+1 then
10        | if Erstelldatumy > Start_BPi then
11          | Nummer_BP_Antragjy  $\leftarrow i$ 
12        end if
13      end if
14    end for
15    Notwendige_Anzahl_BPjy  $\leftarrow$  Nummer_BP_umsetzbarjy - Nummer_BP_Antragjy
16    Reale_benötigte_Anzahl_BPjy  $\leftarrow$  Nummer_BP_umgesetzty - Nummer_BP_Antragjy
17    if Notwendige_Anzahl_BPjy < Reale_benötigte_Anzahl_BPjy then
18      | Statusjy  $\leftarrow 1$ 
19    end if
20    if Statusjy = 1 then
21      | Summe_Äy_früher_umsetzbar = Summe_Äy_früher_umsetzbar ++
22    end if
23  end for
24  %-Ä BP früher umsetzbar  $\leftarrow$  Summe_Äy_früher_umsetzbar /  $k$ 
25  %-Ä BP früher umsetzbar_uKI  $\leftarrow$  Formel 17 mit Summe_Äy_früher_umsetzbar /  $k$ 
26  %-Ä BP früher umsetzbar_oKI  $\leftarrow$  Formel 17 mit Summe_Äy_früher_umsetzbar /  $k$ 
27 end for

```

Abbildung 6.37: Einfluss einer kürzeren Dauer darauf, dass Änderungen zu früheren Bauphasen umgesetzt werden können – Pseudocode

Aus der Differenz der Bauphasennummer, zu der die Änderung umsetzbar wäre und jener, zu welcher der Antrag gestellt wurde, kann die zur Änderungsumsetzung notwendige Anzahl an Bauphasen berechnet werden (Zeile 15). Aus der Differenz der Bauphasennummer, zu der die Änderung real umgesetzt wurde und jener, zu welcher der Antrag gestellt wurde, errechnet sich die reale benötigte Anzahl an Bauphasen (Zeile 16). Ist die notwendige Anzahl kleiner als die real benötigte, wäre die Änderung bei einer Dauer ΔD_j eine Bauphase früher umsetzbar als es in der Realität der Fall war (Zeile 17-19). Für jede Dauer ΔD_j werden alle Änderungen summiert, die eine Bauphase früher hätten umgesetzt werden können und durch die Anzahl k aller Änderungen dividiert, die real nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt wurden. Mit Formel (17) wird zudem das Konfidenzintervall bestimmt, welches angibt, in welchem Bereich

der wahre Anteil der Änderungen liegt, der bei einer Änderungsdauer ΔD_j eine Bauphase früher umsetzbar gewesen wäre.

6.4.2 Negative Zusatzeffekte bei Änderungen nach Serienstart

Dieser Abschnitt enthält Werkzeuge, um die Potenziale zu quantifizieren, die aus einer kürzeren Änderungsdauer nach Serienstart (etwa bei der Änderung einer AM-Bauteilversion) resultieren würden. Dazu zählt das Potenzial, Gewährleistungskosten früher zu vermeiden oder Produktkosten früher reduzieren zu können. Außerdem können bei einer früheren Änderungsumsetzung Nacharbeit- und Vorproduktionskosten gesenkt werden. Zu Letzteren zählen Kosten für zusätzliche Kapazität, Behälter und Lagerfläche (vgl. Abschnitt 3.2).

Für jede Zusatzkostenart werden Kostenberechnungsgleichungen aufgestellt, die neben der Änderungsdauer weitere Variablen enthalten. Die Variablen wurden aus der Literatur und anhand von Experteninterviews identifiziert. Während in Abschnitt 3.2 die Zusatzkostenarten identifiziert wurden, werden in diesem Abschnitt also die entsprechenden Variablen in Gleichungen gefasst. Dabei führt eine abweichende fertigungsspezifische Änderungsdauer einer werkzeuggebundenen und einer AM-Bauteilversion zu einer unterschiedlichen Höhe der Zusatzkosten. Der Unterschied stellt das **Reduktionspotenzial der jeweiligen Zusatzkostenart** dar. Über die fertigungsspezifische Änderungsdauer eines werkzeuggebundenen Bauteils kann zudem jeweils das **maximale Reduktionspotenzial je Zusatzkostenart** berechnet werden – verglichen mit einer fertigungsspezifischen Änderungsdauer von 0 Tagen. In Abschnitt 6.2 werden ein Erwartungswert und ein Intervall der fertigungsspezifischen Änderungsdauer einer werkzeuggebundenen Bauteilversion prognostiziert (vgl. Abbildung 6.22). Wird, statt des Erwartungswertes, das Intervall der fertigungsspezifischen Änderungsdauer bei der Berechnung eingesetzt, können für das **maximale Reduktionspotenzial je Zusatzkostenart** Quantile angegeben werden. Das resultierende Intervall gibt an, in welchem Bereich das maximale Reduktionspotenzial bei einer definierten Irrtumswahrscheinlichkeit liegt.

Bewerten des Gewährleistungskosten-Reduktionspotenzials

Wie die Durchsicht von Änderungsanträgen zeigte, wird ein Teil der geometrischen Bauteiländerungen aufgrund von Gewährleistungsfällen durchgeführt, die zu Kosten für das Unternehmen führen. Je schneller die Änderung umgesetzt ist, desto früher werden keine Bauteile mehr produziert, die Gewährleistungskosten (GwK) verursachen, vgl. Expertenbefragung zu Zusatzeffekten in Abschnitt 3.2. Nachfolgend wird eine Herangehensweise vorgestellt, um das Reduktionspotenzial von GwK durch eine kürzere Änderungsdauer zu bewerten.

Hierfür wird zunächst das GwK-Risiko eines produzierten Bauteils auf Basis eines Referenzprojekts bestimmt, vgl. Abbildung 6.38. Der Fahrzeugtyp beeinflusst die Höhe der GwK (vgl. Schreiner 2012, S. 40; Anhang 28). Um das GwK-Risiko zu bestimmen, soll daher ein Referenzprojekt gewählt werden, welches dem Fahrzeugtyp des Anwendungsprojektes gleicht. Zunächst erfolgt ein Zugriff auf dessen Änderungsdaten. Von Interesse sind Antrags-ID, Status, Erstelldatum, Änderungskostenart, involvierte Bauteile und deren Baugruppenzuordnung, Umsetzungsdatum und Änderungsart, etwa als Freitext. Dann werden genehmigte Anträge ausgewählt (Filter 1), die in einem definierten Zeitraum nach Serienstart erstellt wurden (Filter 2). Laut der Studie in Abschnitt 3.1 fällt die Änderungsanzahl bereits einige Monate nach Serienstart stark – der betrachtete Zeitraum sollte sich daran orientieren, um den Erhebungsaufwand zu reduzieren. Weiter werden nur Anträge mit Werkzeugänderungskosten (Filter 3) betrachtet, die Bauteile betreffen, die nicht dem Antrieb zugeordnet sind (Filter 4). Über eine Kategorisierung der Änderungslösung werden nicht-geometrische Änderungen ausgeschlossen (Filter 5). So kann die Anzahl geometrischer Bauteiländerungen nach Serienstart n_{AnSOP} des Referenzprojekts bestimmt werden (Schritt 1). Anschließend wird ein zu betrachtender Reklamationszeitraum der GwK definiert (Filter 6). Über die Antrags-ID wird dann, sofern der Änderung Gewährleistungsfälle vorangingen, jede geometrische Bauteiländerung i mit den GwK_i verknüpft (Schritt 2). Dann wird je Bauteiländerung i der GwK-relevante Produktionszeitraum Dpr_i ermittelt, indem die Differenz zwischen dem Serienstart (SOP) und dem Umsetzungsdatum der Änderung UD_i berechnet wird (Schritt 3). Gewährleistungskosten werden, angelehnt an SCHREINER, auf die monatliche

Produktionsstückzahl normiert, um sie fahrzeugübergreifend vergleichen zu können (Schreiner 2012, S. 51). Daher werden in Schritt 4 je Änderung die GwK_i durch den GwK-relevanten Produktionszeitraum Dpr_i und die mittlere Monatsstückzahl nP des Referenzprojekts geteilt. Die GwK-relevanten Änderungen werden aufsummiert und durch die Anzahl der geometrischen Bauteiländerungen n_{AnSOP} geteilt. Ergebnis ist das mittlere GwK-Risiko eines produzierten Bauteils $\hat{y}(R_{GwK})$, basierend auf den Daten eines Referenzprojekts.

$$\hat{y}(R_{GwK}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{GwK_i}{Dpr_i} * \frac{1}{nP} \right) * \frac{1}{n_{AnSOP}} \quad (31)$$

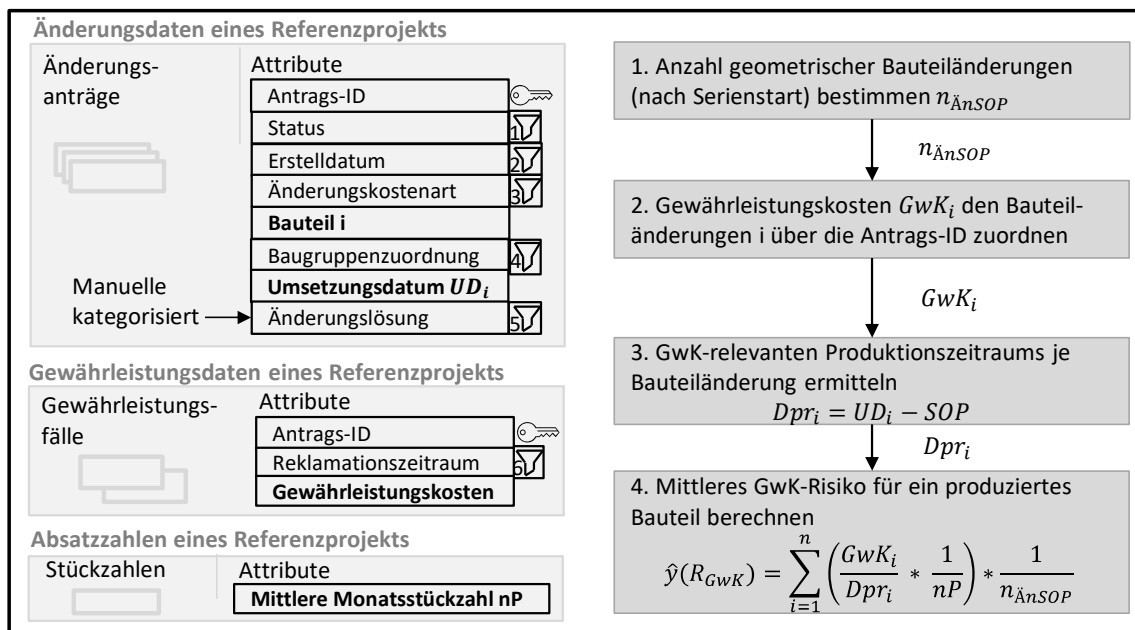


Abbildung 6.38: Bestimmen des mittleren GwK-Risikos eines produzierten Bauteils

Das mittlere GwK-Risiko eines produzierten Bauteils $\hat{y}(R_{GwK})$ wird mit der prognostizierten fertigungsspezifischen Änderungsdauer sowie der Jahresstückzahl des Anwendungsprojekts $y(St_a)$ multipliziert und durch 365 Tage dividiert, vgl. Abbildung 6.39. Durch Einsetzen des Erwartungswerts der fertigungsspezifischen Änderungsdauer \hat{y}_{*fAD} wird der Erwartungswert des **maximalen GwK-Reduktionspotenzials** $\hat{y}_{*}(Kr_{GwK})$ berechnet, Formel (32). Wird die prognostizierte Änderungsdauer einer AM-Bauteilversion in die Formel eingesetzt, kann aus der Differenz das **GwK-Reduktionspotenzial mit AM** berechnet werden. Zusätzlich kann das maximale GwK-Reduktionspotenzial als Histogramm mit Quantilen angegeben werden, wenn

zur Berechnung die über Zufallszahlen approximierte Verteilung der fertigungsspezifischen Änderungsdauer $\hat{Y}_{*f\ddot{A}D}$ verwendet wird, Formel (32).

$$\begin{aligned}\hat{y}_{*}(Kr_{GwK}) &= \hat{y}_{*f\ddot{A}D} * y(St_a)/365 * \hat{y}(R_{GwK}) \\ \hat{Y}_{*}(Kr_{GwK}) &= \hat{Y}_{*f\ddot{A}D} * y(St_a)/365 * \hat{y}(R_{GwK})\end{aligned}\quad (32)$$

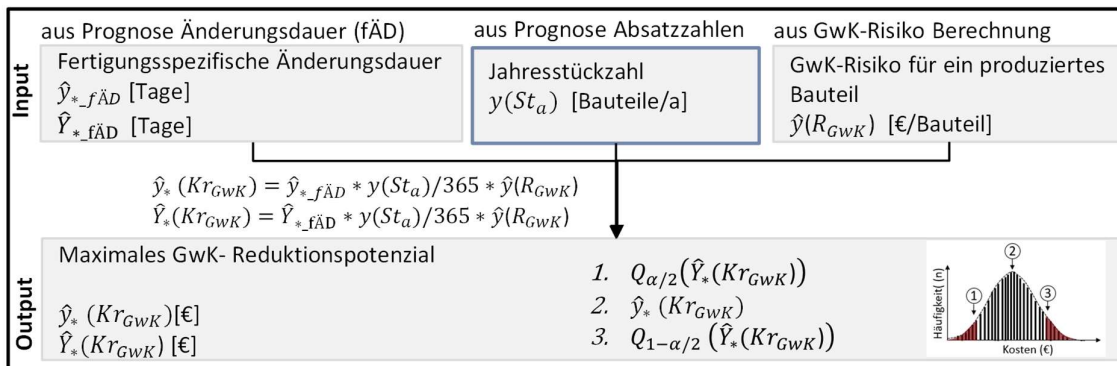


Abbildung 6.39: Bewertung des maximalen GwK-Reduktionspotenzials

Bewerten des Produktkosten-Reduktionspotenzials

Einige Geometrieänderungen werden aufgrund von Fügeproblemen durchgeführt (vgl. Studie in Abschnitt 3.1). Diese Änderungen können zur Reduktion von Produktkosten beitragen. Werden die Änderungen schneller umgesetzt, werden die mit der Änderung einhergehenden Produktkostenreduzierungen (PK = Produktkosten) schneller wirksam.

Da zum Prognosezeitpunkt keine Änderungsdaten des Anwendungsprojekts vorliegen, wird das PK-Reduktionspotenzial für ein produziertes Bauteil, analog zum GwK-Reduktionspotenzial, auf Basis eines Referenzprojektes bestimmt (vgl. Abbildung 6.40). Zunächst werden nur genehmigte Änderungen (Filter 1) nach Serienstart (Filter 2) mit Werkzeugänderungskosten (Filter 3) ausschließlich des Fahrzeugbereichs Antrieb (Filter 4) kategorisiert. Dann werden geometrische Bauteiländerungen ausgewählt (Filter 5) und deren Anzahl $n_{\ddot{A}nSOP}$ bestimmt (Schritt 1). Jenen Änderungen, die zu einer Reduktion der fügespezifischen Produktkosten beitragen, werden die entsprechenden Kostenreduktionen zugeordnet (Schritt 2). Der Anteil der aufgrund geometrischer Änderungen entstandenen kumulierten Produktkostenreduktion an der Änderungsanzahl $n_{\ddot{A}nSOP}$ ergibt schließlich das mittlere PK-Reduktionspotenzial für ein produziertes Bauteil $\hat{y}(R_{PK})$.

$$\hat{y}(R_{PK}) = \sum_{i=1}^n PK_i * \frac{1}{n_{\hat{\Delta}nSOP}} \tag{33}$$

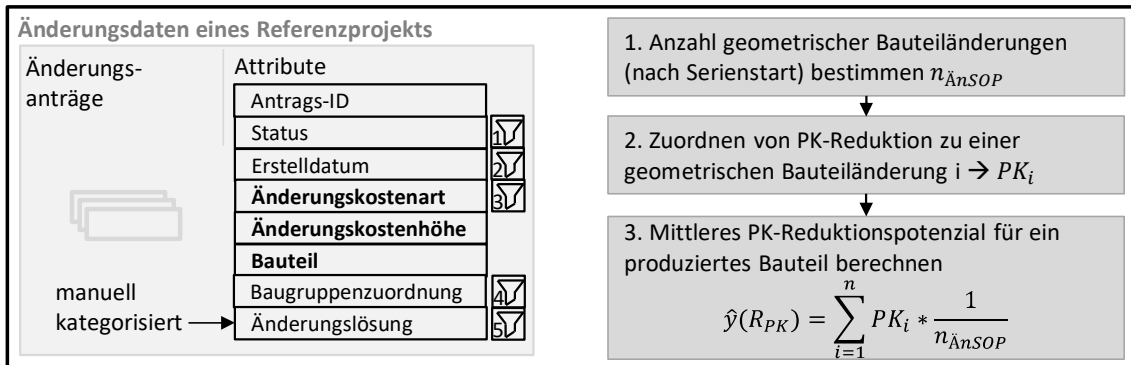


Abbildung 6.40: Bestimmen des Produktkosten-Reduktionspotenzials durch schnelle Änderungen

Das mittlere PK-Reduktionspotenzial eines produzierten Bauteils $\hat{y}(R_{PK})$ wird mit der Jahresstückzahl $y(St_a)/365$ des Anwendungsprojekts und der prognostizierten fertigungsspezifischen Änderungsdauer (Erwartungswert $\hat{y}_{*f\Delta D}$ bzw. über Zufallszahlen approximierte Verteilung $\hat{Y}_{*f\Delta D}$) eines Bauteils multipliziert. So kann das **maximal erwartete PK-Reduktionspotenzial** $\hat{y}_*(Kr_{PK})$ einer Änderung mit entsprechenden Quantilen berechnet werden. Ein Vergleich zur AM-Bauteilversion ist möglich, indem stattdessen die prognostizierte AM-Änderungsdauer eingesetzt wird.

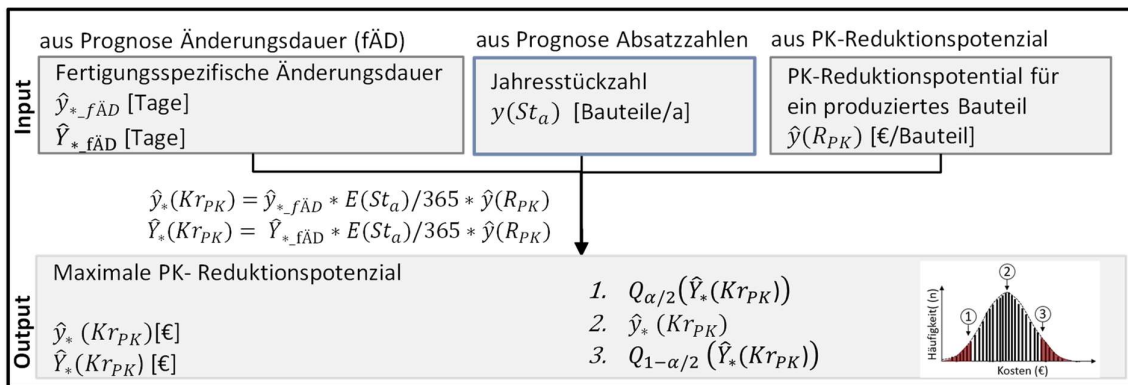


Abbildung 6.41: Bewertung des maximalen PK-Reduktionspotenzials

Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzial

Änderungen werden durchgeführt, um einen Soll-Zustand herzustellen (Conrat Niemerg 1997, S. 52–54). Bis zur Umsetzung der Änderung wird dieser Soll-Zustand alternativ zum Teil mittels Nacharbeit erreicht (vgl. Expertenbefragung in Abschnitt 3.2 und Conrat Niemerg 1997, S. 155). Nacharbeit erfordert zusätzliche Personalkapazität, was auch ein wesentlicher Kostentreiber ist (Conrat Niemerg 1997, S. 156). Die Lohnkosten zur Herstellung eines Bauteils, die oft den größten Anteil der Fertigungseinzelkosten ausmachen, berechnen sich über die erforderliche Arbeitszeit zur Herstellung und den Stundenlohn (Schlink 2017, S. 193). Somit wird das maximale Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzial berechnet, indem die prognostizierte fertigungsspezifische Änderungsdauer der werkzeuggebundenen Bauteilversion mit der Stückzahl, dem Stundenlohn und der Nacharbeitszeit multipliziert wird (vgl. Abbildung 6.42). Stückzahl, Stundenlohn und Nacharbeitszeit können vom Anwender frei angepasst werden, sodass die Auswirkungen, abhängig von der prognostizierten fertigungsspezifischen Änderungsdauer greifbar werden. Analog zu den bisher vorgestellten Zusatzeffekten wird durch die erwartete fertigungsspezifische Änderungsdauer $\hat{y}_{*f\ddot{A}D}$ das erwartete **maximale Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzial** $\hat{y}_*(Kr_{Nacharbeit})$ berechnet (verglichen mit null Tagen Änderungsdauer). Mithilfe der approximierten Verteilung der fertigungsspezifischen Änderungsdauer $\hat{Y}_{*f\ddot{A}D}$ werden zudem Quantile des maximalen Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzials $\hat{Y}_*(Kr_{Nacharbeit})$ berechnet.

Wird, statt der fertigungsspezifischen Änderungsdauer $\hat{y}_{*f\ddot{A}D}$, die prognostizierte Änderungsdauer einer AM-Version eingesetzt, gibt die Differenz das **Reduktionspotenzial von Nacharbeitskosten** an.

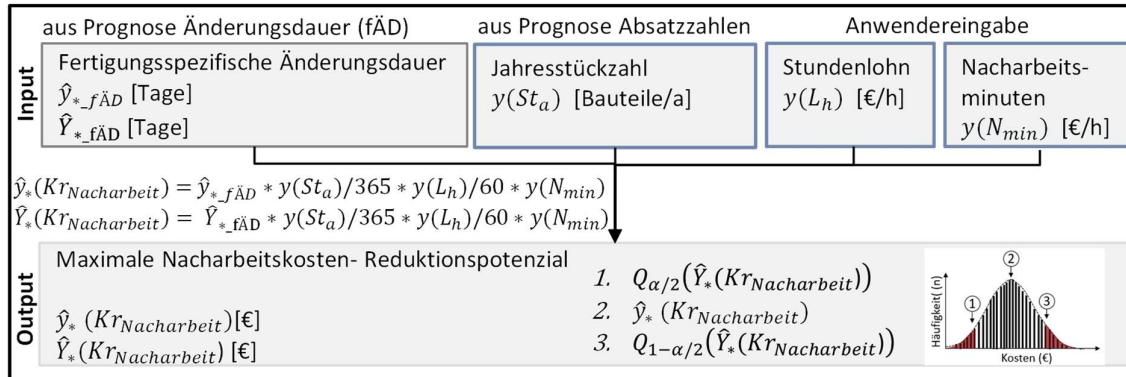


Abbildung 6.42: Bewertung des maximalen Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzials

Vorproduktion – Voraussetzungen für die Notwendigkeit und damit verbundene Kosten

Laut der durchgeführten Expertenbefragung entstehen in der Praxis bei einer Vorproduktion Kosten für zusätzlich erforderliche Behälter, Lagerfläche und zusätzliche Personalkapazität (vgl. Abschnitt 3.2). Nicht bei jeder Änderung nach Serienstart ist eine Vorproduktion erforderlich. In der Expertenbefragung wurden Voraussetzungen für eine Vorproduktion und für das Entstehen damit verbundener Kosten identifiziert. Diese sind in Anhang 29 zusammengefasst. Wird etwa bei einer geometrischen Änderung das alte Werkzeug nicht mehr angepasst, sondern ein neues erstellt, sind Vorproduktionskosten oft zu vernachlässigen. Bei einer Vorproduktion wird ein Bauteilbestand hergestellt, der den Produktionsstillstand überbrücken muss (Sudlhoff 2007, S. 155; Becker 2018, S. 79). Daher entstehen aufgrund der Vorproduktion nur zusätzliche Kosten, wenn hohe Bestände nicht ohnehin die Regel sind. Wenn die Auslastung der Produktion generell niedrig ist, kann unter Umständen auch vorproduziert werden, ohne dass weitere signifikante Kosten entstehen, etwa, wenn Personalkapazität vorhanden und bezahlt ist, Behälter ausreichend verfügbar sind und Lagerfläche vorgehalten ist, vgl. Anhang 29.

Vorproduktion – Berechnung der Vorproduktionsstückzahl

Wesentliche Einflussgrößen auf die erforderliche Stückzahl einer Vorproduktion St_{VP} sind laut der Expertenbefragung die Stückzahl im Normalbetrieb und die prognostizierte Änderungsdauer, zu der die Bauteilfertigung stillsteht (Anhang 29). Außerdem wird ein Sicherheitsfaktor beaufschlagt, um zu vermeiden, dass die Vorproduktionsstückzahl nicht

ausreicht. Jahresstückzahl und Sicherheitsfaktor können vom Anwender frei angepasst werden, um die Sensitivität des Zusatzeffekts greifbar zu machen.

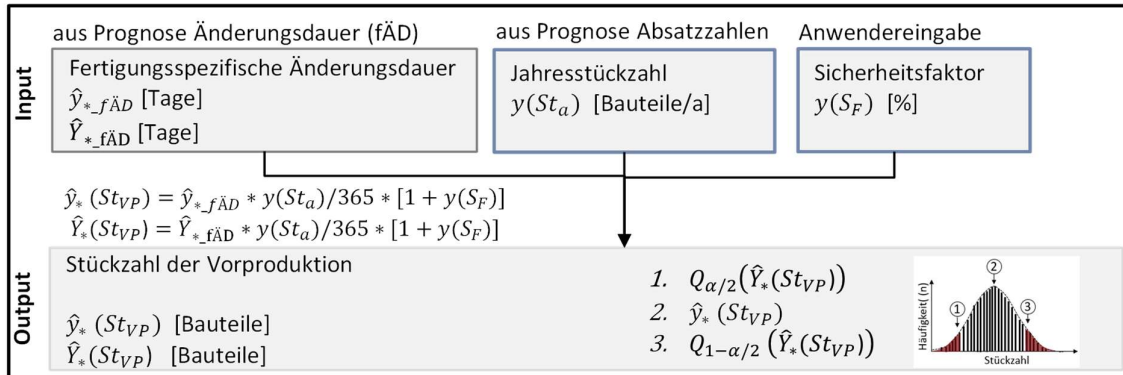


Abbildung 6.43: Prognose der erforderlichen Vorproduktionsstückzahl

Vorproduktion – Reduktionspotenzial von zusätzlichen Kapazitätskosten

Bei einer Vorproduktion werden kurzfristig mehr Bauteile hergestellt (Becker 2010a, S. 79). Dadurch steigt der Bedarf an Personalkapazität, der häufig durch zusätzliche Schichten bewältigt wird und mit einem Schichtaufschlag auf die Fertigungseinzelkosten abgeschätzt wird (vgl. Sudhoffs 2007, S. 237; Anhang 30). So berechnet sich das **maximale Reduktionspotenzial von Zusatzkapazitätskosten** gemäß Formel (34) über die Stückzahl der Vorproduktion $\hat{y}_*(St_{VP})$, die Fertigungseinzelkosten pro Bauteil $y(FEK_{VP})$ und einen prozentualen Schichtaufschlagsfaktor $y(SA_{VP})$. Das Ergebnis kann als Erwartungswert $\hat{y}_*(Kr_{ZK})$ sowie als Verteilung $\hat{Y}_*(Kr_{ZK})$ mit Quantilen dargestellt werden.

$$\begin{aligned}\hat{y}_*(Kr_{ZK}) &= \hat{y}_*(St_{VP}) * y(FEK_{VP}) * y(SA_{VP}) \\ \hat{Y}_*(Kr_{ZK}) &= \hat{Y}_*(St_{VP}) * y(FEK_{VP}) * y(SA_{VP})\end{aligned}\quad (34)$$

Ersetzt man den Erwartungswert $\hat{y}_*(St_{VP})$ durch die erwartete Vorproduktionsstückzahl einer AM-Bauteilversion, kann aus der Differenz zu $\hat{y}_*(Kr_{ZK})$ das **Reduktionspotenzial** abgeschätzt werden, für den Fall, dass das Bauteil additiv hergestellt wird und eine Änderung nach Serienstart auftritt.

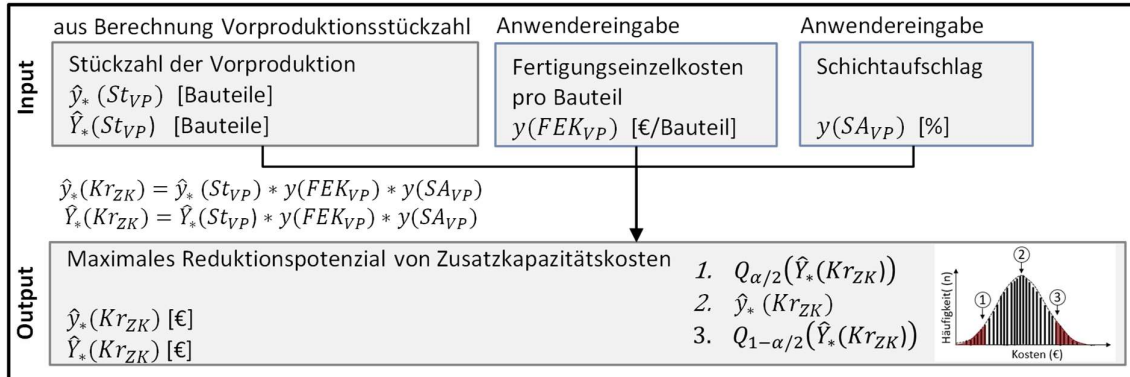


Abbildung 6.44: Bewertung des maximalen Zusatzkapazitätskosten-Reduktionspotenzials

Vorproduktion – relevanter Mietumfang für Fläche und Standardbehälter

Bei einer Vorproduktion wird zuerst der notwendige Teilbestand hergestellt, bevor er während der Änderung in den vom Fahrzeugwerk vorgegebenen Intervallen wieder abgerufen wird (Sudlhoff 2007, S. 154–155). Bis zur Fertigstellung der Änderung sollte er daher nahezu vollständig abgerufen sein (vgl. Abbildung 6.45).

Um bei der Berechnung der Zusatzkosten die Dauer der Vorproduktion zu berücksichtigen, soll vom Anwender eine exemplarische Vorproduktionsdauer VPD angegeben werden, die sich an der fertigungsspezifischen Änderungsdauer fÄD orientiert. Dies kann ein Erfahrungswert sein. Etwa, dass für eine fertigungsspezifische Änderungsdauer fÄD von n Tagen im Durchschnitt y_{z_VP} -% der Dauer zusätzlich an Vorproduktion notwendig ist. Zusätzliche Lagerfläche und zusätzliche Standardbehälter werden in der Zeit benötigt, zu der die vorproduzierten Bauteile gelagert werden müssen. Der **relevante Mietumfang während der Vorproduktion** ergibt sich aus den beiden Teilen Bestandsaufbau und Bestandsabruf (vgl. Sudlhoff 2007, S. 236–239; Abbildung 6.45). Er beschreibt, für wie viele Bauteile, multipliziert mit der Anzahl an Tagen, zusätzliche Lagefläche und Behälter erforderlich sind.

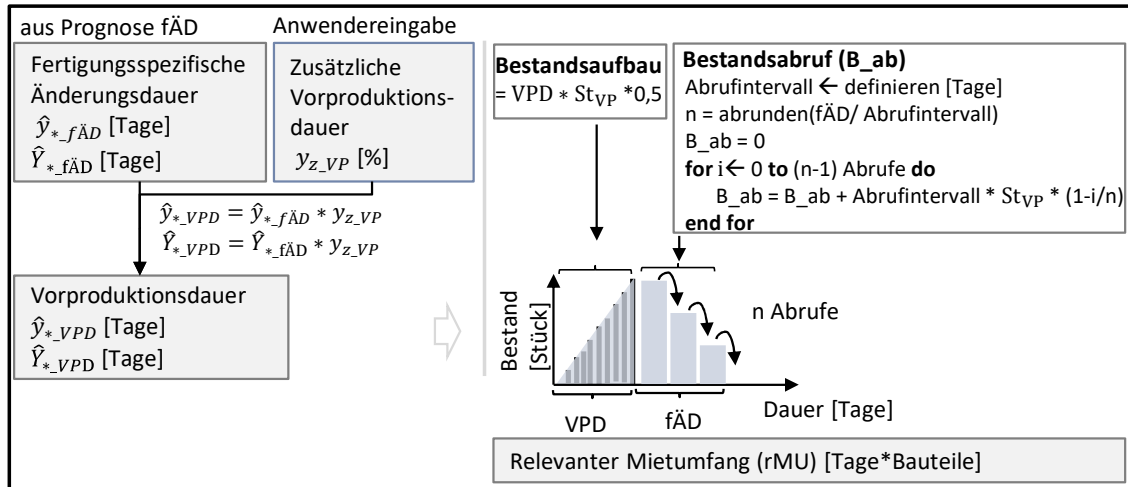


Abbildung 6.45: Relevanter Mietumfang für Fläche und Standardbehälter

Vorproduktion – Reduktionspotenzial von Lagerflächenkosten

Kosten für Lagerfläche hängen, nach RENNEMANN, unmittelbar von der benötigten Fläche, der Stapelhöhe und den Hallenkosten ab (Rennemann 2007, S. 144). Die Bauteilform und damit die Stapelbarkeit sowie die Robustheit beeinflussen die Packdichte in Behältern (Schulz 2014, S. 37–38). Bei einer Vorproduktion werden empfindliche Bauteile in Einmalverpackungen gelagert, da eine Herstellung weiterer Spezialbehälter teuer und zeitaufwändig ist. Werden für Bauteile im Normalbetrieb Standardbehälter (etwa KLTs) verwendet, ist dies auch bei einer Vorproduktion der Fall (vgl. Anhang 32). Daher soll zur Modellierung der Packdichte eine Zufallsstichprobe von Standardbehältern und eine von Einmalverpackungen verwendet werden (vgl. Abbildung 6.46). Da die Packdichte in Prozent angegeben ist, eignet sich eine Maximum-Likelihood-Schätzung der Parameter einer Betaverteilung (Schritt 1). Über die Verteilungsparameter α und β werden in Schritt 2 Vektoren zufallsverteilter Packdichten für Standardbehälter \hat{Y}_{*S_PD} und Einmalverpackungen \hat{Y}_{*E_PD} erzeugt. Über die in Abschnitt 5.2.3 erwähnte Formel $\alpha/(\alpha+\beta)$ wird der Erwartungswert der Packdichten für Standardbehälter \hat{y}_{*S_PD} und Einzelverpackungen \hat{y}_{*E_PD} berechnet (Schritt 3). Zudem werden die 2,5-%-, 25-%-, 50-%-, 75-%- und 97,5-%-Quantile der Packdichten kalkuliert. So kann ein Anwender bei der nachfolgenden Prognose des **maximalen Reduktionspotenzials von Kosten für Lagerfläche** (vgl. Abbildung 6.47) den Erwartungswert für die Packdichte eines Bauteils PD_{BT} oder eines der Quantile verwenden, je nachdem, ob das Bauteil hinsichtlich

Robustheit und Stapelbarkeit als sehr schlecht ($\hat{=} 2,5\%$ -Quantil), schlecht, mittel, gut oder sehr gut ($\hat{=} 97,5\%$ -Quantil) eingestuft wird.

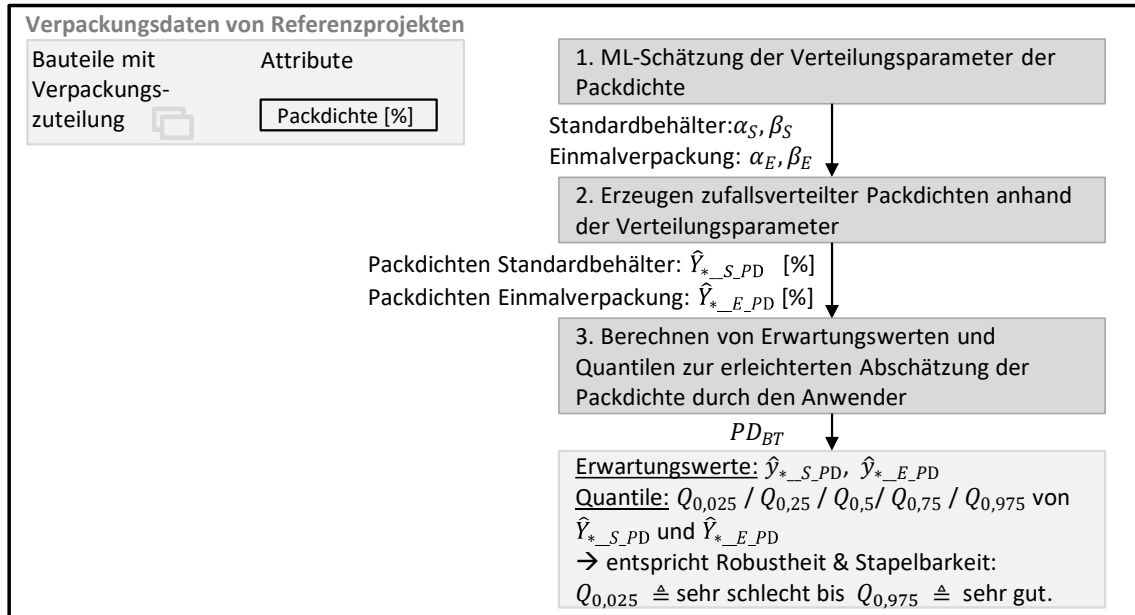


Abbildung 6.46: Berechnung der Packdichte

Die Packdichte PD_{BT} ergibt sich also aus der Verpackungsart und der Bewertung von Robustheit und Stapelbarkeit des Bauteils. Die erforderliche Lagerfläche $y(A_{BT})$ ist dementsprechend das Bauteilvolumen $y(V_{BT})$ geteilt durch die Packdichte PD_{BT} und Lagerhöhe $y(h_L)$ (Rennemann 2007, S. 144–146; Sykora 2021, S. 91). In der Folge wird das **maximale Reduktionspotenzial der Kosten für Lagerfläche** $\hat{y}_*(Kr_{A_L})$ bzw. $\hat{Y}_*(Kr_{A_L})$ über das Produkt des relevanten Mietumfangs rMU, den Flächenkosten $y(K_F)$ und der erforderlichen Lagerfläche $y(A_{BT})$ eines Bauteils berechnet. Zur Erinnerung: Der relevante Mietumfang wird aus der fertigungsspezifischen Änderungsdauer und der Vorproduktionsdauer ermittelt (vgl. Abbildung 6.45). Wird der Mietumfang über die Änderungsdauer einer AM-Bauteilversion bestimmt, kann, analog zu den anderen Zusatzkostenarten, über die Differenz der resultierenden Lagerflächenkosten das **Lageflächenkosten-Reduktionspotenzial** ermittelt werden.

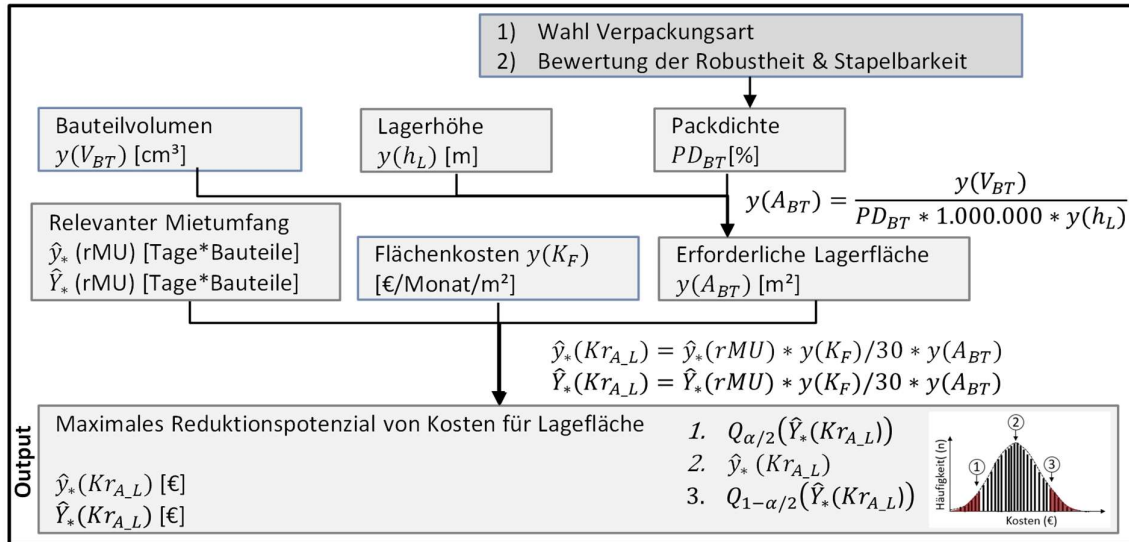


Abbildung 6.47: Bewertung des maximalen Lagerflächenkosten-Reduktionspotenzials bei Änderungen

Vorproduktion – Reduktionspotenzial von Behälterkosten

Laut RENNEMANN kommt, statt einem Kauf, auch für die Behälter eine Anmietung in Betracht (Rennemann 2007, S. 171). Sind aufgrund einer Vorproduktion zusätzliche Standardbehälter erforderlich, werden daher als Datenbasis die Mietkosten verwendet. Für die Modellierung von Einmalverpackung werden Investitionskosten verwendet (Rennemann 2007, S. 170). Im Zuge einer Voruntersuchung wurde eine Zufallsstichprobe von Bauteilen untersucht. Die Kosten von Einmalverpackungen korrelierten, gemäß COHEN, stark mit dem Bauteilvolumen ($r = 0,75$ bei $n = 42$ Bauteilen) (Cohen 1988, S. 83). Auch die Mietkosten der Standardbehälter weisen eine starke Korrelation mit dem Bauteilvolumen auf ($r = 0,57$ bei $n = 54$ Bauteilen). Daher werden die Kosten von Einmalverpackungen und Verpackungsmietkosten von Standardbehältern anteilig am Bauteilvolumen modelliert, vgl. Abbildung 6.48. Zunächst erfolgt in Schritt 1 eine Maximum-Likelihood-Schätzung der Verteilungsparameter für die Volumenverpackungskosten von Einmalverpackungen und Volumenverpackungsmietkosten von Standardbehältern. In einer weiteren Voruntersuchung zeigten sowohl die Volumenverpackungsmietkosten (rechtsschief, Variationskoeffizient bei 1,31) als auch die Volumenverpackungskosten (rechtsschief, Variationskoeffizient 0,76) Eigenschaften einer Log-Normalverteilung (Abbildung 5.6), weshalb die entsprechenden Verteilungsparameter $\hat{\mu}_S, \hat{\sigma}_S$ bzw. $\hat{\mu}_E, \hat{\sigma}_E$ geschätzt werden sollen. Die Log-Normalverteilung der Volumenkosten für

Verpackungen bedeutet, dass wenigen sehr teuren Behältern viele günstige Behälter gegenüberstehen. Aus den Parametern können in Schritt 2 die Verteilungen der Volumenverpackungsmietkosten $\hat{Y}_{*_S_BmK}$ sowie der Volumenverpackungskosten $\hat{Y}_{*_E_BK}$ approximiert werden. Über die in Abbildung 5.6 erwähnte Formel zur Berechnung des Erwartungswertes einer Log-Normalverteilung $\exp(\hat{\mu} - \hat{\sigma}^2/2)$ werden die Erwartungswerte $\hat{Y}_{*_S_BmK}$ und $\hat{Y}_{*_E_BK}$ berechnet. Die Aussage der Experten, dass eine hohe Robustheit und gute Stapelbarkeit der Bauteile zu niedrigeren Behälterkosten führt (vgl. Anhang 32), konnte durch eine Korrelationsanalyse bestätigt werden. So besteht, gemäß COHEN, ein mittelstarker negativer Zusammenhang zwischen Packdichte und Volumenverpackungsmietkosten der Standardbehälter ($r = 0,40$ bei $n = 54$ Bauteilen) sowie zwischen Packdichte und Volumenverpackungskosten der Einmalverpackung ($r = 0,43$ bei $n = 42$ Bauteilen). Die 2,5%-, 25%-, 50%-, 75%- und 97,5%-Quantile von $\hat{Y}_{*_S_BmK}$ und $\hat{Y}_{*_E_BK}$ sollen den Anwender, analog zur Bestimmung der Packdichte eines Bauteils, bei der Bewertung der Kosten unterstützen. Aufgrund des bestätigten negativen Zusammenhangs repräsentiert das 2,5%-Quantil die Volumenverpackungskosten der sehr robusten und sehr gut stapelbaren Bauteile, während das 97,5%-Quantil die Kosten der wenig robusten und sehr schlecht stapelbaren Bauteile beziffert.

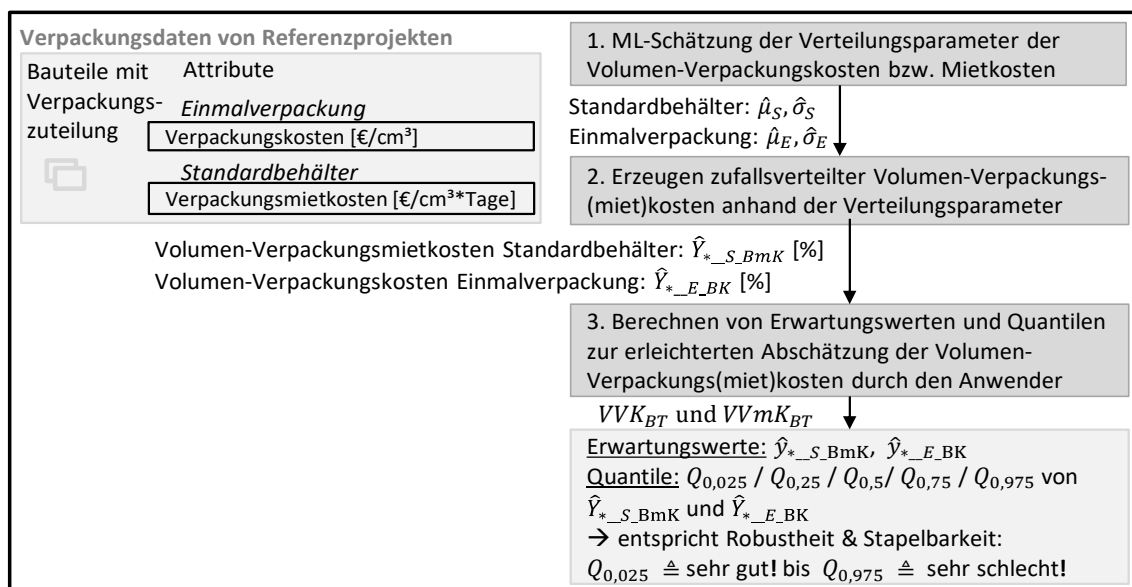


Abbildung 6.48: Berechnung von Volumenverpackungskosten

Bei der A-priori-Berechnung des **maximalen Reduktionspotenzials von**, aus der Vorproduktion resultierenden **Behälterkosten** $\hat{y}_*(Kr_B)$ bzw. $\hat{Y}_*(Kr_B)$ (vgl. Abbildung 6.49) wird die Verpackungsart festgelegt (Standardbehälter oder Einmalverpackung) und die Robustheit und Stapelbarkeit bewertet. Daraus resultieren entsprechende Volumenverpackungskosten VVK_{BT} respektive Volumenverpackungsmietkosten $VVmK_{BT}$. Bei Einmalverpackungen wird das maximale Reduktionspotenzial über das Produkt aus Volumenverpackungskosten VVK_{BT} , der Stückzahl der Vorproduktion sowie dem Bauteilvolumen $y(V_{BT})$ berechnet. Bei Standardbehältern erfolgt die Kalkulation über das Produkt der Volumenverpackungsmietkosten $VVmK_{BT}$, dem relevanten Mietumfang (in Tagen*Bauteile) sowie dem Bauteilvolumen $y(V_{BT})$. Analog zu den anderen Zusatzkostenarten werden Erwartungswerte und Quantile des maximalen Reduktionspotenzials berechnet – zudem findet ein **Vergleich zu den entstehenden Behälterkosten mit AM** statt, wenn der relevante Mietumfang $\hat{y}_*(rMU)$ bzw. die Vorproduktionsstückzahl $\hat{y}_*(St_{VP})$ durch den bei der Änderung einer AM-Bauteilversion erforderlichen Mietumfang beziehungsweise die notwendige Vorproduktionsstückzahl ersetzt wird.

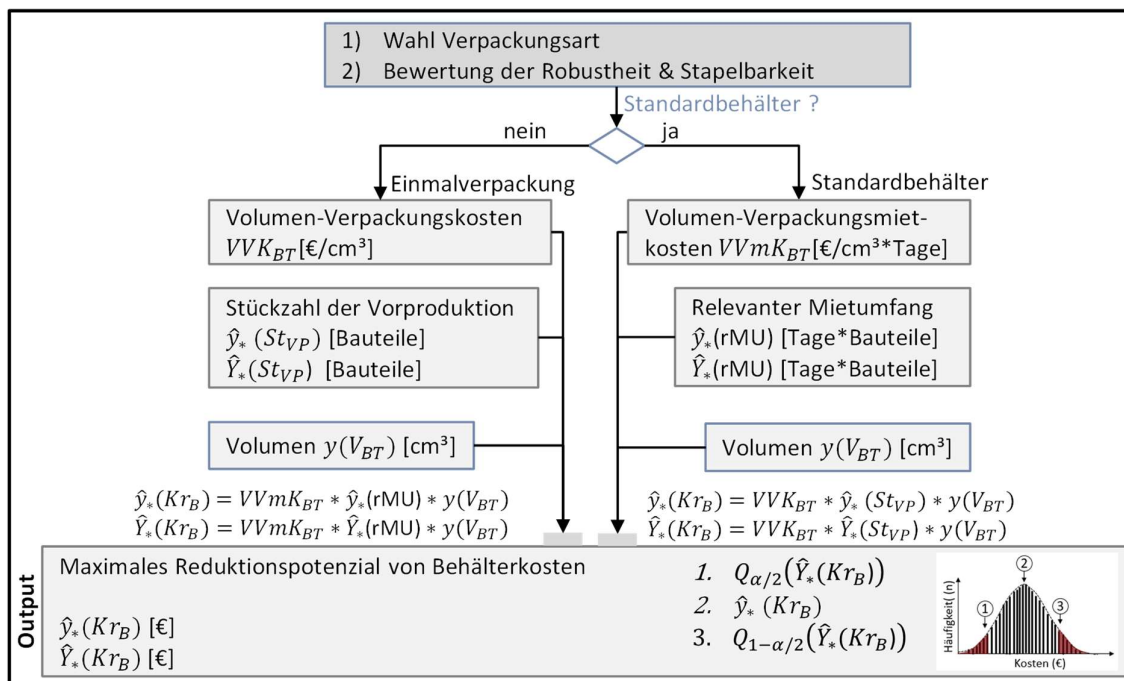


Abbildung 6.49: Bewertung des maximalen Behälterkosten-Reduktionspotenzials bei Änderungen

6.5 Baustein 1: Gegenüberstellung aller Potenziale und vereinfachte Berechnung des Gesamtpotenzials

In diesem Abschnitt erfolgt die Gegenüberstellung potenzieller fertigungsspezifischer Änderungskosten und Zusatzeffekte der werkzeuggebundenen und der AM-Version eines Bauteils, um das Gesamtpotenzial hinsichtlich Änderungsflexibilität zu quantifizieren, welches durch die Wahl der Fertigungstechnologie AM entsteht. Eine vereinfachte Berechnung des Gesamtpotenzials ist in Abbildung 6.51 dargestellt.

Gegenüberstellung fertigungsspezifischer Änderungskosten

Mit Baustein 1, Schritt 2 (Abschnitt 6.2) werden die im PEP kumulierten fertigungsspezifischen Änderungskosten der werkzeuggebundenen Bauteilversion prognostiziert. Mit Schritt 3 (Abschnitt 6.3) werden die Änderungskosten der AM-Version für einzelne Änderungsarten und Zeitpunkte im PEP prognostiziert, vgl. Abbildung 6.50.

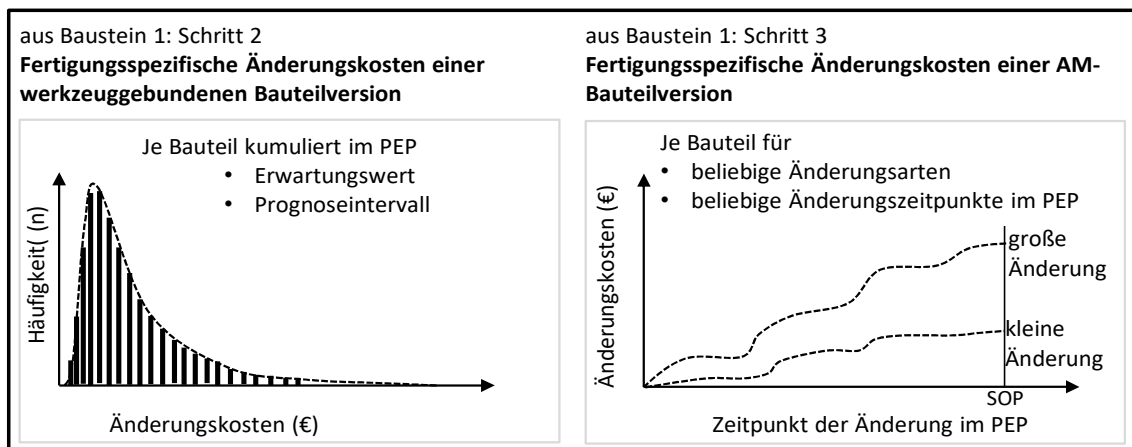


Abbildung 6.50: Darstellung der fertigungsspezifischen Änderungskosten einer werkzeuggebundenen und einer AM-Version eines Bauteils

Die Prognose über Wirkzusammenhänge aus historischen Änderungsdaten (Abschnitt 6.2) ermöglicht es, die fertigungsspezifischen Änderungskosten einer werkzeuggebundenen Bauteilversion kumuliert über den PEP als Erwartungswert inklusive Prognoseintervall anzugeben und in einem Histogramm zu veranschaulichen. Historische Änderungsdaten sind bei AM-Serienbauteilen zum heutigen Stand nicht vorhanden. Mit der in Abschnitt 6.3 entwickelten expertenbasierten Methode können die fertigungsspezifischen Änderungs-

kosten für beliebige Änderungsarten wie etwa eine kleine Änderung des Radius oder eine große Abmessungsänderung zu unterschiedlichen Zeitpunkten im PEP prognostiziert werden. Das Reduktionspotenzial der fertigungsspezifischen Änderungskosten $\hat{y}_*(Kr_{AM-f\ddot{A}K})$ wird vereinfacht berechnet, indem die prognostizierten fertigungsspezifischen Änderungskosten der AM-Version $f\ddot{A}K_{*AM(\ddot{A}ZP)}$ von den fertigungsspezifischen Änderungskosten der werkzeuggebundenen Version $f\ddot{A}K_{*WG}$ subtrahiert und mit der Änderungswahrscheinlichkeit des Bauteils $\pi_{*G\ddot{A}}$ multipliziert werden, vgl. Formel (35). Für die fertigungsspezifischen Änderungskosten der AM-Version werden die maximal möglichen Änderungskosten, also die Kosten einer großen Änderung zu dem am spätesten erwarteten Änderungszeitpunkt des Bauteils ($\ddot{A}ZP$) angesetzt. Da manche Bauteile im PEP mehrere geometrische Änderungen haben (vgl. Abschnitt 6.2.5) und die Änderungskosten daher mehrmals anfallen, wird mithilfe der prognostizierten Änderungsintensität $\pi_{*\ddot{A}I}$ des Bauteils entschieden, wie oft die fertigungsspezifischen Änderungskosten der AM-Version $f\ddot{A}K_{*AM(\ddot{A}ZP)}$ mit der wahrscheinlichen Änderungsanzahl $\ddot{A}A_*$ multipliziert werden, vgl. Abbildung 6.51.

$$\hat{y}_*(Kr_{AM-f\ddot{A}K}) = \pi_{*G\ddot{A}} * (f\ddot{A}K_{*WG} - \ddot{A}A_* * f\ddot{A}K_{*AM(\ddot{A}ZP)}) \quad (35)$$

Gegenüberstellung potenziell entstehender negativer Zusatzeffekte

Zusätzlich wird das Potenzial zur Reduktion von Zusatzkosten bei Änderungen nach SOP prognostiziert $\hat{y}_*(Kr_{AM-Zusatzpot.})$, falls der prognostizierte späteste Änderungszeitpunkt des Bauteils nach Serienstart erwartet wird, Formel (36). Dabei wird die Änderungswahrscheinlichkeit $\pi_{*G\ddot{A}}$ mit der Summe der einzelnen Reduktionspotenziale multipliziert – also mit dem Gewährleistungskosten-Reduktionspotenzial $\hat{y}_*(Kr_{GwK})$, dem Produktkosten-Reduktionspotenzial $\hat{y}_*(Kr_{PK})$, dem Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzial $\hat{y}_*(Kr_{Nach})$, sowie dem Reduktionspotenzial von zusätzlichen Kapazitätskosten $\hat{y}_*(Kr_{ZK})$, von Lagerflächenkosten $\hat{y}_*(Kr_{AL})$ und Behälterkosten $\hat{y}_*(Kr_B)$ im Fall einer Vorproduktion. Die Höhe einzelner Reduktionspotenziale hängt von der Differenz der prognostizierten Änderungsdauer der werkzeuggebundenen und der AM-Bauteilversion ab, vgl. Abschnitt 6.4.2.

$$\hat{y}_*(Kr_{AM-Zusatzpot.}) = \pi_{*G\ddot{A}} [\hat{y}_*(Kr_{GwK}) + \hat{y}_*(Kr_{PK}) + \hat{y}_*(Kr_{Nach}) + \hat{y}_*(Kr_{ZK}) + \hat{y}_*(Kr_{AL}) + \hat{y}_*(Kr_B)]_{AM-Zusatzpot.} \quad (36)$$

Das Gesamtpotenzial berechnet sich aus der Summe des Reduktionspotenzials der direkten Änderungskosten $\hat{y}_*(Kr_{AM-f\ddot{A}K})$ und der Zusatzeffekte $\hat{y}_*(Kr_{AM-Zusatzpot.})$, vgl. Formel (37).

$$\hat{y}_*(Kr_{AM-Gesamt}) = \hat{y}_*(Kr_{AM-f\ddot{A}K}) + \hat{y}_*(Kr_{AM-Zusatzpot.}) \quad (37)$$

Da Änderungen im PEP in Bauphasen einfließen, kann eine kürzer dauernde Änderung mit höherer Wahrscheinlichkeit in einer früheren Bauphase einsetzen, was einen Vorteil im Entwicklungsprozess darstellt, vgl. Abschnitt 6.4.1. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit dessen ist die Änderungsdauer $\ddot{A}D_j$ eines AM-Bauteils vor Serienstart erforderlich. Diese ergibt sich, wenn die fertigungsspezifische Änderungsdauer zu einem Zeitpunkt vor Serienstart $f\ddot{A}D_{*AM(\ddot{A}ZP)}$ – angegeben in Arbeitstagen – mit 7/5 Tagen multipliziert und durch den fertigungsspezifischen Anteil der Änderungsdauer $f\ddot{A}D$ dividiert wird. Anschließend wird der prozentuale Anteil der historisch nicht zur nächsten Bauphase umgesetzten Änderungen (Anteil 1) mit dem Anteil an Änderungen multipliziert, welche bei einer Änderungsdauer $\ddot{A}D_j$ eine Bauphase früher umsetzbar gewesen wären (Anteil 2).

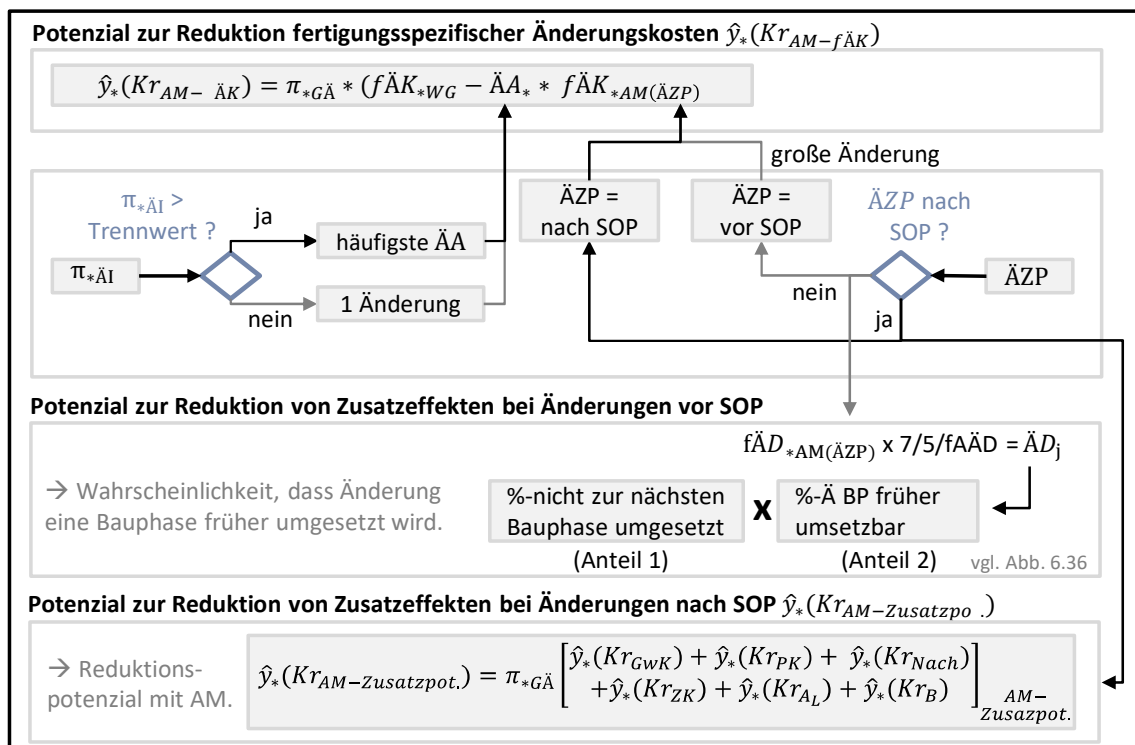


Abbildung 6.51: Vereinfachte Berechnung des Gesamtpotenzials

6.6 Baustein 2: Schritt 1 – Identifikation von Innovationsideen

Ziel von Baustein 2 ist es, für ein neues Fahrzeug bereits frühzeitig im PEP Umfänge zu identifizieren, die additiv hergestellt werden sollen, um die im Lebenszyklus ab Serienstart erforderliche Änderungsflexibilität zu adressieren (vgl. Abschnitt 6.6 - 6.8). Änderungen gemäß Baustein 1 werden nicht betrachtet, könnten aber in die Bewertung integriert werden.

In Abschnitt 2.3 wurden aus Studien die relevanten Trends des Automobilbaus zusammengefasst. Die Trends Konnektivität, automatisiertes Fahren, Elektrifizierung und Design repräsentierten, gemäß dem Innovationsprozesses nach VAHS ET AL., die Suchfelder (Vahs et al. 2015, S. 230–256). Darauf basierend wurden elf qualitative Experteninterviews mit Produktmanagern des Automobilbaus geführt (Seifert 2021, S. 39–62). So entstand eine Zusammenstellung relevanter Einsatzszenarien für geometrische Änderungsflexibilität von Hardware-Komponenten im Fahrzeuglebenszyklus. Es sind einmalige und kontinuierliche Updates von Bauteilen denkbar. Zudem ist geometrische Änderungsflexibilität bei Sondereditionen und Personalisierung vorteilhaft (vgl. Abschnitt 3.3). Die in Abschnitt 1.1, der Ausgangssituation, beschriebenen Einsatzszenarien konnten so bestätigt werden. Mithilfe der Interviews wurden aus Trends und Einsatzszenarien Innovationsideen abgeleitet, die geometrische Änderungsflexibilität erfordern und eine Kundenanforderung adressieren (etwa kontinuierliche Updates von Interieur-Designelementen). Diese sind in Anhang 9 und Anhang 10 zusammengefasst. Die identifizierten Innovationsideen stellen trotz ihrer Orientierung an langfristigen Trends nur eine Momentaufnahme dar, vgl. Abbildung 6.52.

Für eine nachhaltige Anwendbarkeit sollen Trends, Einsatzszenarien und die daraus abgeleiteten Innovationsideen in regelmäßigen Reviews mit erfahrenen Produktmanagern hinsichtlich ihrer Aktualität geprüft werden. So können in der Übersicht neue Ideen ergänzt und nicht mehr relevante Ideen entfernt werden, um eine zielgerichtete Bewertung im nachfolgenden Schritt zu ermöglichen.

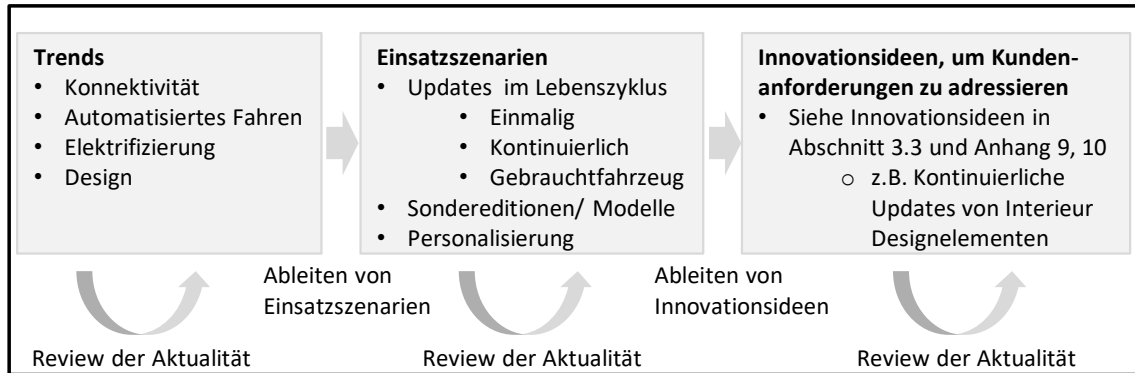


Abbildung 6.52: Identifizieren von Innovationsideen, die Änderungsflexibilität erfordern

6.7 Baustein 2: Schritt 2 – Auswahl von Innovationsideen

Die Innovationsideen werden anschließend für ein neues Fahrzeugprojekt durch die zuständigen Produktmanager priorisiert, um nur die relevantesten Ideen weiterzuverfolgen (Seifert 2021, S. 44). Abbildung 6.53 zeigt das Vorgehen.

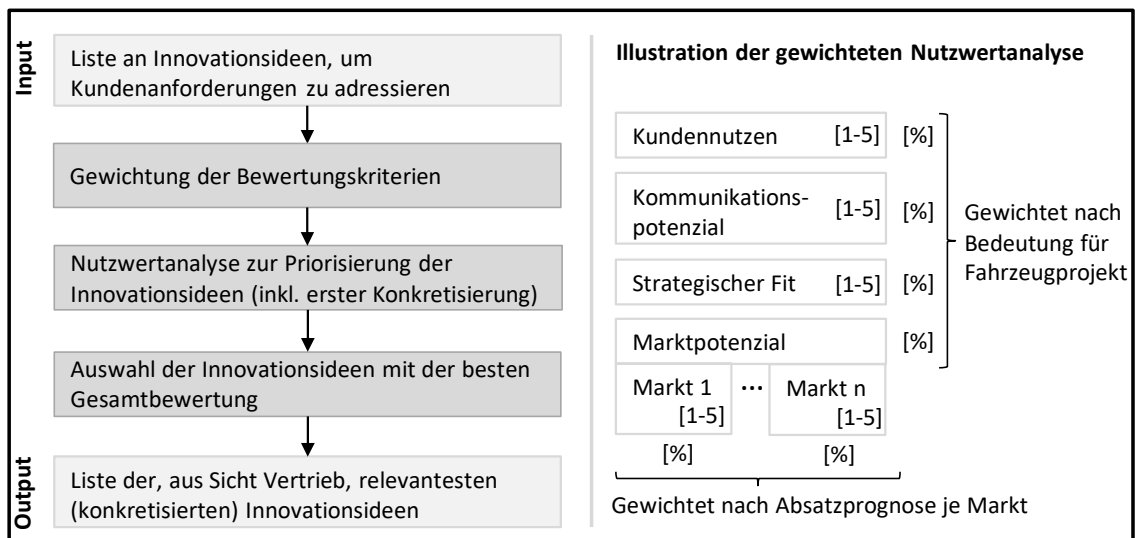


Abbildung 6.53: Priorisieren von Innovationsideen über eine Nutzwertanalyse (in Erweiterung zu Dziallas 2020)

Es wird die von ZIONTS beschriebene Nutzwertanalyse angewandt (Zionts 1979). Für die Nutzwertanalyse werden die vier Kriterien Kundenrelevanz, strategischer Fit, Kommunikationspotenzial sowie Marktrelevanz gewählt (Seifert 2021, S. 45). Die Kriterien

sind das Ergebnis einer umfassenden Analyse von DZIALLAS. Dessen Ziel war es, Bewertungskriterien für innovative Ideen im Automobilbau zu identifizieren (Dziallas 2020). Die Analyse basiert auf den Ergebnissen von 32 Experteninterviews bei sechs OEMs. Der Kundennutzen ist hoch, wenn die Innovation ein Kundenproblem löst. Der strategische Fit ist gegeben, wenn die Innovation zu den strategischen Zielen des Unternehmens passt. Das Kommunikationspotenzial stellt die Frage, inwieweit die Innovation Begeisterung auslöst. Marktrelevanz bzw. Visionspotenzial ist gegeben, wenn durch die Umsetzung mehr potenzielle Kunden erreicht werden und/oder ein höherer Preis erzielt werden kann (Dziallas 2020). Die Kriterien werden zunächst anhand ihrer Bedeutung für das Fahrzeugprojekt gewichtet, wobei die Gesamtsumme der Bewertung 100 % ergeben soll. Um das Marktpotenzial repräsentativ zu berücksichtigen, wird es zudem nach der Absatzprognose des Fahrzeugs je Markt gewichtet. (DZIALLAS 2020) DZIALLAS empfiehlt eine Bewertung der Kriterien auf einer Likert-Skala von eins bis fünf. So sollen alle Innovationsideen für ein Fahrzeugprojekt bewertet und dadurch bereits eine erste inhaltliche Konkretisierung der Innovationsideen durch die Produktmanager vorgenommen werden. Die Innovationsidee „Kontinuierliche Updates von Interieur-Designelementen“ kann etwa konkretisiert werden, indem relevante Umfänge wie „Dekorblende“ oder „Einstiegsleiste“ spezifiziert werden. Die Innovationsideen mit der besten Gesamtbewertung werden weiterverfolgt.

6.8 Baustein 2: Schritt 3 – Bauteilidentifikation und Bewertung von Umsetzungsaufwand und Nutzen

Für eine Innovationsidee soll nun entschieden werden, ob diese im Fahrzeuglebenszyklus technisch und wirtschaftlich umsetzbar ist und welche Umfänge additiv hergestellt werden sollen (vgl. Abbildung 6.54). Dabei werden zunächst in einem gemeinsamen Workshop mit Produktmanagement und verantwortlicher Konzeptentwicklung Bauteile sowie später im Lebenszyklus erforderliche (bzw. gewünschte) Änderungsinhalte definiert. Damit ist sichergestellt, dass die entsprechende Kundenanforderung durch die technische Lösung adäquat adressiert wird (Scholz et al. 2018, S. 55). Für alle Bauteile und Änderungsinhalte

werden Anforderungen erfasst und, wie in der Produktentwicklung üblich, die Machbarkeit und technische Umsetzbarkeit überprüft (Carbonell-Foulquié et al. 2004; Scholz et al. 2018, S. 55). Hierzu sollen auch die in der Studie identifizierten Herausforderungen berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 3.3 und Anhang 8). Die technische Umsetzbarkeit soll für den Gesamtumfang und je Bauteil sowohl für die werkzeuggebundene als auch die AM-Version geprüft werden. Anschließend wird der Umsetzungsaufwand bewertet, indem die einmaligen Aufwände und Investitionen sowie die proportional entstehenden Herstellkosten abgeschätzt werden. Diese erste Kostenerfassung ist laut SCHOLZ ET AL. frühzeitig erforderlich und stellt eine Voraussetzung für die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsrechnung dar (Scholz et al. 2018, S. 55). Sie erfolgt für alle Umfänge, sowohl für die werkzeuggebunden als auch die AM-Bauteilversionen. Die einmaligen Aufwände sollen dabei in fertigungsspezifische-, Entwicklungs- und sonstige Aufwände unterteilt werden, um eine Erstabstschätzung des Potenzials einer änderungsflexiblen Fertigungstechnologie zu erhalten.

VAHS ET AL. SOWIE HARTSCHEN ET AL. empfehlen, bereits frühzeitig eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchzuführen, auch wenn zu dieser Zeit oftmals ungenügende Informationen für eine exakte Kalkulation vorliegen (Hartschen et al. 2009, S. 112; Vahs et al. 2015, S. 341). Es wird die **Kapitalwertmethode** ausgewählt. Die Methode ist den dynamischen Bewertungsverfahren zuzuordnen (Hartschen et al. 2009, S. 113). Anders als bei statischen Verfahren wie der Kosten- oder Gewinnvergleichsrechnung wird die tatsächliche Situation besser abgebildet, indem sie Unterschiede im zeitlichen Anfall und in der Höhe von Zahlungen über den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt (Vahs et al. 2015, S. 344). Die Einmalaufwände (etwa für Updates) können so verursachungsgerecht abgebildet werden. Der Kapitalwert C_0 wird durch die Summe aller auf den Entscheidungszeitpunkt t_0 abgezinster Einnahmen E_t und Ausgaben A_t der Perioden t sowie der Anfangsinvestition $-I_0$ berechnet (Vahs et al. 2015, S. 344). Die Höhe des Kapitalzinsfuß r orientiert sich an den Fremdkapitalkosten sowie den Investitionsrisiken und wird im Allgemeinen von den Entscheidungsträgern eines Unternehmens festgelegt (Vahs et al. 2015, S. 345). Die Berechnung ist bei Becker nachzulesen (Becker 2010b, S. 61).

$$C_0 = -I_0 \sum_{t=0}^n \frac{E_t - A_t}{(1+r)^t} \quad (38)$$

Zunächst wird je Bauteil der Kapitalwert für den Zeitraum des Fahrzeuglebenszyklus berechnet. Dies erfolgt sowohl für die additive als auch die werkzeuggebundene Version, um eine Technologieentscheidung für jedes Bauteil zu treffen. In der Kapitalwertbetrachtung werden also alle Anfangsinvestitionen $-I_0$ vor Serienstart berücksichtigt. In den Ausgaben werden in jeder Jahresperiode t zum einen die proportional entstehenden Herstellkosten, multipliziert mit den prognostizierten Absatzzahlen berücksichtigt und darüber hinaus die Einmalaufwände, die etwa aufgrund von Änderungen entstehen. Sind Umfänge von Kunden etwa als Sonderausstattung bestellbar und die Einnahmen dem Bauteil somit eindeutig zuzuordnen, können die Einnahmen E_t zudem über die Absatzprognosen einbezogen werden (ein personalisiertes Bauteil mit einem Verkaufspreis von 100 € und einer Absatzprognose von 2.000 Einheiten in Periode t führt zu Einnahmen von 200.000 €). Sind die Einnahmen E_t nicht dem Bauteil zuordenbar (etwa bei einem kontinuierlichen Update eines Umfangs am Fahrzeug), werden diese mit 0 € angesetzt. Der dann negative Kapitalwert C_0 kann dennoch genutzt werden, um zu entscheiden, inwieweit, unter Berücksichtigung der notwendigen Änderungsflexibilität im Lebenszyklus, eine additive oder eine werkzeuggebundene Version wirtschaftlicher wäre.

Im Anschluss wird für jedes Bauteil die wirtschaftlichere Technologie ausgewählt. Angelehnt an HARTSCHEN ET AL. werden die jeweils entstehenden Kosten in die Kapitalwertbetrachtung der gesamten Innovationsidee integriert (Hartschen et al. 2009, S. 114). Sind die Einnahmen einer Innovationsidee direkt zuordenbar (etwa bei Personalisierung) kann gemäß HARTSCHEN ET AL. entschieden werden, ob die Innovationsidee wirtschaftlich ist und durchgeführt werden soll. Ist die Zuordnung der Einnahmen nicht direkt möglich (etwa bei Updates von Teilumfängen eines Fahrzeugs), entspricht der sich ergebende negative Kapitalwert dem durch die Innovationsidee notwendigen Zusatzerlös, damit eine Umsetzung im Lebenszyklus wirtschaftlich wird.

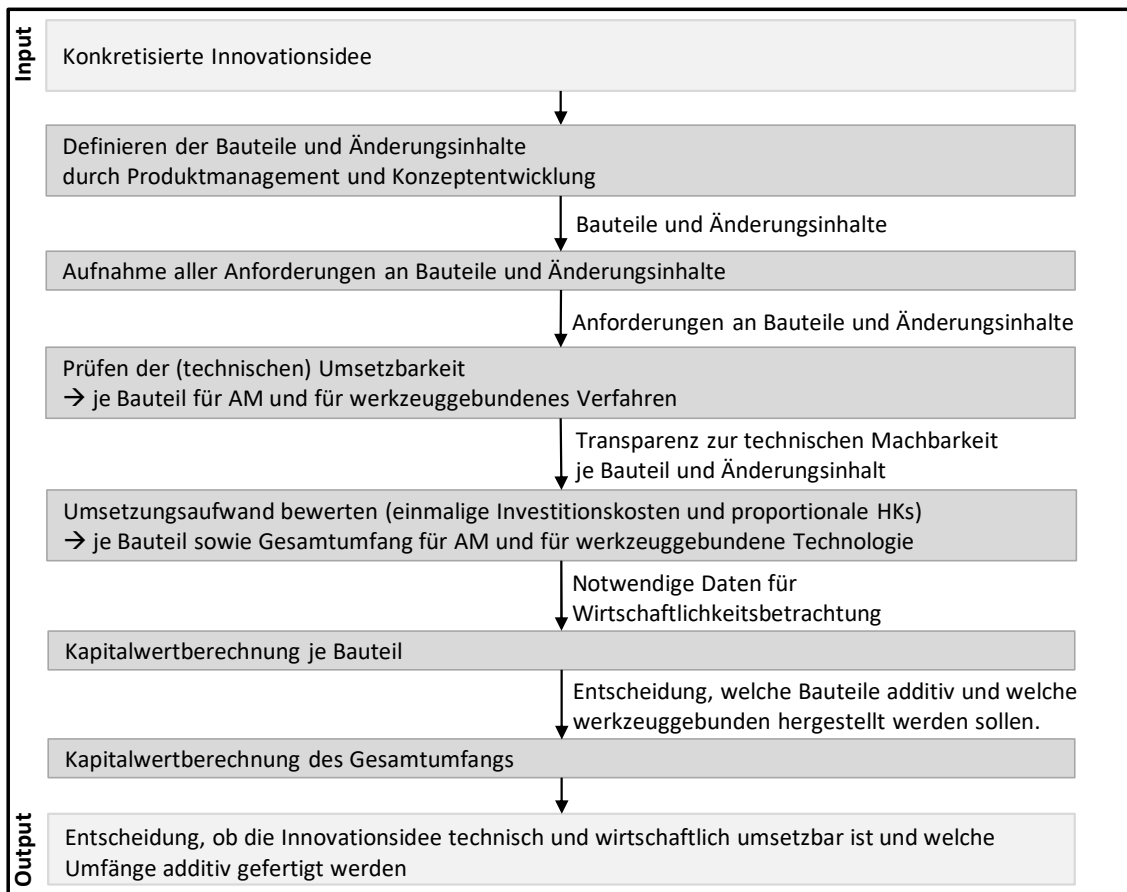


Abbildung 6.54: Umsetzung der Innovationsidee technisch und wirtschaftlich bewerten

7 Anwendung und Validierung in der unternehmerischen Praxis

Die in Abschnitt 5.1 vorgestellte und in Kapitel 6 detaillierte Methode soll im Folgenden bei einem Automobilhersteller angewandt werden. Dadurch können die in Abschnitt 4.1 gestellten Anforderungen an die Methode überprüft werden. Die Methode besteht aus zwei Bausteinen, welche beide die Bewertung von geometrischen Änderungen adressieren. Da das spezifische Ziel und der Bewertungsgegenstand der Bausteine jedoch abweichen, erfolgt deren Anwendung getrennt voneinander.

Um Forschungsfrage 1 und 2 zu beantworten, wurde **Baustein 1** entwickelt. Dieser soll bei Bauteilen eines neuen Fahrzeugprojekts vor Technologieentscheid das Änderungsverhalten der werkzeuggebundenen Bauteilversion im PEP prognostizieren und diesem die Änderungsflexibilität einer AM-Bauteilversion gegenüberstellen. Der relevante Zeitraum für Änderungen im PEP ist zwischen Start der Bestellung erster Serienwerkzeuge und 18 Monaten nach Serienstart definiert, weil davor und danach die Anzahl geometrischer Änderungen mit Einfluss auf Werkzeugkosten (siehe Definition in Abschnitt 2.2.2) zu vernachlässigen ist. Ziel des Bausteins ist es, Bauteile zu identifizieren, die Änderungsflexibilität im PEP benötigen und von der Wahl von AM als Fertigungstechnologie profitieren könnten. Die Anwendung in der unternehmerischen Praxis wird in **Abschnitt 7.1** gezeigt.

Mit **Baustein 2**, der ebenso bei einem neuen Fahrzeugprojekt vor Technologieentscheid der Bauteile angewandt werden soll, wird Forschungsfrage 3 beantwortet. Es sollen Bauteile identifiziert werden, für die AM einen Vorteil im Lebenszyklus hinsichtlich Änderungsflexibilität darstellt, weil sie sich beispielsweise für Updates, Personalisierung oder Sondereditionen eignen. Die Anwendung des Bausteins wird in **Abschnitt 7.2** vorgestellt.

Anhand der Anwendungsbeispiele soll, neben der Anwendbarkeit, die bei BLESSING ET AL. beschriebene Plausibilität und Glaubwürdigkeit der Ergebnisse beurteilt werden (Blessing et al. 2009, S. 124). Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung in **Abschnitt 7.3**.

7.1 Anwendung und Validierung von Baustein 1

Nachfolgend werden in den Abschnitten 7.1.1 - 7.1.5 alle fünf Schritte von Baustein 1 anhand praxisnaher Anwendungsbeispiele durchgeführt. Für alle Anwendungsbeispiele gilt dabei Folgendes: Es wurden nur Projekte gewählt, die bereits in Serie produziert werden, sodass reale Daten zu Änderungen verfügbar sind und die Funktionsfähigkeit der Methode beurteilt werden kann. Es wurden nur Input-Daten erhoben, die bereits vor Technologieentscheid verfügbar sind. Damit ist die Anforderung an eine Verwendung von vorhandenem Wissen vor Technologieentscheid erfüllt.

7.1.1 Schritt 1 – Vorselektion

Ziel der Vorselektion ist es, bei einem Fahrzeugprojekt aus allen Bauteilen diejenigen auszuwählen, für die AM als Serientechnologie, unter Beachtung der notwendigen Änderungsflexibilität des Bauteils im PEP, technisch und wirtschaftlich mit erhöhter Wahrscheinlichkeit geeignet ist. Dies erfolgt, indem nur Bauteile aus Baugruppen mit tendenziell vielen Änderungen betrachtet werden (Stufe A). Diese müssen zudem potenziell mit AM wirtschaftlich (Stufe B) und technisch (Stufe C) umsetzbar sein. Aufgrund der derzeit noch hohen Herstellkosten additiv gefertigter Serienbauteile (vgl. Abschnitt 2.1.4) ist bei Fahrzeugen des Luxussegments (Segment F) von einer höheren Chance auszugehen, AM-Serienbauteile zu identifizieren. Daher werden für die Anwendung zwei Anwendungsprojekte aus dem Segment F (vgl. Commission of European Communities 1999) ausgewählt.

Fokus auf Bauteile in Baugruppen mit häufigen Änderungen (Stufe A)

Zunächst wurden 13 historische Referenzprojekte ausgewählt, die hinsichtlich Segmente und Stückzahlen das Spektrum des Herstellers repräsentieren und die bereits mehr als 18 Monate in Serie produziert werden. Somit liegen alle Änderungsdaten vor. Entsprechend dem in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen Vorgehen war ein Zugriff auf Änderungsdaten und Stücklisten notwendig. Da das Vorgehen zur Bewertung des Änderungsverhaltens im PEP nicht auf Bauteile im Antrieb ausgelegt ist, blieben diese Baugruppen unberücksichtigt. Für die übrigen

Baugruppen wurde jeweils die mittlere relative Änderungshäufigkeit $\emptyset BG_ÄH_i$ berechnet, vgl. Formel (24). Diese entspricht der mittleren Anzahl von Änderungen (mit Auswirkung auf die Werkzeugkosten) je Bauteil und Baugruppe, vgl. Abschnitt 6.1.1. Zunächst soll die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, Bauteile auszuwählen, die Änderungen im PEP haben werden. Daher wird der Erfolg daran gemessen, wie stark die Fokussierung in Stufe A dazu führt, dass der Anteil an Bauteilen gesteigert wird, welche später im PEP geändert werden (vgl. Abbildung 7.1). Die Fokussierung ermöglicht so eine zielgerichtete Bewertung.

Bei **Anwendungsprojekt 1** führte eine Fokussierung auf die 20 Baugruppen mit den höchsten relativen Änderungshäufigkeiten $\emptyset BG_ÄH_i$, ermittelt über 13 historische Referenzprojekte, zu einer Steigerung des Anteils der später im PEP tatsächlich geänderten Bauteile um 167 %. Bei **Anwendungsprojekt 2** konnte der Anteil durch die Fokussierung um 114 % gesteigert werden. Der Anstieg lässt die Aussage zu, dass der Schritt wie beabsichtigt funktioniert.

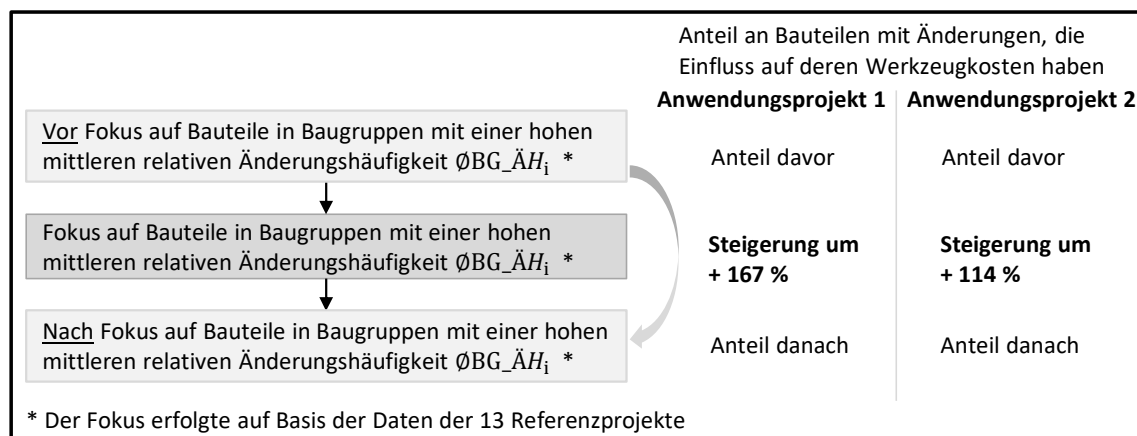


Abbildung 7.1: Validierung von Stufe A der Vorselektion

Fokus auf mit AM wirtschaftlich und technisch herstellbaren Bauteilen (Stufe B, C)

Anschließend sollen, wie in Abschnitt 6.1.2 detailliert beschrieben, die Voraussetzungen geschaffen werden, um im weiteren Verlauf Bauteile zu bewerten, die mit erhöhter Wahrscheinlichkeit (unter Beachtung technischer und wirtschaftlicher Randbedingungen) additiv hergestellt werden können. Auch dies begünstigt eine nachfolgend zielgerichtete und aufwandsarme Bewertung.

Für **Anwendungsprojekt 1** war kein in Stückzahl, Fahrzeugart und Segment ähnliches Referenzprojekt verfügbar. Für **Anwendungsprojekt 2** wurde ein Referenzprojekt verwendet, welches in allen drei Dimensionen nahezu identisch ist. Zunächst war, gemäß dem in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Vorgehen, jeweils ein Zugriff auf Stücklisten sowie Konstruktions- und Einkaufsdaten der Referenzprojekte erforderlich. So konnten für die Referenzprojekte die Volumenkosten der werkzeuggebundenen Versionen der k Bauteile VK_{WG_k} berechnet werden. Je nach Material werden diese mit den entsprechenden Volumenkosten VK_{AM_k} ($\text{€}/\text{cm}^3$) der AM-Version verglichen. Bei Volumenkosten vergleichbarer Höhe wurden die entsprechenden Bauteile der Anwendungsprojekte als Fokusbauteile benannt. Die Anwendungsprojekte sind bereits in Serie. Dadurch sind die Herstellkosten verfügbar, sodass für die Validierung ein Vergleich zwischen den Volumenkosten von Referenz- und Anwendungsprojekt möglich ist. Bei $n = 49$ Fokusbauteilen betrug der MAPE, also die durchschnittliche prozentuale Abweichung der Volumenkosten zwischen Referenzprojekt und den tatsächlichen Volumenkosten von **Anwendungsprojekt 1**, 122,3 %, vgl. Abbildung 7.2. Zwischen Referenz- und **Anwendungsprojekt 2** betrug der MAPE bei $n = 39$ Fokusbauteilen 88,7 %. Die Volumenkosten der Bauteile konnten also auf Basis des Referenzprojekts besser vorhergesagt werden, wenn es dem Anwendungsprojekt ähnlicher war.

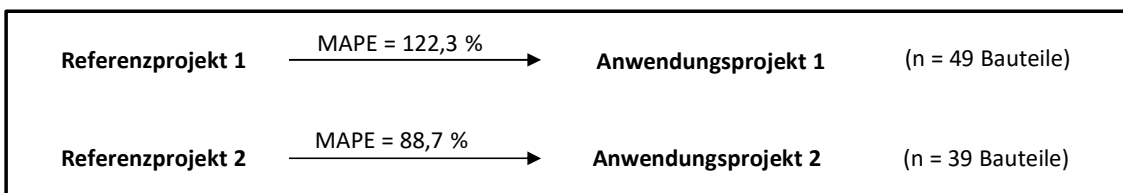


Abbildung 7.2: Validierung von Stufe B und C der Vorselektion – Durchschnittliche prozentuale Abweichung der bauteilspezifischen Volumenkosten zwischen Referenz- und Anwendungsprojekten

Anspruch der Vorselektion ist es nicht, die Volumenkosten respektive Herstellkosten eines Bauteils exakt vorherzusagen. Vielmehr sollen in einer ersten Abschätzung Bauteile identifiziert werden, bei denen die Volumenkosten und damit die Herstellkosten zwischen werkzeuggebundener und additiver Technologie ähnlich hoch sind, sodass ein MAPE von 122,3 % bzw. 88,7 % zu diesem frühen Zeitpunkt im PEP akzeptabel ist.

7.1.2 Schritt 2 – Prognose des Änderungsverhaltens der werkzeuggebundenen Bauteilversion

Die Anwendung und Validierung von Baustein 1, Schritt 2 erfolgt auf zwei Arten. Zunächst werden die notwendigen Bauteileigenschaften aus Anwendungsprojekt 1 und 2 erhoben und das Änderungsverhalten der Bauteile prognostiziert. Um eine durchgängige Anwendung aller Schritte der Methode abzubilden, entstammen die Bauteile der Vorselektion (vgl. Abschnitt 7.1.1). Durch die Vorselektion wurde die Auswahl von Bauteilen auf jene reduziert, die eine erhöhte Chance auf eine wirtschaftliche Umsetzung mit AM haben. Fallen die Volumenkosten von AM-Bauteilen in den nächsten Jahren, wären weitere Bauteile wirtschaftlich und würden bei einer Vorselektion identifiziert. Die Prognosen am Beispiel von Bauteilen der Anwendungsprojekte sind damit nicht repräsentativ für das gesamte Bauteilspektrum – sie sollen vielmehr zeigen, wie die Prognosemodelle in der Unternehmenspraxis eingesetzt werden können. Die Güte der Prognosen hingegen wird über **Kreuzvalidierungen** auf Basis der zur Modellbildung verwendeten Bauteile überprüft. Da bei der Modellbildung eine Zufallsstichprobe von Bauteilen eines Fahrzeugs verwendet wurde, sind die Ergebnisse für alle Bauteile im Automobilbau repräsentativ.

Prognose einer geometrischen Änderung (GÄ)

Die Güte der Prognose einer geometrischen Änderung wird durch 10-fache Kreuzvalidierung beurteilt, vgl. Abbildung 7.3. Mit einem Bias von 0,04 % ist das Modell gut kalibriert – die reale Wahrscheinlichkeit einer Änderung wird durch das Modell etwas überschätzt. Ein mittlerer AUC-Wert von 0,763 deutet zudem auf eine akzeptable Diskriminierung hin – das Modell teilt die Testdaten tendenziell in die richtigen Kategorien ein (Bauch 2020, S. 82).

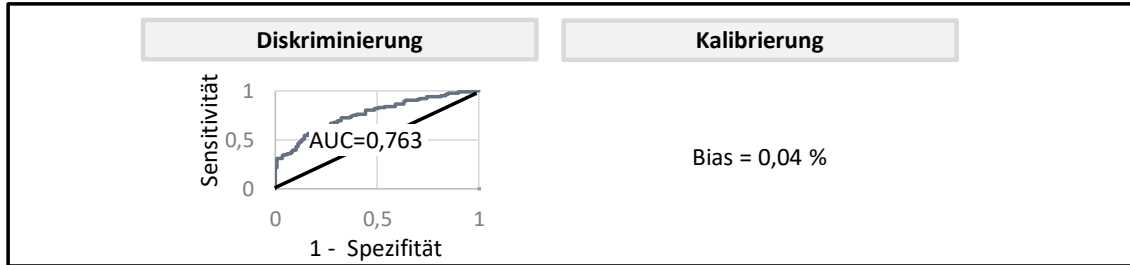


Abbildung 7.3: Prognosegüte der Änderungswahrscheinlichkeit – Ergebnis der Kreuzvalidierung (Darstellung in Erweiterung zu Bauch 2020, S. 82)

Nach der Vorselektion (vgl. Abschnitt 7.1.1) wurden die relevanten Eigenschaften von 23 Bauteilen aus Anwendungsprojekt 1 und von 30 Bauteilen aus Anwendungsprojekt 2 von den bauteilverantwortlichen Entwicklungsingenieuren erhoben. Das Prognoseergebnis ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Bei einem Trennwert von 0,5 wurde bei Anwendungsprojekt 1 eine Trefferquote von 74 % erzielt, bei einer Spezifität von 100 % und einer Sensitivität von 40 %. Während die Trefferquote also nahe an jener der Modellbildung liegt (75 %, vgl. Abbildung 6.9), deutet die niedrigere Sensitivität darauf hin, dass die reale Wahrscheinlichkeit einer Änderung durch das Modell tendenziell unterschätzt wird. Es wird für kein Bauteil fälschlicherweise eine geometrische Änderung (GÄ) prognostiziert. Dafür wird insgesamt nur bei vier von zehn Bauteilen richtigerweise eine geometrische Änderung prognostiziert. Lediglich diese Bauteile werden bei einer Anwendung in der Unternehmenspraxis weiterbetrachtet. Aufgrund der niedrigen Sensitivität bei Anwendungsprojekt 1 wurde bei Anwendungsprojekt 2 der Trennwert auf 0,45 herabgesetzt. Das Ergebnis ist eine Trefferquote von 70 %, bei einer Spezifität von 94 % und einer Sensitivität von 33 %. Es wird bei einem Bauteil fälschlicherweise eine geometrische Änderung prognostiziert und bei vier weiteren Bauteilen richtigerweise. Somit werden neun Bauteile aus zwei Anwendungsprojekten weiterbetrachtet.

Klassifizierungstabelle											
Anwendungsprojekt 1						Anwendungsprojekt 2					
		Prognose GÄ ^a		Prozentsatz der Richtigen				Prognose GÄ ^a		Prozentsatz der Richtigen	
		0	1					0	1		
Realität	0	13	0	100% Spezifität		Realität	0	17	1	94% Spezifität	
GÄ	1	6	4	40% Sensitivität		GÄ	1	8	4	33% Sensitivität	
		(13+4)/23		74% Trefferquote				(17+4)/30		70% Trefferquote	
		^a . bei Trennwert 0,5						^a . bei Trennwert 0,45			

Veränderter Trennwert →

Abbildung 7.4: Prognose einer geometrischen Bauteiländerung bei den Anwendungsprojekten

Prognose der Änderungsintensität (ÄI)

Anschließend erfolgt für die Bauteile mit hoher Änderungswahrscheinlichkeit eine Prognose, ob diese mehr als eine Änderung im PEP haben werden und daher definitionsgemäß (vgl. Abschnitt 6.2.4) änderungsintensiv sind. Auf Basis von 105 bei der Modellbildung in Abschnitt 6.2 verwendeten Bauteilen mit geometrischen Änderungen wird eine 10-fache Kreuzvalidierung durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.5 gezeigt. Ein AUC-Wert von 0,771 deutet auf eine akzeptable Klassifizierung der Testdaten hin. Das Modell ist mit einem Bias von -0,39 % gut kalibriert – eine leichte Unterschätzung der Änderungsintensität ist vorhanden.

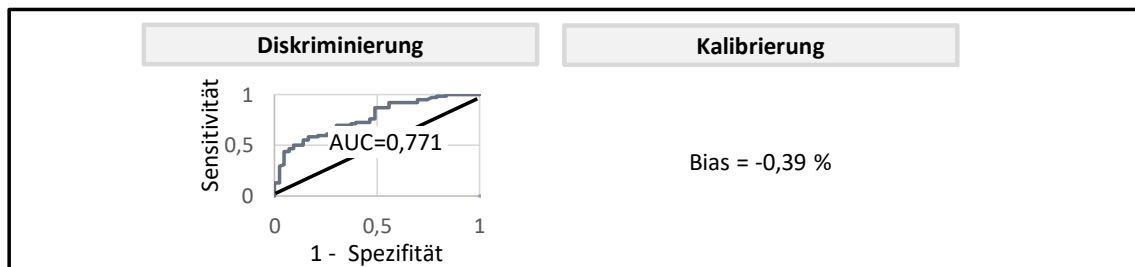


Abbildung 7.5: Prognosegüte der Änderungsintensität – Ergebnis der Kreuzvalidierung

Von den neun weiterbetrachteten Bauteilen der Anwendungsprojekte, bei denen eine für die Anwender ausreichende Änderungswahrscheinlichkeit prognostiziert wurde, wird bei fünf Bauteilen richtig prognostiziert, dass sie mehr als eine Änderung im PEP haben werden (siehe Abbildung 7.6). In Einzelfällen können auch weiter vom Trennwert entfernt liegende

Prognoseergebnisse (etwa bei Bauteilnummer fünf und sechs) falsch sein. Die Prognose der Änderungsintensität funktioniert also mit Einschränkungen.

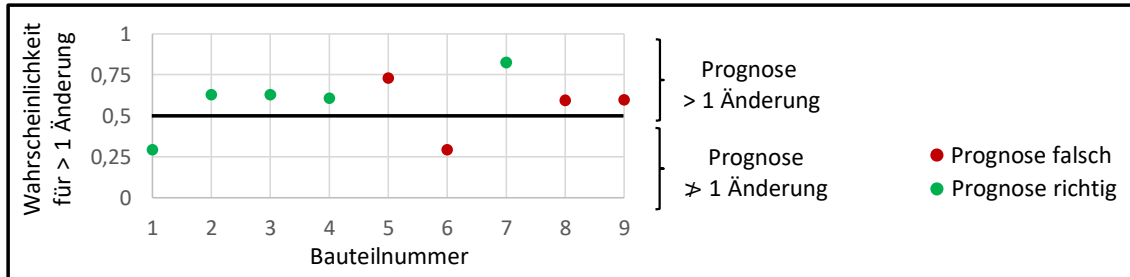


Abbildung 7.6: Prognose, ob die Bauteile der Anwendungsprojekte mehr als eine Änderung haben

Deskriptive Auswertung der Änderungsanzahl

In der in Abschnitt 6.2.5 durchgeführten deskriptiven Analyse von 63 Bauteilen mit mehr als einer Geometrieänderung hatten 52,4 % zwei, 20,6 % drei und 27,0 % mehr als drei Änderungen. Bei den Anwendungsprojekten hatten fünf der neun Bauteile mehr als eine Änderung. Drei davon hatten zwei Änderungen, eine drei und eine vier – die Verteilung ist also vergleichbar, sodass mit einer deskriptiven Auswertung der Änderungsanzahl historischer Projekte ein Rückschluss auf deren Verteilung bei zukünftigen Projekten erfolgen kann.

Prognose der fertigungsspezifischen Änderungskosten (fÄK)

Die Prognosegüte der Werkzeugänderungskosten wird über eine 10-fache Kreuzvalidierung der an der Modellbildung beteiligten Bauteile ($n = 105$) beurteilt. Es wird die durchschnittliche prozentuale Abweichung zwischen den prognostizierten und den tatsächlichen Werten aller Testdaten, also der MAPE, über Formel (8) berechnet. Zur Interpretation werden die logarithmierten Werkzeugänderungskosten durch Potenzieren mit der Exponentialfunktion in interpretierbare Werkzeugänderungskosten (WZÄK) umgewandelt. Mit einer durchschnittlichen Abweichung von 112 % übersteigt die Prognosegüte alternative Methoden wie das Verwenden des Mittelwerts aller Werkzeugänderungskosten (Mittelwertschätzer) oder die Verwendung des Medians (Medianschätzer), vgl. Tabelle 7.1. Zum Prognosezeitpunkt – vor Technologieentscheid – sind Einflüsse auf die Werkzeugänderungskosten wie Änderungsumfang, Dringlichkeit, Anzahl oder Beziehung zum Werkzeuglieferant unbekannt

(vgl. Abschnitt 2.2.5). Die Prognoseunschärfe ist daher nachvollziehbar. Eine durchschnittliche Abweichung von 112 % ermöglicht dennoch eine Indikation der späteren Änderungskosten.

Tabelle 7.1: Prognosegüte Werkzeugänderungskosten – Ergebnis Kreuzvalidierung

Werkzeugänderungskosten (WZÄK): MAPE bei 10-facher Kreuzvalidierung			
Maß	Regression	Medianschätzer	Mittelwertschätzer
MAPE	112 %	261 %	648 %

Die Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung werden über eine Regression mithilfe der Werkzeugänderungskosten prognostiziert, vgl. Abschnitt 6.2.7. Der MAPE, berechnet über eine 10-fache Kreuzvalidierung, beträgt 65 % und ist damit genauer als eine Schätzung über den Median oder den Mittelwert aller Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung, vgl. Tabelle 7.2.

Tabelle 7.2: Prognosegüte Arbeitsvorbereitungsänderungskosten – Ergebnis Kreuzvalidierung

Arbeitsvorbereitungsänderungskosten (AVÄK): MAPE bei 10-facher Kreuzvalidierung			
Maß	Regression	Medianschätzer	Mittelwertschätzer
MAPE	65 %	733 %	1833 %

Die Werkzeugänderungskosten und die Arbeitsvorbereitungsänderungskosten bilden die fertigungsspezifischen Änderungskosten. Um die Anwendung der Prognose beider Kostenarten an einem Beispiel zu zeigen, wird exemplarisch Bauteil Nummer 3 ausgewählt, vgl. Abbildung 7.6. Aus Werkzeugkosten von 120.000 € und einem hohen Montagerisiko (Likert-Skala = 4 von 5) resultieren prognostizierte Werkzeugänderungskosten (WZÄK) von 31.192 €, ein 10%-Quantil von 8.673 €, und ein 90%-Quantil von 112.175 €. Die prognostizierten Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung (AVÄK) betragen 5.259 €. In Summe ergeben sich fertigungsspezifische Änderungskosten (fÄK) von 36.451 €. Das 10%-Quantil liegt bei 14.363 €, das 90%-Quantil bei 125.328 €. Eine grafische Darstellung der Quantile über Histogramme ist in Abbildung 7.7 zu sehen. Das Histogramm der fertigungsspezifischen Änderungskosten (fÄK) enthält aufgrund der Art und Weise der Berechnung 100.000.000 Werte (vgl. Abbildung 6.20), während das Histogramm der

Werkzeugänderungskosten 10.000 Werte enthält. Die Angabe von Quantilen, zusätzlich zum Erwartungswert, bietet dem Anwender eine Transparenz zur Prognoseunsicherheit.

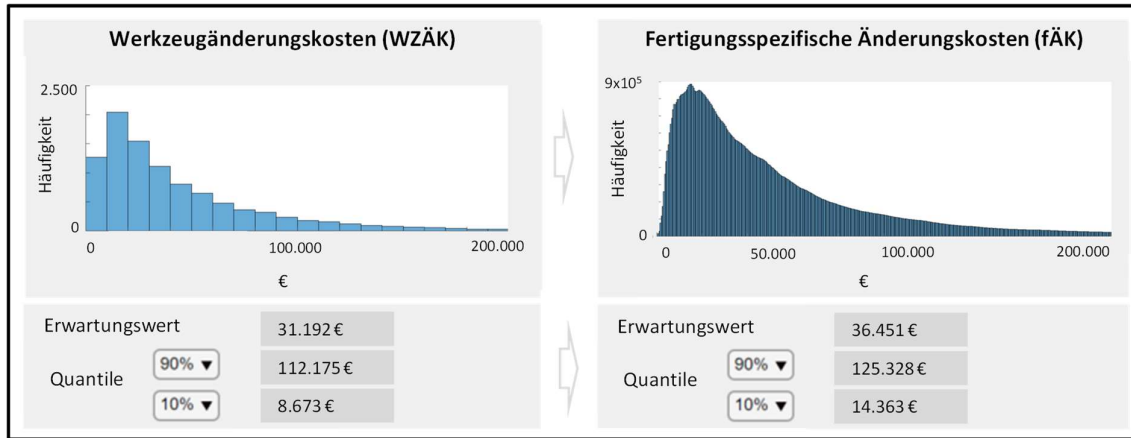


Abbildung 7.7: Änderungskosten – Darstellung des Prognoseergebnisses an einem Beispiel

Prognose des spätesten Änderungszeitpunkts (ÄZP)

Bei der Prognose des spätesten Änderungszeitpunkts eines Bauteils beträgt die durchschnittliche Abweichung des prognostizierten vom tatsächlichen Wert 9,7 Monate (RMSE), ermittelt über 10-fache Kreuzvalidierung der an der Modellbildung beteiligten Bauteile. Damit ist die Prognose anhand der Regression besser als mit alternativen Methoden wie dem Mittelwert- oder Medianschätzer, vgl. Tabelle 7.3. Eine Indikation, ob ein Bauteil zu späten Änderungen neigt, ist möglich.

Tabelle 7.3: Prognosegüte Arbeitsvorbereitungsänderungskosten – Ergebnis Kreuzvalidierung

Spätester Änderungszeitpunkt (ÄZP): RMSE bei 10-facher Kreuzvalidierung			
Maß	Regression	Medianschätzer	Mittelwertschätzer
RMSE	9,7 Monate	10,6 Monate	10,6 Monate

Bauteil Nummer 3 hat eine Prognosegüte in der virtuellen Absicherung von 30 % – ein Großteil der Funktionen und Prozesse kann also nur mit Hardware erprobt werden – zudem besteht, wie bereits erwähnt, ein hohes Montagerisiko. Daraus wird die späteste Änderung bei drei Monaten nach Serienstart erwartet. Das 10%-Quantil liegt bei 10 Monaten vor, das 90%-Quantil bei 16 Monaten nach Serienstart. Das Bauteil neigt also tendenziell zu späten Änderungen – auch nach Serienstart.

Prognose der Änderungsdauer (ÄD) und des fertigungsspezifischen Anteils (fÄÄD)

Die Prognosegüte der Dauer einer Änderung nach Serienstart wird aufgrund der Anzahl von nur $n = 30$ zur Verfügung stehender Datenpunkte (vgl. Modellbildung in Abschnitt 6.2.10), über eine 5-fache Kreuzvalidierung überprüft. Die durchschnittliche prozentuale Abweichung des tatsächlichen vom prognostizierten Wert (MAPE) beträgt, über alle Testdaten hinweg, 69 %. Die Regression ist genauer als eine Median-, oder Mittelwertprognose, vgl. Tabelle 7.4.

Tabelle 7.4: Prognosegüte Änderungsdauer – Ergebnis Kreuzvalidierung

Änderungsdauer (ÄD): MAPE bei 5-facher Kreuzvalidierung			
Maß	Regression	Medianschätzer	Mittelwertschätzer
MAPE	69 %	112 %	119 %

Da für nachfolgende Schritte die fertigungsspezifische Änderungsdauer (fÄD) relevant ist, wird diese als Produkt der prognostizierten Änderungsdauer (ÄD) und des fertigungsspezifischen Anteils an der Änderungsdauer (fÄÄD) berechnet (Abschnitt 6.2.9). Der fertigungsspezifische Anteil soll, wie in Abschnitt 6.2.9 beschrieben, über den Mittelwert prognostiziert werden. Bei einem Erwartungswert von 60 % beträgt die durchschnittliche Abweichung des realen vom prognostizierten fertigungsspezifischen Anteil 22,4 Prozentpunkte (RMSE). Dies entspricht einem MAPE von 50,9 %. Die Genauigkeit von Mittelwertschätzer und Medianschätzer unterscheidet sich nur geringfügig.

Tabelle 7.5: Prognosegüte fertigungsspezifischer Anteil – Ergebnis Kreuzvalidierung

Fertigungsspezifischer Anteil an der Änderungsdauer (fÄÄD): RMSE bei 5-facher Kreuzvalidierung		
Maß	Medianschätzer	Mittelwertschätzer
RMSE	23,2 %	22,4 %

Das Fahrzeug, in das Bauteil 3 verbaut wird, gehört nach der Definition der Arbeit (Stückzahl > 50.000, vgl. Abschnitt 6.2.1) zur Kategorie Großserie. Die Prognosegüte in der virtuellen Absicherung (PG) beträgt 30 %. Mit den Variablenwerten wird eine Änderungsdauer (ÄD) von 118 Tagen prognostiziert – die daraus resultierende erwartete fertigungsspezifische Änderungsdauer (fÄD) beträgt 71 Tage. Für ÄD und fÄD sind die 10%- und 90%-Quantile

angegeben. Mit einer Sicherheit von 80 % liegt demnach die fertigungsspezifische Änderungsdauer zwischen 14 und 138 Tagen. Abbildung 7.8 zeigt die Ergebnisse. Die Quantile und Histogramme machen die Unsicherheit der Prognose für den Anwender greifbar und sollen dadurch die Akzeptanz der Bewertung erhöhen.

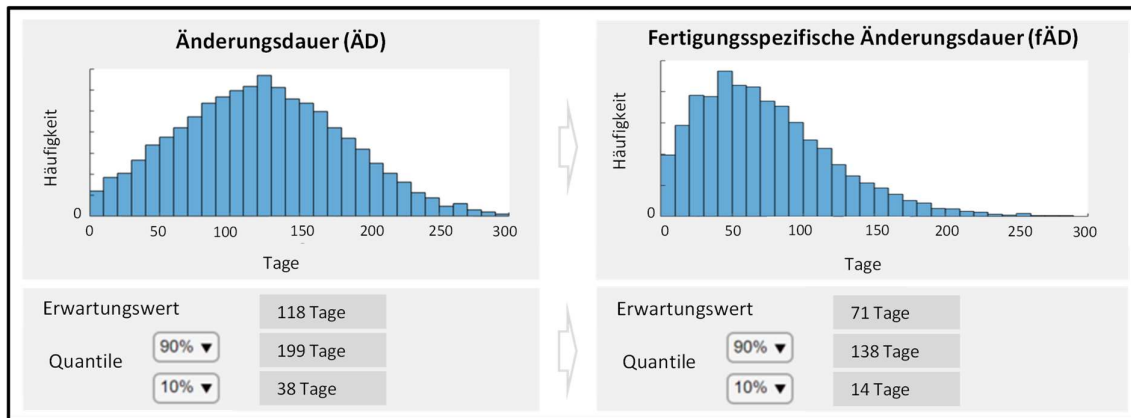


Abbildung 7.8: Änderungsdauer – Darstellung des Prognoseergebnisses an einem Beispiel

7.1.3 Schritt 3 – Prognose der Änderungsflexibilität der AM-Bauteilversion

Die Prognose der AM-Änderungsflexibilität wird am Beispiel von Bauteil 3 beschrieben. Das Bauteil ist aus Kunststoff, hat eine Masse von 42 g und es wird eine Jahresstückzahl von 18.000 angenommen. Das Bauteil hat keine Craschanforderungen, ist aber ein Sichtbauteil mit Oberflächenanforderungen. Es wird der AM-Prozess Multi Jet Fusion (MJF) als Alternative zum werkzeuggebundenen Verfahren ausgewählt. Neben dem Hauptprozess sind die Schritte Entpulvern, Vereinzeln, Reinigungsstrahlen, Lackieren sowie die Qualitätssicherung von Oberfläche, Mechanik und Maßhaltigkeit erforderlich. Die Ingenieure identifizieren 19 Änderungsmerkmale, die für MJF-Bauteile mit dieser Prozesskette relevant sind, darunter die Abmessungen, Radien, Wandstärken oder Anbindungsgeometrien. Zudem werden 37 im PEP notwendige Arbeitsvorbereitungsschritte definiert. Es werden alle Abhängigkeiten zwischen Änderungsmerkmalen untereinander sowie zwischen Änderungsmerkmalen und Arbeitsvorbereitungsschritten erfasst. Die Arbeitsvorbereitungsschritte werden zeitlich im

PEP verortet, Kosten und Dauer der Schritte werden aufgenommen sowie die direkten Vorgänger eines jeden Arbeitsvorbereitungsschritts bestimmt (vgl. Abbildung 6.23).

Mangels historischer Änderungsdaten wurde die Validität der Prognose der Änderungsflexibilität einer AM-Bauteilversion im Dialog mit Fachexperten diskutiert. Fachexperten schätzen die Validität dabei ihrem Erfahrungshintergrund entsprechend ein und bestätigen oder widerlegen so die Gültigkeit (Rabe et al. 2008, S. 109).

Das Prognoseergebnis ist am Beispiel des Bauteils in Abbildung 7.9 dargestellt. Als kleine Änderung wurde eine Radiusänderung definiert, als große eine Änderung der Anbindungsgeometrie (etwa eines Clips) verbunden mit einer Abmessungsänderung des Bauteils. Zudem wurden 30 Zeitpunkte für mögliche Änderungen definiert, in denen jeweils Änderungskosten und Dauer prognostiziert werden. Damit soll die Spannweite der fertigungsspezifischen Änderungskosten und Dauer und so die Änderungsflexibilität der AM-Version des Bauteils quantifiziert werden.

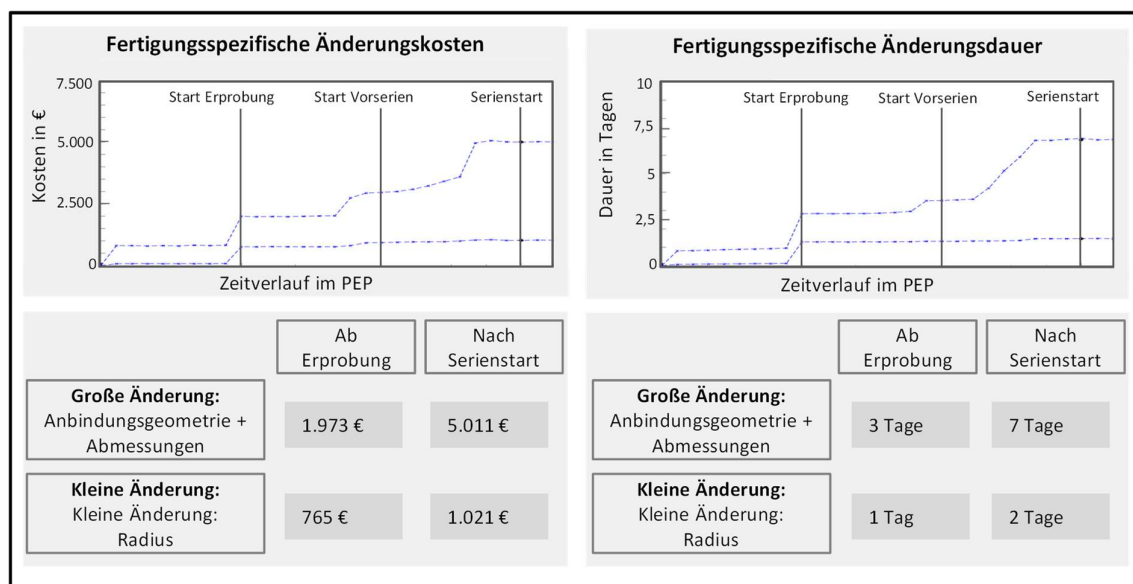


Abbildung 7.9: AM-Änderungsflexibilität – Darstellung des Prognoseergebnisses an einem Beispiel

Die prognostizierten fertigungsspezifischen Änderungskosten der kleinen Änderung liegen zum Zeitpunkt des Erprobungsstarts der Fahrzeuge bei 765 €, zum Serienstart bei 1.021 €. Bei einer großen Änderung liegen die Änderungskosten zum Start der Erprobung bei 1.973 € und

nach Serienstart bei 5.011 €. Laut der Experten sind Höhe und Verlauf realistisch. So werden viele Arbeitsvorbereitungsschritte erst nach Start der Erprobung durchgeführt, weshalb die Kosten zuvor noch gering sind. Anschließend steigen sie bis Abschluss der Vorserienbauphasen an, da das Bauteil bis dahin kontinuierlich an Reife gewinnt und dessen Herstellprozesse weiter verbessert werden. Muss etwa kurz vor Serienstart eine Änderung durchgeführt werden, sind zuvor durchgeführte Arbeitsvorbereitungsschritte potenziell betroffen und müssen zu Teilen wiederholt werden. Jeder betroffene Schritt führt zu Änderungskosten – und auch die Umsetzungsdauer nimmt zu. Bei einer kleinen Änderung zum Erprobungsstart dauert sie etwas mehr als einen Tag, zum Serienstart knapp zwei Arbeitstage. Bei einer größeren Anpassung, bei der die Anbindungsgeometrie sowie die Abmessungen verändert werden, dauert sie im Mittel drei (ab Start der Erprobung) respektive sieben Arbeitstage (bei Serienstart). Der Unterschied entsteht, da nicht nur die angepassten Baujobs erneut gedruckt und die Bauteilqualität überprüft werden müssen, sondern parallel auch Vorrichtungen, etwa für die Entpulverung oder Lehren für die Qualitätssicherung, angepasst werden müssen. Die Anwendbarkeit der Methode wurde bei Kratzer et al. mit Fokus auf die Prognose der Änderungskosten, am Beispiel eines Aluminium SLM-Bauteils sowie eines tiefgezogenen Karosseriebauteils gezeigt (Kratzer et al. 2021b).

7.1.4 Schritt 4 – Vergleich negativer Zusatzeffekte

In diesem Abschnitt wird anhand von Anwendungsbeispielen dargelegt, wie die negativen Zusatzeffekte erwarteter Änderungen einer werkzeuggebundenen und einer AM-Bauteilversion miteinander verglichen werden können. Dies erfolgt für jene negativen Zusatzeffekte von Änderungen vor und nach Serienstart, für die in Abschnitt 6.4 eine Möglichkeit zur Prognose und Bewertung entwickelt wurde.

Negative Zusatzeffekte bei Änderungen vor Serienstart

In Abschnitt 3.2 wurde in qualitativen Experteninterviews thematisiert, dass eine lange Änderungsdauer im PEP dazu führt, dass Änderungen nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt

werden. In Abschnitt 6.4.1 wurde daraufhin eine Methode entworfen, mit der zunächst Transparenz erzeugt werden soll, wie hoch der Anteil an Änderungen ist, die nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt werden. Schließlich soll von diesen Änderungen, abhängig von der Änderungsdauer, der Anteil bestimmt werden, der eine Bauphase früher umsetzbar gewesen wäre. Ziel ist es, Bewusstsein über die Bedeutung der Änderungsdauer zu schaffen. Die Methode wurde mit 36 Änderungen aus Referenzprojekten erprobt und mit 39 beziehungsweise 13 Änderungen aus Anwendungsprojekten verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.10 dargestellt. Der Anteil an Änderungen, die nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt wurden, ist in Referenz- und Anwendungsprojekten vergleichbar (50 % versus 44 % bzw. 69 %). Der Anteil der Änderungen, die bei definierter Dauer eine Bauphase früher umsetzbar wären, liegt bei den Anwendungsprojekten innerhalb des 95%-Konfidenzintervalls der Referenzprojekte. Bei einer Dauer von 12 bis 32 Tagen wären etwa ein Drittel aller Änderungen eine Bauphase früher umsetzbar gewesen. Eine kürzere Änderungsdauer trägt also dazu bei, dass Änderungen zu früheren Bauphasen umgesetzt werden.

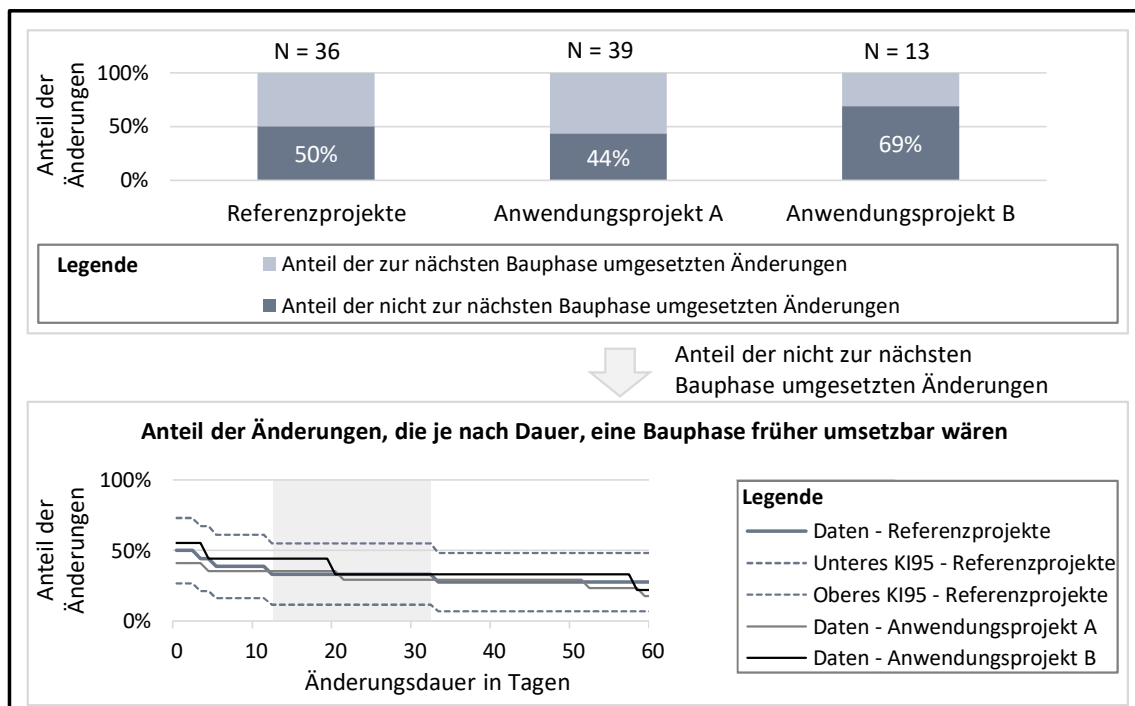


Abbildung 7.10: Ergebnis Validierung – Negativer Zusatzeffekt einer Änderung vor Serienstart

Negative Zusatzeffekte bei Änderungen nach Serienstart

Das Reduktionspotenzials unterschiedlicher Zusatzeffekte bei Änderungen nach Serienstart wird erneut anhand von Bauteil 3 veranschaulicht. Die prognostizierten Zusatzkosten werden aus Gründen des Informationsschutzes normiert.

Gewährleistungskosten-Reduktionspotenzial

Zielgröße der Validierung ist das **mittlere GwK-Risiko eines produzierten Bauteils** $E(R_{GwK})$. Der Reklamationszeitraum wird auf 40 Monate ab Serienstart festgelegt. Die absolute prozentuale Abweichung (APE) zwischen Anwendungs- und Referenzprojekt beträgt 350 %. Für die Abweichung sind mehrere Ursachen denkbar. Zum einen ist $E(R_{GwK})$ von der Anzahl geometrischer Bauteiländerungen nach Serienstart abhängig – Fehler bei der manuellen Kategorisierung geometrischer Änderungen beeinflussen das Ergebnis. Da Änderungs- und Gewährleistungsdaten in unterschiedlichen Systemen gespeichert sind, ist die durchgängige Verknüpfung fehleranfällig. Dadurch sind änderungsbedingte Gewährleistungsfälle den entsprechenden Änderungen nicht immer zuordenbar.

Für Bauteil 3 errechnet sich bei einer fertigungsspezifischen Änderungsdauer von 71 Tagen, einer Jahresstückzahl von 18.000 Bauteilen und einem mittleren **GwK-Risiko eines produzierten Bauteils** $E(R_{GwK})$ von 0,04 €, basierend auf den Daten des Referenzprojekts, ein **maximales GwK-Reduktionspotenzial** von 140 €. Geht man von einer fertigungsspezifischen Änderungsdauer der AM-Bauteilversion von 10 Tagen (bei einer prognostizierten Änderungsdauer von 7 Arbeitstagen) aus, beträgt das **GwK-Reduktionspotenzial** 120 €, vgl. Abbildung 7.11.

Produktkosten-Reduktionspotenzial

Zielgröße der Validierung ist das **mittlere Produktkosten-Reduktionspotenzial eines produzierten Bauteils** $E(R_{PK})$. Die absolute prozentuale Abweichung (APE) zwischen den Referenz- und Anwendungsprojekten beträgt 49,3 %. Mit einem errechneten **Produktkosten-Reduktionspotenzial pro produziertes Bauteil** von 0,15 € beträgt das **maximale Produktkosten-Reduktionspotenzial** bei einer Änderungsdauer von 71 Tagen und einer Jahresstückzahl von 18.000 Bauteilen insgesamt 525 €. Verglichen mit der

fertigungsspezifischen Änderungsdauer der additiven Version des Bauteils von 10 Tagen bleibt ein Produktkosten-Reduktionspotenzial von 451 €, vgl. Abbildung 7.11.

Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzial

Für den Fall einer notwendigen Nacharbeit und einer Nacharbeitsminute pro Bauteil, bis die Änderung umgesetzt ist, ergibt sich für Bauteil 3 bei einem Stundenlohn von 60 € ein **maximales Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzial** von etwa 3.501 € – unter der Annahme einer Jahresstückzahl von 18.000 und einer fertigungsspezifischen Änderungsdauer der werkzeuggebundenen Version von 71 Tagen. Sowohl Stundenlohn als auch Nacharbeitsminuten sind vom Anwender frei konfigurierbar, wodurch die Sensitivität der Kosten greifbarer wird. Bei einer erwarteten fertigungsspezifischen Änderungsdauer einer AM-Version von 10 Tagen wird, für den Fall einer Nacharbeit, ein **Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzial** von 3.008 € errechnet, vgl. Abbildung 7.11.

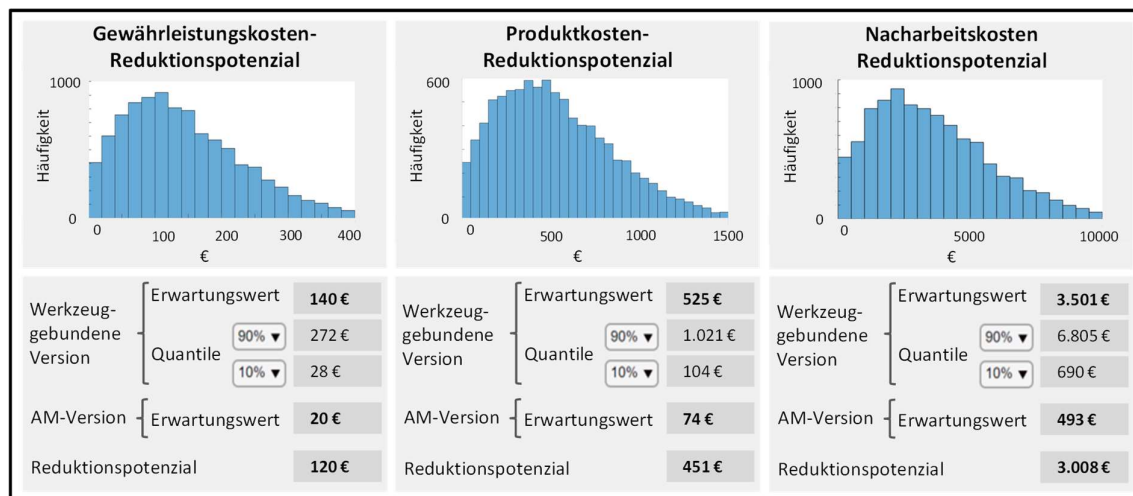


Abbildung 7.11: Reduktionspotenzial von Zusatzkosten einer Änderung (Teil 1) – Darstellung des Prognoseergebnisses an einem Beispiel

Vorproduktion: Reduktionspotenzial von Kapazitätskosten

Analog zur Nacharbeit wird auch für eine Vorproduktion kein Eintrittsrisiko prognostiziert. Es werden lediglich entstehende Kosten und damit resultierende Reduktionspotenziale berechnet, falls eine Vorproduktion erforderlich wird. Der Kalkulation liegen folgende Annahmen zugrunde: Die Fertigungseinzelkosten je Bauteil betragen 0,30 €, zur Sicherheit

werden 5 % mehr Bauteile produziert als bei der prognostizierten fertigungsspezifischen Änderungsdauer an Bestand erforderlich wären. Der Schichtzuschlag für die notwendige Vorproduktion liegt bei 50 %. Bei einer analog zu den anderen Reduktionspotenzialen erwarteten fertigungsspezifischen Änderungsdauer von 71 Tagen beträgt das **maximale Kapazitätskosten-Reduktionspotenzial** 551 €. Bei einer AM-Änderungsdauer von 10 Tagen könnten 473 € eingespart werden, vgl. Abbildung 7.12. Die Sensitivitätsanalyse in Anhang 33 zeigt die resultierenden Zusatzkapazitätskosten, wenn einzelne Variablen variiert werden.

Vorproduktion: Reduktionspotenzial von Lagerflächenkosten

Bei der Vorproduktion müssen die Bauteile gelagert werden, bis sie vom Fahrzeugwerk abgerufen und verbaut werden, vgl. Abschnitt 6.4.2. Zur Berechnung wird folgendes angenommen: Die Vorproduktionsdauer beträgt 50 % der fertigungsspezifischen Änderungsdauer (gemäß einem exemplarischen Erfahrungswert der Ingenieure also bei 71 Tagen 35,5 Tage) und während der Änderung werden alle sieben Tage Bauteile abgerufen (Abrufintervall), sodass sich der Bestand wöchentlich reduziert. Zudem werden die Lagerflächenkosten mit 6 €/m² und Monat und die Lagerhöhe pauschal mit 3 m angenommen. Für das Beispielbauteil aus Kunststoff mit einem Volumen von 42 cm³, welches von den Experten aufgrund seiner Empfindlichkeit als schlecht stapelbar eingeschätzt wurde, errechnet sich ein **maximales Lagerflächenkosten-Reduktionspotenzial** von 17 €. Bei einer AM-Änderungsdauer von zehn Tagen würden diese Kosten nahezu vollständig entfallen, vgl. Abbildung 7.12. Der Grund ist, dass nicht nur die Lagerungsdauer kürzer, sondern auch die Anzahl der vorzuproduzierenden Bauteile geringer ist. Ergänzend wurde die Sensitivität der Lagerflächenkosten analysiert, indem Jahresstückzahlen, Bauteilvolumen, Verpackungsart und die Stapelbarkeit der Bauteile variiert wurden, vgl. Anhang 34. Durch eine derartige Sensitivitätsanalyse werden die Einflussgrößen für den Anwender der Methode greifbar und der Zusatzeffekt wird nachvollziehbar.

Vorproduktion: Reduktionspotenzial von Behälterkosten

Bauteile, für die sonst Spezialbehälter vorgesehen sind, werden im Änderungsfall in Einmalverpackungen gelagert, vgl. Abschnitt 6.4.2. Das sich ergebende **maximale**

Behälterkosten-Reduktionspotenzial beträgt 1.529 €, das **Reduktionspotenzial** mit einer AM-Version liegt bei 1.320 €. In Anhang 35 wurden Jahresstückzahl, Bauteilvolumen, Art der Verpackung sowie Robustheit und Stapelbarkeit variiert, um den Effekt auf das Reduktionspotenzial zu untersuchen. Es ist nachvollziehbar, dass die Kosten bei größeren Bauteilen, höheren Stückzahlen und niedrigerer Bauteilrobustheit ansteigen und bei gemieteten Standardbehältern niedriger sind als bei Einmalverpackungen.

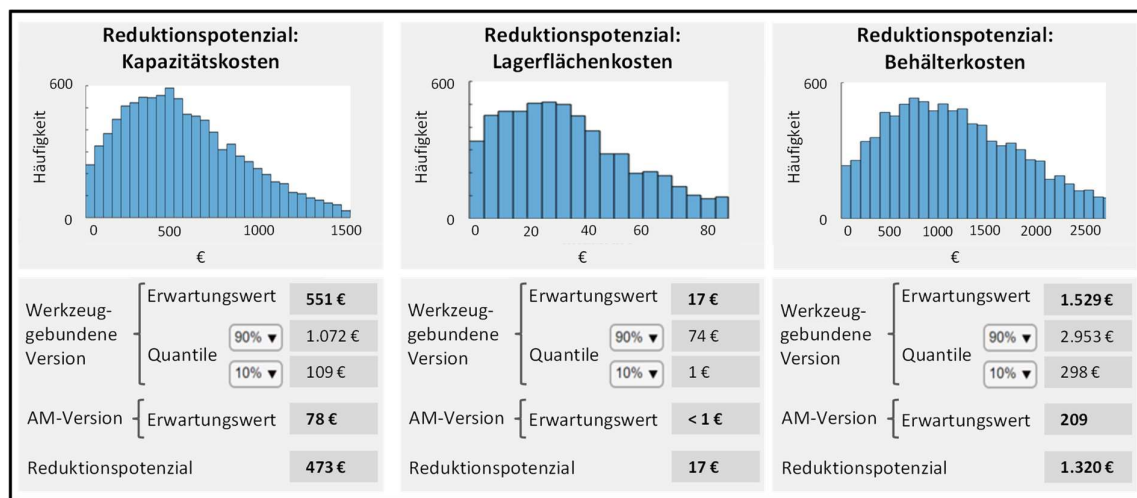


Abbildung 7.12: Reduktionspotenzial von Zusatzkosten einer Änderung (Teil 2: Vorproduktion) – Darstellung des Prognoseergebnisses an einem Beispiel

7.1.5 Gegenüberstellung aller Potenziale und vereinfachte Berechnung einer Gesamtpotenzialzahl

In den Abschnitten 7.1.2 bis 7.1.4 wurden einzelne Potenziale einer additiven, anstatt werkzeuggebundenen und somit änderungsflexibleren Fertigung quantifiziert. In Abschnitt 6.5 wurde ein Ansatz zur vereinfachten Berechnung einer Gesamtpotenzialzahl entwickelt. Der Ansatz wird anhand Bauteil 3 veranschaulicht. Für das Bauteil wurden eine Änderungswahrscheinlichkeit $\pi_{*G\ddot{A}}$ von 59,1 % und fertigungsspezifische Änderungskosten der werkzeuggebundenen Version $f\ddot{A}K_{*WG}$ von 36.451 € prognostiziert. Die Änderungsintensität liegt bei 60,5 %. Das Bauteil hat also im Änderungsfall mit großer Wahrscheinlichkeit mehr als eine Änderung, wobei eine Änderungsanzahl $\ddot{A}A_*$ von zwei am häufigsten ist (vgl.

Abschnitt 7.1.2). Die fertigungsspezifischen Kosten $f\ddot{A}K_{*AM(\ddot{A}ZP)}$ einer großen Änderung zum spätesten prognostizierten Änderungszeitpunkt des Bauteils (drei Monate nach Serienstart) betragen 5.011 €, vgl. Abschnitt 7.1.3. Nach Einsetzen der Werte in Formel (35) ergibt sich ein Reduktionspotenzial der fertigungsspezifischen Änderungskosten von 15.620 €.

$$\hat{y}_*(Kr_{AM-f\ddot{A}K}) = 0,591 * (36.451 \text{ €} - 2 * 5.011 \text{ €}) = 15.620 \text{ €}$$

Das Reduktionspotenzial von Zusatzeffekten bei Änderungen nach SOP wird berechnet, indem die Änderungswahrscheinlichkeit $\pi_{*G\ddot{A}}$ von 59,1 % mit der Summe der in Abschnitt 7.1.4 berechneten Reduktionspotenziale multipliziert wird. Das Gewährleistungskosten-Reduktionspotenzial $\hat{y}_*(Kr_{GwK})$ beträgt 120 €, das Produktkosten-Reduktionspotenzial 451 €, das Nacharbeitskosten-Reduktionspotenzial 3.008 €, das Kapazitätskosten-Reduktionspotenzial 473 €, das Lagerflächen-Produktionspotenzial 17 €, das Behälterkosten-Reduktionspotenzial 1.320 €. Somit ergibt sich unter Berücksichtigung aller Zusatzkostenarten ein erwartetes Reduktionspotenzial von 3.185 €.

$$\hat{y}_*(Kr_{AM-Zusatzpot}) = 0,591 [120 \text{ €} + 451 \text{ €} + 3.008 \text{ €} + 473 \text{ €} + 17 \text{ €} + 1.320 \text{ €}] = 3.185 \text{ €}$$

Die Summe des Reduktionspotenzials der direkten Änderungskosten und der Zusatzeffekte ergibt ein Gesamtpotenzial von 18.805 €.

$$\hat{y}_*(Kr_{AM-Gesamt}) = 15.620 \text{ €} + 3.185 \text{ €} = 18.805 \text{ €}$$

Gemäß der deskriptiven Analyse in Abschnitt 7.1.4 werden 50 % der Änderungen nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt (Anteil 1), vgl. Abbildung 7.10. Die prognostizierte fertigungsspezifische Dauer einer großen Änderung beträgt bei der AM-Version von Bauteil 3 sieben Tage, vgl. Abbildung 7.9. Dadurch ergibt sich eine Änderungsdauer $\ddot{A}D_j$ von 16 Tagen (7 Tage dividiert durch den fertigungsspezifischen Anteil einer Änderung $f\ddot{A}D$ von 60 %, vgl. Abschnitt 7.1.2, und multipliziert mit 7/5, um die Dauer inkl. Wochenende zu berechnen). Bei einer Änderungsdauer $\ddot{A}D_j$ von 16 Tagen könnten ca. 33,3 % der Änderungen eine Bauphase früher umgesetzt werden (Anteil 2), vgl. Abbildung 7.10. Da 50 % der Änderungen nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt werden, würde eine Änderung der AM-Version des Bauteils also zu 16,7 % eine Bauphase früher umgesetzt werden als die der werkzeuggebundenen Version.

7.2 Anwendung und Validierung von Baustein 2

In diesem Abschnitt wird die Anwendung von Baustein 2 anhand eines konkreten Beispiels beschrieben. Die dabei verwendeten Werte, insbesondere die Kosten, sind verfälscht und dienen nur der Veranschaulichung. Das Vorgehen wurde anhand weiterer – im Rahmen der Arbeit nicht explizit beschriebener – Beispiele durchgeführt, eine mehrmalige Darstellung des Vorgehens führt dabei zu keinem weiteren Erkenntnisgewinn. Die an den Anwendungsbeispielen beteiligten Produktmanager und Konzeptingenieure eines OEMs beantworteten aber im Nachgang einen Fragebogen. Anhand dessen soll beurteilt werden, inwieweit die in Abschnitt 4.1 gestellten Anforderungen erfüllt wurden. Die Fragen und Ergebnisse sind in den Abbildungen des Abschnitts dargestellt.

7.2.1 Schritt 1 – Identifikation von Innovationsideen

In Schritt 1 sollen die anhand der Expertenstudie identifizierten Innovationsideen, für die Änderungsflexibilität im Lebenszyklus notwendig ist (vgl. Abschnitt 3.3, Anhang 9, Anhang 10), auf Aktualität überprüft und bei Bedarf ergänzt werden. Die Innovationsideen wurden nur wenige Monate vor der Durchführung der Anwendungsbeispiele identifiziert. Dennoch deckte die Zusammenstellung nicht alle Innovationsideen ab, die laut der beteiligten Produktmanager für die jeweiligen Fahrzeuge relevant sind, vgl. Abbildung 7.13. Dies ist möglicherweise auf die Individualität eines jeden Fahrzeugprojekts zurückzuführen. Mit einem Ergebnis von 3,6 wurden aber tendenziell die wichtigsten Ideen abgedeckt.

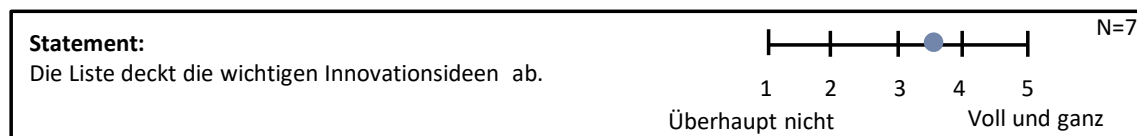


Abbildung 7.13: Beurteilung der Vollständigkeit identifizierter Innovationsideen

7.2.2 Schritt 2 – Auswahl von Innovationsideen

Die aus den Trends abgeleitete „Liste an Innovationsideen, um Kundenanforderungen durch Änderungsflexibilität zu adressieren“ umfasst 45 Innovationsideen. Die Liste wird im Anwendungsbeispiel eines Fahrzeugs des Segments L verwendet. Der Kundennutzen wurde vom Produktmanagement mit 0,4 gewichtet, die Höhe des Kommunikationspotenzial mit 0,1, der strategische Fit mit 0,05 und das Marktpotenzial mit 0,45. Somit überwiegen wirtschaftliche Kriterien. Bei der Innovationsidee „Updates von Sensorik zur Integration von Fahrassistentenfeatures“ werden der Kundennutzen, das Kommunikationspotenzial sowie der strategische Fit als hoch (Likert-Score = 4) bewertet. Indem die Absatzprognose der vier Märkte Europa, USA, China und Rest der Welt in die Gewichtung miteinbezogen wird, ergibt sich für die Marktrelevanz ein Wert von 3,8. Daraus resultiert eine Gesamtbewertung von 3,9. Damit ist die Innovationsidee eine der fünf relevantesten und wird weiterverfolgt.

Den Produktmanagern fiel die kriterienbasierte Bewertung eher leicht – dabei waren der strategische Fit und die Marktrelevanz am schwersten zu beurteilen (vgl. Abbildung 7.14).

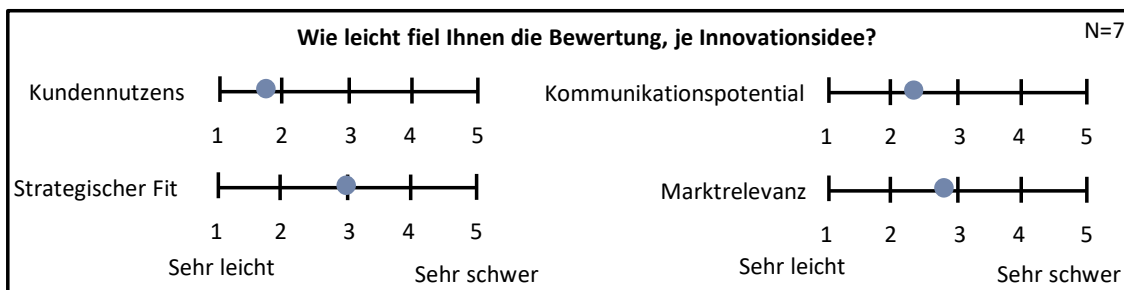


Abbildung 7.14: Beurteilung der Bewertungskriterien

Laut der befragten Produktmanager kann der Gesamtnutzen einer Innovationsidee im Sinne einer ersten Potenzialabschätzung mit den Kriterien ausreichend gut beurteilt werden. Auch das Aufwand-Nutzen-Verhältnis wird als angemessen eingestuft. Es wurde lediglich angemerkt, dass für die Bewertung in der Konzeptphase zum Teil nicht alle Informationen zur Verfügung stehen (vgl. Abbildung 7.15). Die Konzeptphase liegt einige Jahre vor Serienstart, sodass der betrachtete Lebenszyklus einen langen, in der Zukunft liegenden Zeitraum umspannt. Daraus resultiert die von den Befragten angemerkte Bewertungsunschärfe.

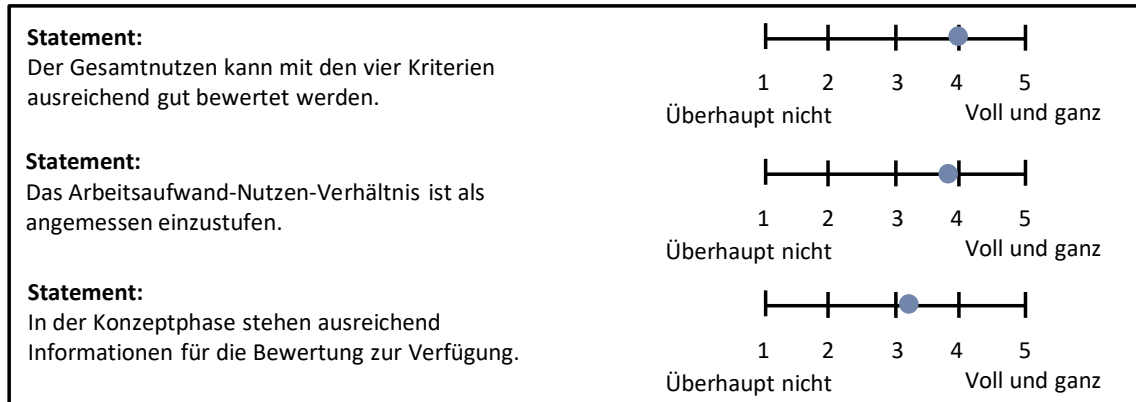


Abbildung 7.15: Beurteilung der Auswahl von Innovationsideen

7.2.3 Schritt 3 – Bauteilidentifikation und Bewertung von Umsetzungsaufwand und Nutzen

Anschließend wurden Bauteile identifiziert und die Umsetzbarkeit der Innovationsidee bewertet. Sieben Produktmanager und drei an den Anwendungsbeispielen beteiligte Konzeptingenieure gaben an, dass eine erste inhaltliche Konkretisierung der Umfänge bereits in der Konzeptphase durchgeführt werden kann, vgl. Abbildung 7.16.

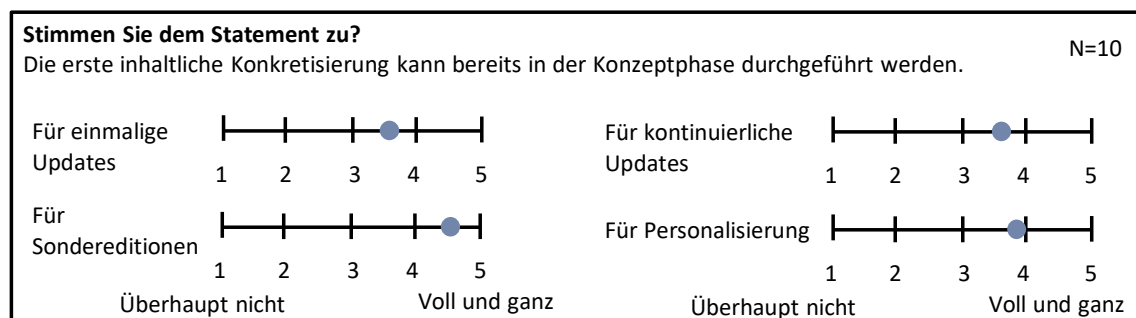


Abbildung 7.16: Beurteilung der Machbarkeit, frühzeitig Bauteile zu identifizieren und die Umsetzbarkeit von Updates, Editionen und Personalisierung zu prüfen

Für die Innovationsidee „Updates von Sensorik zur Integration von Fahrassistenzen“ werden Sensorik und Assistenzen von anderen Fahrzeugen übernommen. Bei einem Update müssen jedoch drei unterschiedliche Halter geometrisch angepasst werden. Werden diese werkzeuggebunden hergestellt, entstehen je Update Kosten für Werkzeugänderung und

Arbeitsvorbereitung. Zudem fallen Kosten in der Entwicklung, beispielsweise für Konstruktion, Simulation und Integration sowie Kosten für Absicherung, Applikation und Erprobung an. Arbeitsvorbereitungs- und Werkzeugkosten, die bei einer AM-Version der Halter zu geringerem Maße anfallen würden, machen je Update 23 % der Änderungskosten aus (vgl. Anhang 36). Ein erstes Update soll drei Jahre nach Serienstart, ein weiteres nach sechs Jahren durchgeführt werden. Nach Aufnahme aller Einmalaufwände und Herstellkosten wird über eine Kapitalwertrechnung festgestellt, dass Halter 2 und 3 über AM wirtschaftlich sind (vgl. Abbildung 7.17). Bei der Kapitalwertrechnung des Gesamtumfangs werden je Update die Einmalaufwände der werkzeuggebundenen Version von Halter 1 und die Einmalaufwände der AM-Versionen von Halter 2 und 3 berücksichtigt. Zudem werden alle weiteren Aufwände, etwa in der Entwicklung, berücksichtigt, sodass zunächst ein negativer Kapitalwert entsteht. Eine Rentabilität der Updates ist gewährleistet, wenn durch einen gesteigerten Absatz oder Verkaufspreis ein höherer Kapitalwert erzielt werden kann als ohne die Updates, vgl. Abbildung 7.17. Die Verkaufspreis-, respektive Absatzsteigerung muss seitens Produktmanagement und Vertrieb beurteilt werden. Im Fallbeispiel sind die Updates vorteilhaft. Für Halter 2 und 3 ist die Additive Fertigung als Technologie zu wählen, wenn nach drei und sechs Jahren ein „Update von Sensorik zur Integration von Fahrerassistenzfeatures“ durchgeführt werden soll. Für Halter 1 ist eine werkzeuggebundene Technologie wirtschaftlicher.

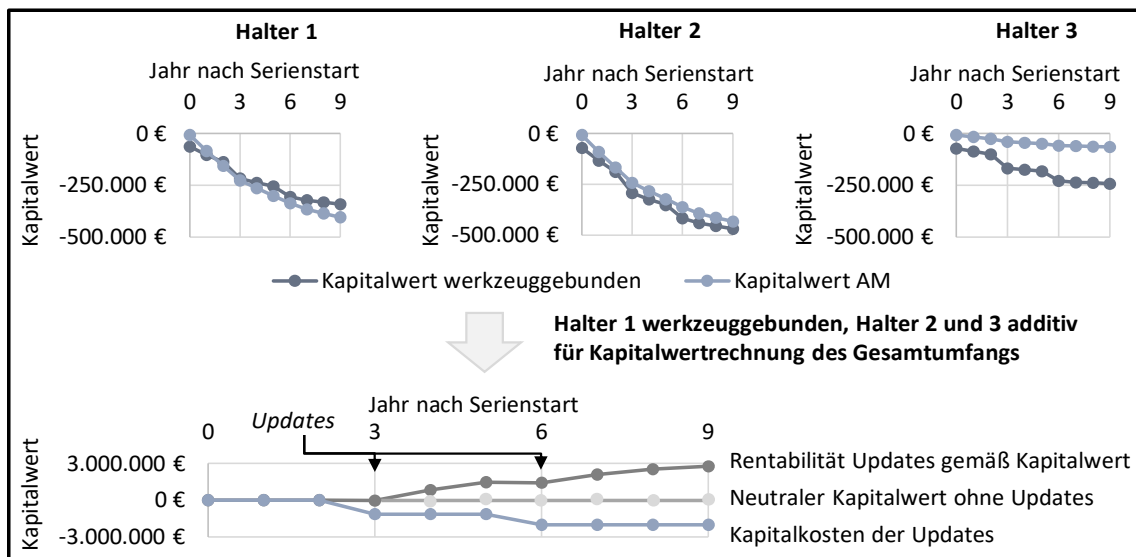


Abbildung 7.17: Anwendung von Baustein 2 – Schritt 3: Kapitalwertberechnung für Gesamtumfang und je Bauteil

Die an den Anwendungsbeispielen beteiligten Produktmanager sehen es als Wettbewerbsvorteil an, wenn die aus Vertriebsicht relevanten Innovationsideen frühzeitig an die Entwicklung adressiert werden können, sodass die Entwicklung Änderungsflexibilität vorhalten kann. Auch die Konzeptingenieure gaben an, dass eine frühzeitige Rückmeldung seitens des Produktmanagements dazu führen könnte, dass bei sonst ähnlichen Kosten vermehrt das flexiblere Konzept gewählt wird.

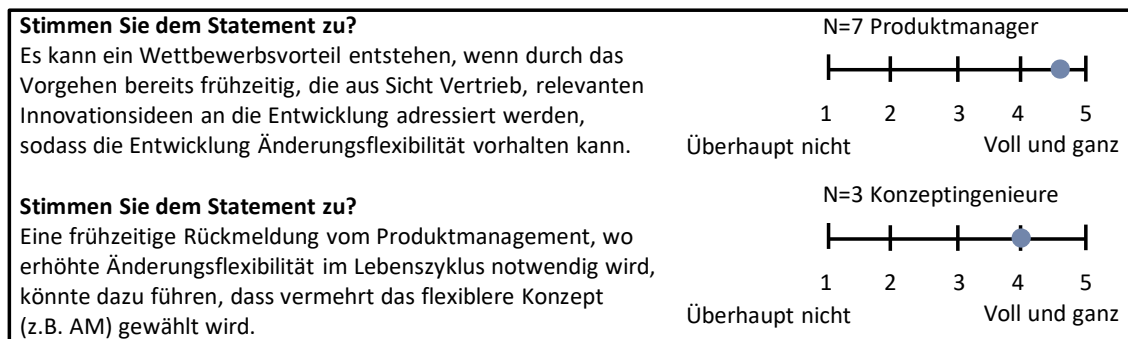


Abbildung 7.18: Beurteilung, Änderungsflexibilität frühzeitig zu berücksichtigen

7.3 Zusammenfassung der Anwendung und Zwischenfazit

Baustein 1 und Baustein 2 wurden getrennt voneinander in der unternehmerischen Praxis angewandt und validiert. Sofern notwendig und möglich, wurde die Genauigkeit der einzelnen Methoden untersucht.

Baustein 1 besteht aus fünf Schritten mit dem Ziel, das Potenzial von AM auf das Änderungsverhalten eines Bauteils im PEP zu bewerten, um es bei der Serientechnologieentscheidung zu berücksichtigen. Für **Schritt 1**, die **Vorselektion**, konnte die mittlere relative Änderungshäufigkeit der vorselektierten Bauteile in den Anwendungsprojekten um 167 % respektive 144 % gesteigert werden, indem nur Bauteile aus Baugruppen betrachtet wurden, die historisch viele Änderungen hatten. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass über die Volumenkosten von Bauteilen historischer Fahrzeugprojekte ein Rückschluss auf die Volumenkosten (und damit auf die Herstellkosten) der Bauteile in Anwendungsprojekten möglich ist. Ist das Referenzprojekt dem

Anwendungsprojekt hinsichtlich Stückzahl, Segment und Fahrzeugart ähnlicher, ist die mittlere absolute Abweichung der Volumenkosten niedriger (MAPE = 88,5 % bei ähnlicheren Projekten versus 122,3 % bei wenig ähnlichen Projekten). Durch den Vergleich der Volumenkosten mit einem materialabhängigen Faktor der AM-Volumenkosten in €/cm³ können Potenzialbauteile identifiziert werden. Der MAPE wird als ausreichend eingestuft, um in diesem Schritt Bauteile vorzuselektieren, die potenziell mit AM wirtschaftlich herstellbar sind. In **Schritt 2** erfolgt eine **Prognose des Änderungsverhaltens der werkzeuggebundenen Version eines Bauteils**. Die Prognose beruht auf zuvor identifizierten empirischen Wirkzusammenhängen. Die Anwendbarkeit im Gesamtkontext von Baustein 1 wurde anhand von Beispielbauteilen aus Anwendungsprojekten veranschaulicht. Die Genauigkeit der Prognosen wurde anhand von Kreuzvalidierungen evaluiert. Die entwickelten logistischen Regressionsmodelle zur Prognose einer geometrischen Änderung im PEP (AUC = 0,763, Bias = 0,04 %) sowie zur Prognose, ob ein Bauteil mehr als eine Änderung haben wird (AUC = 0,771, Bias = -0,39 %), haben eine akzeptable Güte. Ergänzend ist ein Blick auf historische Änderungsdaten hilfreich, um auf die Verteilung der Änderungsanzahl von Bauteilen eines Anwendungsprojekts zu schließen. Fertigungsspezifische Änderungskosten setzen sich aus Werkzeugänderungskosten und Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung zusammen. Die Regressionsprognose der Werkzeugänderungskosten (MAPE = 112 %) ist genauer als mit alternativen Schätzern wie Median (MAPE = 261 %) oder Mittelwert (MAPE = 648 %). Gleiches gilt für die Änderungskosten in der Arbeitsvorbereitung, die als Funktion der Werkzeugänderungskosten prognostiziert werden (MAPE = 65 %). Die Regressionsprognose des spätesten Änderungszeitpunktes eines Bauteils weicht durchschnittlich um 9,7 Monate von der Realität ab und ist damit ebenfalls genauer als alternative Schätzer. Die fertigungsspezifische Änderungsdauer eines Bauteils wird bei einer späten Änderung ab Serienstart über das Produkt aus Änderungsdauer und fertigungsspezifischem Anteil berechnet. Die über lineare Regression prognostizierte Änderungsdauer weicht im Mittel um 69 % vom Realwert ab. Der fertigungsspezifische Anteil an der Änderungsdauer wird mithilfe des Mittelwertes geschätzt – das Prognoseergebnis weichte in der Kreuzvalidierung im Mittel um 22,4 Prozentpunkte von der Realität ab. Dies

entspricht einem MAPE von 50,9 %. Die Prognoseergebnisse wurden an einem Beispielbauteil veranschaulicht und bestehen jeweils aus einer Punktschätzung mit entsprechendem Prognoseintervall. Für **Schritt 3**, der **Prognose der Änderungsflexibilität einer AM-Version**, wurden unterschiedliche Änderungsarten zu unterschiedlichen Zeitpunkten simuliert und anschließend die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse diskutiert. Die Höhe der simulierten Änderungskosten- und Dauer erscheint realistisch – die Genauigkeit kann nicht quantifiziert werden, da reale Änderungsdaten von AM-Serienbauteilen für einen Vergleich fehlen. An einem Beispielbauteil wird der Vorteil der AM-Version besprochen. In **Schritt 4** konnte anhand von Anwendungsbeispielen gezeigt werden, welche **negativen Zusatzeffekte bei Änderungen** entstehen. Zunächst wurde veranschaulicht, dass ein großer Anteil von Änderungen im PEP nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt wird und dass eine kürzere Änderungsdauer den Anteil reduzieren könnte. Bei Änderungen nach Serienstart gibt es weitere negative Zusatzeffekte: Weiterhin anfallenden Gewährleistungskosten bis zur Änderungsumsetzung, erhöhte Produktkosten, Nacharbeitskosten bis zur Umsetzung sowie Vorproduktionskosten. In Abschnitt 6.4.2 wurden für diese Zusatzeffekte Berechnungsansätze vorgeschlagen, die aus Literatur und Expertenbefragungen ermittelt wurden. Bei einer kürzeren Änderungsdauer können die negativen Zusatzeffekte reduziert werden. Basierend auf Referenzprojekten wird ein Durchschnittswert für das Gewährleistungskostenrisiko eines Bauteils berechnet. Ebenso wird für ein Bauteil der Durchschnittswert kalkuliert, um den sich die Produktkosten reduzieren, sobald eine Änderung umgesetzt ist. Für beide Zusatzeffekte wurde untersucht, inwieweit ein Übertrag von Referenz- auf Anwendungsprojekte möglich ist. Das Gewährleistungskostenrisiko des Anwendungsprojekts unterschied sich um 350 % vom Referenzprojekt – der Wert einer möglichen Produktkostenreduktion um 49,3 %. Für Nacharbeits- und Vorproduktionskosten wurde kein Eintrittsrisiko ermittelt. Die Berechnung der Zusatzkostenarten wurde anhand eines Beispiels veranschaulicht.

Aus dem kumulierten Reduktionspotenzial fertigungsspezifischer Änderungskosten und Zusatzkosten konnte in **Schritt 5** (Abschnitt 7.1.5) exemplarisch der Vorteil einer AM-Bauteilversion gezeigt werden. Die potenzielle Kosteneinsparung bei Änderungen betrug

18.805 €, die Wahrscheinlichkeit, dass eine Änderung vor SOP eine Bauphase früher umgesetzt werden kann, lag bei von 16,7 %.

In Abschnitt 7.1 konnte die Anwendbarkeit von **Baustein 1** nachgewiesen werden. Der Baustein ermöglicht erstmals, den Vorteil von AM gegenüber einer werkzeuggebundenen Technologie, in Bezug auf Änderungen im PEP vor Technologieentscheid zu bewerten. So kann der Vorteil bei der Entscheidung der Serientechnologie eines Bauteils berücksichtigt werden.

Mit **Baustein 2** wird in drei Schritten beurteilt, für welche Bauteile ein erhöhter Bedarf an geometrischer Änderungsflexibilität im Lebenszyklus – etwa aufgrund erforderlicher Updates oder der Notwendigkeit von Flexibilität für Personalisierung und Sondereditionen – besteht. Basis ist eine über Expertenbefragungen generierte **Liste an Innovationsideen**, welche geometrische Änderungsflexibilität im Lebenszyklus notwendig machen (vgl. Abschnitt 3.3, Anhang 9, Anhang 10). Diese wird in einem **ersten Schritt** auf Aktualität überprüft. Die Anwendung zeigt, dass eine ständige Aktualisierung erforderlich ist, da sonst nicht alle für ein neues Fahrzeugprojekt relevanten Innovationsideen enthalten sind. Aus dieser Liste werden in **Schritt 2** über eine **Nutzwertanalyse** Innovationsideen priorisiert und ausgewählt. Laut der an den Anwendungsbeispielen beteiligten Produktmanager beschreiben die Kriterien Kundennutzen, strategischer Fit, Kommunikationspotenzial und Marktrelevanz den Gesamtnutzen ausreichend und das Aufwand-Nutzen-Verhältnis ist angemessen. Es wurden jedoch Bedenken geäußert, inwieweit zum Bewertungszeitpunkt bereits alle notwendigen Informationen verfügbar sind – denn die Bewertung muss vor Technologieentscheid durchgeführt werden und für den gesamten Produktlebenszyklus gelten. In **Schritt 3** sollen, ausgehend von einer Innovationsidee, die betroffenen **Bauteile identifiziert und die Umsetzbarkeit technisch und wirtschaftlich bewertet werden**. Eine erste dafür erforderliche inhaltliche Konkretisierung ist laut der Produktmanager und Konzeptingenieure bereits frühzeitig möglich. Schritt 3 wurde anhand der Innovationsidee „Updates von Sensorik zur Integration von Fahrerassistenzfeatures“ in der Praxis erprobt. Für zwei von drei Haltern von Sensorik wurde infolgedessen AM als Fertigungstechnologie empfohlen. Insgesamt könnte laut Produktmanagement ein Wettbewerbsvorteil entstehen, wenn durch das Vorgehen bereits frühzeitig die aus Vertriebsicht relevantesten Innovationsideen an die Entwicklung

adressiert werden, sodass die Entwicklung Änderungsflexibilität vorhalten kann. Auch die Konzeptingenieure gaben an, dass eine frühzeitige Rückmeldung seitens Produktmanagement dazu beitragen kann, dass vermehrt das flexiblere Konzept und somit AM gewählt würde.

In Abschnitt 7.2 konnte gezeigt werden, dass Baustein 2 eine Bewertung des Vorteils von AM hinsichtlich Änderungsflexibilität im Lebenszyklus (etwa bei Updates) ermöglicht. Dadurch kann diese bei der Entscheidung der Serientechnologie eines Bauteils berücksichtigt werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Forschungsarbeit war es, die Bewertung des Potenzials der Additiven Fertigung hinsichtlich Änderungsflexibilität im Lebenszyklus eines Automobils zu ermöglichen. Die wesentlichen Inhalte der Arbeit sollen in Abschnitt 8.1 nochmals umrissen werden. Vorgehen und Zielerreichung werden zudem kritisch reflektiert und Defizite hervorgehoben. Diese bilden die Grundlage, um im Ausblick den weiteren Forschungsbedarf abzuleiten, vgl. Abschnitt 8.2.

8.1 Zusammenfassung und kritische Reflexion

Additive Fertigungstechnologien sind heute in der Serienfertigung eines Automobils – auch aufgrund bisher fehlender Wirtschaftlichkeit – noch nicht etabliert. Ein Vorteil additiver gegenüber werkzeuggebundenen Technologien liegt in der geometrischen Änderungsflexibilität. In der Produktentstehung ist diese geometrische Änderungsflexibilität vorteilhaft, um Änderungen auch spät im PEP schnell und kostengünstig umzusetzen. Zudem erleichtert sie die Umsetzung von Updates, Sondereditionen und Personalisierungen im Lebenszyklus. Die der Arbeit zugrundeliegende Problemstellung war, dass dieser Vorteil bisher nicht vor Technologieentscheid bewertet und dadurch auch nicht berücksichtigt werden konnte. Daraus leitete sich folgende Forschungsfrage ab.

„Wie lässt sich das wirtschaftliche Potenzial der Additiven Fertigung hinsichtlich Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus eines Automobils bewerten, um dieses Potenzial bei der Entscheidung für die geeignete Serienfertigungstechnologie eines Bauteils zu berücksichtigen?“

Zunächst wurden in Kapitel 2 Grundlagen zur Additiven Fertigung vermittelt, der Produktlebenszyklus und die Rolle von Änderungen darin beschrieben sowie die aktuellen Trends im Automobilbau besprochen, die Änderungsflexibilität im Lebenszyklus erfordern. Das im Stand der Forschung identifizierte Spannungsfeld zwischen der Notwendigkeit

geometrischer Änderungen, den Einschränkungen werkzeuggebundener Technologien und der Charakteristik geometrischer Änderungsflexibilität von AM-Technologien wurde in Kapitel 3 anhand von drei Einzelstudien näher untersucht. Die erste Studie basierte auf Sekundärdaten historischer Änderungen in der Produktentstehung und gab Aufschluss über Arten, Ursachen, Zeitpunkte und Kosten geometrischer Änderungen. Die Studie zeigte, dass die Anpassung von Werkzeugen den größten Teil der Kosten geometrischer Änderungen ausmachen, dass geometrische Änderungen in manchen Baugruppen besonders häufig vorkommen und dass zwischen der Bestellung der ersten Werkzeuge und dem Serienanlauf die meisten geometrischen Änderungen mit Kostenauswirkungen auf Werkzeuge durchgeführt werden. Ergänzend dazu verdeutlichte eine expertenbasierte Studie, dass eine lange Änderungsdauer negative Zusatzeffekte wie etwa Nacharbeits- und Vorproduktionskosten verstärkt. Änderungsflexibilität ist auch im weiteren Lebenszyklus hinsichtlich Updates, Personalisierung und Editionen von Vorteil. In einer Expertenbefragung von Produktmanagern wurden diesbezüglich bestehende gegenwärtige Herausforderungen identifiziert. Zudem wurden aus den aktuellen Trends des Automobilbaus Innovationsideen abgeleitet, die Kundenanforderungen adressieren und Änderungsflexibilität im Lebenszyklus notwendig machen. Aus den Grundlagen (Kapitel 2) und Studien (Kapitel 3) wurden in Kapitel 4 Anforderungen an eine Methode abgeleitet, mit der das Potenzial von AM hinsichtlich der Änderungsflexibilität im Produktlebenszyklus eines Bauteils bewertet werden kann. In Kapitel 4 wurde festgestellt, dass keiner der im Stand der Wissenschaft etablierten Ansätze geeignet ist, alle gestellten Anforderungen zu erfüllen. Daher wurde in Kapitel 5 ein Methodenkonzept entworfen sowie die notwendigen methodischen Grundlagen vermittelt. Das Konzept, welches in Kapitel 6 ausdetailliert und in Kapitel 7 in der Unternehmenspraxis angewandt wurde, besteht aus zwei Bausteinen, mit denen die drei Unterforschungsfragen der Arbeit adressiert werden. Durch Beantwortung dieser Fragen ist auch die Hauptforschungsfrage beantwortet. Die Methode soll anhand der gestellten Anforderungen kritisch reflektiert werden, vgl. Abbildung 8.1.

	1. Bewertungsgegenstand				2. Anwendung				3. Notwendige inhaltliche Bestandteile				4. Ergebnis				
	1.1 Automotive Serienbauteile	1.2 geometrische Bauteiländerungen	2.1 mit dem Wissen vor Technologieentscheid	2.2 Verarbeiten von Bewertungsunsicherheit	2.3 Verwenden verfügbarer Daten	2.4 angemessener Bewertungsaufwand	3.1 Auftreten und Zeitpunkte im PEP	3.2 fertigungsspezifische Kosten	3.3 negative Zusatzeffekte	3.4 fertigungsspezifische Dauer und Kosten	3.5 für unterschiedliche Änderungsarten	3.6 für unterschiedliche Zeitpunkte	3.7 Flexibilitätspotenzial bewertbar	3.8 Bauteilidentif. + Wirtschaftl. bewertbar	4.1 Quantifizierbar	4.2 Genauer als bisherige Methoden	4.3 Nachvollziehbar
Bewertung																	
○ nicht erreicht																	
◐ z.T. erreicht																	
● erreicht																	
Baustein 1																	
Bewerten von Änderungsflexibilität im PEP	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Baustein 2																	
Bewerten von Änderungsflexibilität im Lebenszyklus	●	●	◐	◐	●	●							●	●	●	◐	●

Abbildung 8.1: Kritische Reflexion der Methode hinsichtlich der Anforderungen

Anhand **Unterforschungsfrage 1** sollte untersucht werden, wie das Änderungsverhalten von Bauteilen im PEP a priori bewertet werden kann. Auftreten, Änderungszeitpunkte und fertigungsspezifische Änderungskosten eines Bauteils sollen prognostizierbar sein – ebenso wie Zusatzeffekte, die abhängig von der Änderungsdauer entstehen. Mit Baustein 1 ist diese Prognose des geometrischen Änderungsverhaltens von Serienbauteilen im Automobilbau möglich. Auftreten, Zeitpunkte und fertigungsspezifische Kosten werden über logistische und lineare Regressionsmodelle prognostiziert. Dafür notwendige Wirkzusammenhänge werden durch Kombinieren historischer Änderungsdaten (abhängige Variablen) mit Expertenangaben zu Bauteileigenschaften (unabhängige Variablen) generiert. Das Vorgehen ist für eine Anwendung vor Technologieentscheid konzipiert und wurde anhand von Fahrzeugen unterschiedlicher Marken eines Automobilherstellers erprobt, vgl. Abschnitt 6.2 und 7.1.2. Eine Anwendbarkeit auf unterschiedliche Marken wurde bestätigt – eine Anwendung bei unterschiedlichen Automobilherstellern fehlt aber und kann Gegenstand weiterer Forschung sein. Der Bewertungsaufwand ist als angemessen einzustufen, weil zielgerichtet Bauteile vorselektiert werden, die mit erhöhter Wahrscheinlichkeit technisch und wirtschaftlich mit AM umsetzbar sind und in historisch änderungsanfälligen Baugruppen verbaut werden, vgl.

Abschnitt 6.1. Hinsichtlich der Genauigkeit könnten die Prognosemodelle noch weiter verbessert werden. Bei der Vorhersage, ob sich ein Bauteil im PEP ändern wird, wird eine Trefferquote von 70 % bis 74 % erreicht. Die Werkzeugänderungskosten werden mit einem MAPE von 112 % prognostiziert und der späteste Änderungszeitpunkt eines Bauteils mit einem RMSE von 9,7 Monaten. Je Prognose wird neben einer Punktschätzung ein Prognoseintervall angegeben. So wird dem Anwender die Bewertungsunsicherheit deutlich und kann bei der Bewertung berücksichtigt werden. Eine Verbesserung der Prognosegenauigkeit könnte die Verbreitung der Modelle in der Praxis fördern. Die Hinzunahme bisher nicht berücksichtigter Variablen könnte dies ermöglichen, was folglich Gegenstand weiterer Forschung sein kann. Neben den direkten Änderungskosten werden mit einer Änderung einhergehende Zusatzeffekte, die vor und nach Serienstart entstehen, prognostiziert. Dazu zählt, dass Änderungen mit langer Dauer nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt werden können und Nacharbeitskosten, Vorproduktionskosten, Gewährleistungskosten sowie höhere Produktkosten anfallen, bis die Änderung umgesetzt ist. Um auch die Bewertbarkeit möglicher Zusatzeffekte (die bei AM aufgrund kürzerer Änderungsdauer weniger stark sind) in die Betrachtung zu integrieren, wurden über Expertenbefragungen Einflussgrößen identifiziert und Berechnungsgleichungen zur einfachen Abschätzung der Zusatzeffekte entworfen. Historische Daten zu den Zusatzeffekten in Verbindung mit Änderungen liegen jedoch kaum vor. Daher fehlt eine umfangreiche Validierung ihrer Prognosegenauigkeit. Auch dies eröffnet einen Handlungsstrang für weitere Forschung. Abschließend sei gesagt, dass die Prognoseergebnisse des Änderungsverhaltens, inklusive der mit Änderungen einhergehender Zusatzeffekte eines Bauteils, quantifizierbar sind und die Berechnungswege nachvollziehbar dargelegt wurden (vgl. Abschnitte 6.1, 6.2, 6.4, 7.1.1, 7.1.2, 7.1.4). Damit ist erstmals die Bewertbarkeit des Bauteiländerungsverhaltens vor Serientechnologieentscheid möglich.

Mit **Unterforschungsfrage 2** sollte untersucht werden, wie die Änderungsflexibilität einer additiv gefertigten Bauteilversion a priori bewertet werden kann, um den Einfluss der Wahl der Fertigungstechnologie auf Änderungen im PEP zu beurteilen. Auch diese Frage wird mit Baustein 1 adressiert. Da historische Änderungsdaten fehlen, wurde ein expertenbasierter

Ansatz entwickelt. Damit sind Änderungsdauer und Änderungskosten eines Bauteils im PEP für unterschiedliche Änderungsarten und Zeitpunkte prognostizierbar. Der Ansatz ist auf alle Serienbauteile im Automobilbau und alle geometrischen Bauteiländerungen anwendbar. Die notwendigen Inputs ermöglichen eine Anwendung vor Technologieentscheid (vgl. Abschnitt 6.3), was in der unternehmerischen Praxisanwendung bestätigt werden konnte (vgl. Abschnitt 7.1.3.). Aufgrund der mit dem Bewertungszeitpunkt einhergehenden Unsicherheit werden Eingangsgrößen für die Prognose wie Kosten und Dauer einzelner Arbeitsvorbereitungsschritte nicht als Einzelwerte erfasst. Stattdessen wird in der Prognose ein minimaler, maximaler und wahrscheinlichster Wert der Expertenschätzung verarbeitet, vgl. Abschnitt 6.3. Der Bewertungsaufwand des expertenbasierten Ansatzes ist höher als jener zur Prognose des Änderungsverhaltens der werkzeuggebundenen Version. Da von einer höheren Motivation seitens Vertreter additiver Technologien auszugehen ist, den Vorteil der Technologie transparent zu machen, wird er dennoch als akzeptabel eingestuft. Das Prognoseergebnis konnte in Tagen respektive Euro quantifiziert werden und wurde von AM-Experten als nachvollziehbar eingestuft. Eine quantitative Beurteilung der Genauigkeit fehlt, weil keine historischen Änderungsdaten zu AM-Bauteilen vorliegen. Sobald historische Änderungsdaten zu AM-Bauteilen verfügbar sind, kann die Validierung der Genauigkeit Gegenstand weiterer Forschungsaktivitäten sein. Während das Änderungsverhalten der werkzeuggebundenen Version über Wirkzusammenhänge aus historischen Daten prognostiziert wird, erfolgt die Prognose der Änderungsflexibilität der AM-Version des Bauteils mit einem expertenbasierten Ansatz. Die unterschiedliche Vorgehensweise reduziert die Vergleichbarkeit, ist jedoch so lange notwendig, wie historische Änderungsdaten zu AM-Serienbauteilen fehlen. Trotz der vorhandenen Kritikpunkte kann die Änderungsflexibilität einer AM-Bauteilversion mit der Methode a priori evaluiert und Unterforschungsfrage 2 beantwortet werden. Dadurch kann der Einfluss der Additiven Fertigung auf Änderungen im PEP eines Bauteils bewertet und letztlich bei der Entscheidung der geeigneten Serientechnologie berücksichtigt werden.

Mit Baustein 2 der Methode kann beurteilt werden, bei welchen Bauteilen AM die passende Fertigungstechnologie darstellt, weil geometrische Änderungsflexibilität im Lebenszyklus erforderlich wird. Anhand der vor Technologieentscheid verfügbaren Daten können für ein

Fahrzeug über eine Nutzwertanalyse Innovationsideen ausgewählt werden, die eine Kundenanforderung adressieren und Änderungsflexibilität im Lebenszyklus erforderlich machen. Für die ausgewählten Innovationsideen werden entsprechende Bauteile identifiziert und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mithilfe des Kapitalwertes durchgeführt. Der Bewertungsaufwand wurde von Experten aus Produktmanagement und Entwicklung in den Anwendungsbeispielen als angemessen eingestuft. Aufgrund des Bewertungszeitpunktes vor Technologieentscheid sind notwendige Inputdaten des Bausteins von Unsicherheit geprägt. Dies hat Einfluss auf das Bewertungsergebnis – sowohl beim Identifizieren der richtigen Bauteile als auch beim Abschätzen des Änderungsaufwands und der resultierenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Hier könnten zukünftig neue Methoden zum Umgang mit Bewertungsunsicherheit entwickelt werden. Laut den befragten Experten ermöglicht die nachvollziehbare quantitative Bewertung, notwendige Änderungsflexibilität frühzeitig an die Entwicklung zu adressieren, damit diese bei sonst vergleichbaren Kosten das änderungsflexiblere Konzept, etwa AM, für ein Bauteil auswählt. Somit kann auch **Unterforschungsfrage 3** beantwortet werden.

8.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

In dieser Dissertation wurde eine Methode konzipiert, mit welcher das Potenzial der Additiven Fertigung hinsichtlich der Änderungsflexibilität eines Serienbauteils bewertet und bei der Entscheidung für die geeignete Serientechnologie berücksichtigt werden kann. Die in Abschnitt 8.1 thematisierte Ungenauigkeit einzelner Prognosemodelle könnte reduziert werden, wenn in dieser Dissertation identifizierte Einflussgrößen auf das Änderungsverhalten, etwa Bauteileigenschaften, zukünftig verstärkt in Datenbanken erfasst würden. In der Folge könnten automatisiert Wirkzusammenhänge auf Basis größerer Datenmengen untersucht und stabilere Modelle mit weiteren Variablen entwickelt werden. Auch ist anzumerken, dass die Methode nur bei drei unterschiedlichen Fahrzeugmarken eines Herstellers angewandt wurde – die Anwendung und Validierung bei anderen Automobilherstellern und anderen Fahrzeugsegmenten könnte Gegenstand weiterer Forschung sein. Möglicherweise können so

weitere Einflussgrößen auf das Änderungsverhalten identifiziert und Unterschiede zwischen Fahrzeugherstellern herausgearbeitet werden.

Weitere Forschungsaktivitäten könnten sich auf die Validierung der Prognosegenauigkeit einzelner Methodenbestandteile fokussieren, was erst möglich ist, wenn historische Daten in ausreichendem Maße systematisch erfasst und in Unternehmen vorhanden sind. Ein Aspekt ist dabei die Validierung der Prognosegenauigkeit von mit Änderungen einhergehenden negativen Zusatzeffekten. Darüber hinaus fehlt ein umfassender Abgleich der prognostizierten geometrischen Änderungsflexibilität von AM-Bauteilen mit deren tatsächlicher Änderungsflexibilität. Aufgrund der heute noch geringen Anzahl additiv hergestellter Bauteile in Serienfahrzeugen fehlen Daten zum Änderungsverhalten von AM-Bauteilen im PEP sowie im weiteren Lebenszyklus (etwa bei Updates oder Personalisierung). Inwieweit die Additive Fertigung das Änderungsverhalten von Bauteilen im automobilen Produktlebenszyklus tatsächlich beeinflusst, wird daher erst festzustellen sein, wenn sich die Additive Fertigung als Serienfertigungstechnologie im Automobilbau etabliert hat. Eine detailliertere Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse mit der Realität kann dann Gegenstand weiterer Forschungsaktivitäten sein.

9 Literaturverzeichnis

- Afshari et al. 2015** Afshari, Hamid & Peng, Qingjin, 2015.
Using Big Data to Minimize Uncertainty Effects in Adaptable Product Design.
Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2015, S. 1–10
- Ahmed-Kristensen et al. 2012** Ahmed-Kristensen, Saeema & Vianello, Giovanna, 2012.
A comparative study of changes across the lifecycle of complex products in a variant and a customised industry.
Journal of Engineering Design **23** (2), S. 99–117
DOI: 10.1080/09544828.2010.542133
- Albers 2007** Albers, Sönke (Hrsg.), 2007.
Methodik der empirischen Forschung. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden:
Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | d GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.
ISBN: 978-3-8349-9121-8
DOI: 10.1007/978-3-8349-9121-8
- Ambos et al. 2020** Ambos, Eberhard; Gabbert, Ulrich; Halle, Thorsten; Heikel, Christian, 2020.
Quo Vadis PKW?
Giesserei Rundschau **67** (4), S. 6–18

- Andrásfai 1991** Andrásfai, B., 1991.
Graph Theory: Flows, Matrices. Bristol: Adam Hilger.
ISBN: 9780852742228
- Armstrong 2001** Armstrong, Jon Scott (Hrsg.), 2001.
Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners. International Series in Operations Research & Management Science 30. Boston, MA: Kluwer Academic.
ISBN: 9780306476303
DOI: 10.1007/978-0-306-47630-3
- Aßmann 2000** Aßmann, Gert, 2000.
Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung, Zugl.: München, Techn. Univ., Diss, 2000. München: Utz Wiss. Produktentwicklung 38.
ISBN: 9783896757197
- Attaran 2017** Attaran, Mohsen, 2017.
The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing.
Business Horizons **60** (5), S. 677–688
DOI: 10.1016/j.bushor.2017.05.011
- Aurich et al. 2007** Aurich, Jan C. & Rößling, M., 2007.
Engineering change impact analysis in Production using VR, S. 75-82.
In: Cunha, Pedro F; Cunha, Pedro F; Maropoulos, Paul G. (Hrsg.): *Digital enterprise technology*. New York: Springer
ISBN: 978-0-387-49864-5
DOI: 10.1007/978-0-387-49864-5_8

- Babel et al. 2017** Babel, Norbert & Patzelt, Peter, 2017.
Quo vadis additive Fertigung?
ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift **119** (9), S. 78–81
DOI: 10.1007/s35148-017-0121-x
- Backhaus et al. 2015** Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Weiber, Rolf, 2015.
Fortgeschrittene Multivariate Analysemethoden. Berlin,
Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-46086-3
- Backhaus et al. 2016** Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Plinke, Wulff; Weiber,
Rolf, 2016.
Multivariate Analysemethoden. Berlin, Heidelberg:
Springer.
ISBN: 978-3-662-46075-7
- Barrot 2007** Barrot, Christian, 2007.
Prognosegütemaß, S. 417-430.
In: Albers, Sönke (Hrsg.): *Methodik der empirischen
Forschung*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage.
Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler
| d GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden
ISBN: 978-3-8349-9121-8
- Barth 2010** Barth, Daniela, 2010.
*Prognoseberichterstattung: Praxis, Determinanten und
Kapitalmarktwirkungen bei deutschen börsennotierten
Unternehmen*, Dissertation. Frankfurt am Main: Peter
lang GmbH, Internationaler Verlag der Wissenschaften

- Bauch 2020** Bauch, Lukas, 2020.
*Entwicklung eines Modells zur Prognose der
Werkzeugänderungskosten eines Bauteils: Ein Beitrag zur
Bewertung des Vorteils additiver Fertigungsverfahren bei
geometrischen Änderungen: Betreut bei BMW durch
Kratzer, Markus.*
Erlangen-Nürnberg, Friedrich-Alexander-Universität,
Masterarbeit
- Bauer et al. 2020** Bauer, Harald; Haase, Paul; Sippl, Fabian; Ramakrishnan,
Robert; Schilp, Johannes; Reinhart, Gunther, 2020.
Modular change impact analysis in factory systems.
Production Engineering **14** (4), S. 445–456
DOI: 10.1007/s11740-020-00979-4
- Baur et al. 2014** Baur, Nina & Blasius, Jörg, 2014.
Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-531-17809-7
- Becker 2010a** Becker, Hans Paul (Hrsg.), 2010.
Investition und Finanzierung. Wiesbaden: Gabler.
ISBN: 978-3-8349-2468-1
DOI: 10.1007/978-3-8349-6305-5

- Becker 2010b** Becker, Hans Paul, 2010.
Investitionsrechnung zur Beurteilung von
Sachinvestitionen, S. 41-84.
In: Becker, Hans P. (Hrsg.): *Investition und Finanzierung*.
Wiesbaden: Gabler
ISBN: 978-3-8349-2468-1
DOI: 10.1007/978-3-8349-6305-5_5
- Becker 2018** Becker, Torsten, 2018.
Lösungen zur Prozessverbesserung, S. 71-111.
In: Becker, Torsten (Hrsg.): *Prozesse in Produktion und
Supply Chain optimieren*. Berlin, Heidelberg: Springer
ISBN: 978-3-662-49074-7
DOI: 10.1007/978-3-662-49075-4_4
- Belt et al. 2015** Belt, Alex; Hagel, Kayla von; Ferguson, Scott, 2015.
Navigating redesign and market desirability implications
when considering increased product variety.
Journal of Engineering Design **26** (7-9), S. 236–258
DOI: 10.1080/09544828.2015.1024209
- Ben-Akiva et al. 1985** Ben-Akiva, Moshe Emanuel & Lerman, Steven R., 1985.
*Discrete choice analysis: Theory and application to travel
demand*. Cambridge, Massachusetts, London: The MIT
Press. MIT Press series in transportation studies 9.
ISBN: 0-262-02217-6

- Berger et al. 2017** Berger, Uwe; Hartmann, Andreas; Schmid, Dietmar, 2017.
3D-Druck - Additive Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. 2. Auflage. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel - Nourney Vollmer GmbH & Co. KG. Bibliothek des technischen Wissens.
ISBN: 978-3-8085-5034-2
- Besenfelder et al. 2019** Besenfelder, Christoph; Niehues, Stephanie; Pracht, Henriette, 2019.
Zukunftsperspektiven der Additiven Fertigung.
Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb **114** (3),
S. 134–136
DOI: 10.3139/104.111964
- Blessing et al. 2009** Blessing, Lucienne T.M. & Chakrabarti, Amaresh, 2009.
DRM, a Design Research Methodology. London: Springer.
ISBN: 978-1-84882-586-4
- BMW GROUP 2020** BMW GROUP, 2020.
Industrial-scale 3D printing continues to advance at BMW Group: Press Release.
Verfügbar unter: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0322259EN/industrial-scale-3d-printing-continues-to-advance-at-bmw-group?language=en>
Zugriff am: 13.07.2021

- BMW GROUP 2022** BMW GROUP, 2022.
Erfolgreiche Industrialisierung und Digitalisierung von Additive Manufacturing.
Verfügbar unter: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0392573DE/erfolgreiche-industrialisierung-und-digitalisierung-von-additive-manufacturing?language=de>
Zugriff am: 16.07.2022
- Bortz et al. 2006** Bortz, Jürgen & Döring, Nicola, 2006.
Qualitative Methoden, S. 295-350.
In: Bortz, Jürgen; Döring, Nicola (Hrsg.):
Forschungsmethoden und Evaluation. Springer-Lehrbuch.
Berlin, Heidelberg: Springer
ISBN: 978-3-540-33305-0
DOI: 10.1007/978-3-540-33306-7_5
- Bortz et al. 2010** Bortz, Jürgen & Schuster, Christof, 2010.
Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 7.,
vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin,
Heidelberg: Springer. Springer-Lehrbuch.
ISBN: 9783642127694
- Braess et al. 2013** Braess, Hans-Hermann & Seiffert, Ulrich (Hrsg.), 2013.
Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden:
Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-01690-6
DOI: 10.1007/978-3-658-01691-3

Bratzel 2014

Bratzel, Stefan, 2014.
Die junge Generation und das Automobil – Neue Kundenanforderungen an das Auto der Zukunft?, S. 93-108.
In: Ebel, Bernhard; Hofer, Markus B. (Hrsg.): *Automotive Management*. 2., überarb. und aktualisierte Aufl. Berlin: Springer
ISBN: 978-3-642-34067-3
DOI: 10.1007/978-3-642-34068-0_6

Braun et al. 2020

Braun, Julia; Künnemann, Stephanie; Rich, Beatrice; Mißler-Behr, Magdalena; Woll, Ralf, 2020.
Veränderung von Kundenanforderungen in der Automobilindustrie – Analyse von Experteninterviews, S. 144-161.
In: Schmitt, Robert H. (Hrsg.): *Datengetriebenes Qualitätsmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
ISBN: 978-3-662-62441-8
DOI: 10.1007/978-3-662-62442-5_9

Browning 2001

Browning, T. R., 2001.
Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions.
IEEE Transactions on Engineering Management **48** (3), S. 292–306
DOI: 10.1109/17.946528

- Buchmayr et al. 2015** Buchmayr, Bruno & Panzl, Gerhard, 2015.
Eine SWOT-Analyse zum Einsatz der Additiven Fertigung für metallische Bauteile.
BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte **160** (1), S. 15–20
DOI: 10.1007/s00501-014-0326-1
- Bullinger et al. 1995** Bullinger, Hans-Jörg; Kugel, Richard; Ohlhausen, Peter; Stanke, Alexander, 1995.
Integrierte Produktentwicklung: Zehn erfolgreiche Praxisbeispiele. Wiesbaden: Gabler.
ISBN: 13: 978-3-322-82712-8
- Bullinger et al. 2003** Bullinger, Hans-Jörg; Kiss-Prußinger, Elke; Spath, Dieter, 2003.
Automobilenwicklung in Deutschland – wie sicher in die Zukunft. Chancen, Potenziale und Handlungsempfehlungen für 30 Prozent mehr Effizienz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- Büsing 2010** Büsing, Christina, 2010.
Graphen- und Netzwerkoptimierung: Gerichtete Graphen und Turniergraphen. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
ISBN: 978-3-8274-2423-5
- Cao et al. 2012** Cao, Hui & Folan, Paul, 2012.
Product life cycle: the evolution of a paradigm and literature review from 1950–2009.
Production Planning & Control **23** (8), S. 641–662
DOI: 10.1080/09537287.2011.577460

- Carbonell-Foulquié et al. 2004** Carbonell-Foulquié, Pilar; Munuera-Alemán, Jose L; Rodríguez-Escudero, Ana I., 2004.
Criteria employed for go/no-go decisions when developing successful highly innovative products.
Industrial Marketing Management **33** (4), S. 307–316
DOI: 10.1016/S0019-8501(03)00080-4
- Chimento et al. 2011** Chimento, Jairo; Highsmith, Jason M; Crane, Nathan, 2011.
3D printed tooling for thermoforming of medical devices.
Rapid Prototyping Journal **17** (5), S. 387–392
DOI: 10.1108/13552541111156513
- Clarkson et al. 2004** Clarkson, P. John; Simons, Caroline; Eckert, Claudia, 2004.
Predicting Change Propagation in Complex Design.
Journal of Mechanical Design **126** (5), S. 788–797
DOI: 10.1115/1.1765117
- Cohen 1988** Cohen, Jacob, 1988.
Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2. Auflage. New York: Lawrence Erlbaum Associates
- Commission of European Communities 1999** *REGULATION (EEC) No 4064/89 Merger Procedure. Case No COMP/M.1406 - HYUNDAI / KIA.*
Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/m1406_en.pdf
Zugriff am: 17.03.2023
- Conrat Niemerg 1997** Conrat Niemerg, Juan-Ignacio, 1997.
Änderungskosten in der Produktentwicklung.
München, TU München, Dissertation

- Cooper 1996** Cooper, Robert G., 1996.
Overhauling the new product process.
Industrial Marketing Management **25** (6), S. 465–482
DOI: 10.1016/S0019-8501(96)00062-4
- Danilovic et al. 2005** Danilovic, Mike & Sandkull, Bengt, 2005.
The use of dependence structure matrix and domain mapping matrix in managing uncertainty in multiple project situations.
International Journal of Project Management **23** (3), S. 193–203
DOI: 10.1016/j.ijproman.2004.11.001
- Deubzer et al. 2005** Deubzer, Frank; Rock, Bernd; Kreimeyer, Matthias Lindemann, Udo, 2005.
Der Änderungsmanagement Report 2005.
CiDaD-Working Paper Series, S. 1–12
- Dombrowski et al. 2021** Dombrowski, Uwe; Krenkel, Philipp; Löffler, Carina, 2021.
Strategisches Produktionsmanagement, S. 19-87.
In: Dombrowski, Uwe; Krenkel, Philipp (Hrsg.):
Ganzheitliches Produktionsmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer
ISBN: 978-3-662-62451-7
DOI: 10.1007/978-3-662-62452-4_2
- Düchting 2005** Düchting, Carsten, 2005.
Aufbau eines freigabe- und kommunikationsbasierten Assistenzsystems im Produktentstehungsprozess.
Dortmund, Universität, Dissertation

- Duden 2023** Duden, 2023.
Methode, die.
Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Methode>
- Duncker et al. 2018** Duncker, Christian & Schütte, Lisa, 2018.
Trendbasiertes Innovationsmanagement. Wiesbaden:
Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-19870-1
- Dunn 1964** Dunn, Olive Jean, 1964.
Multiple Comparisons Using Rank Sums.
Technometrics **6** (3), S. 241–252
DOI: 10.1080/00401706.1964.10490181
- Dziallas 2020** Dziallas, Marisa, 2020.
How to evaluate innovative ideas and concepts at the front-end? A front-end perspective of the automotive innovation process.
Journal of Business Research, S. 502–518
- Eckert et al. 2001** Eckert, Claudia; Zanker, Winfried; Clarkson, PJohn, 2001.
Aspects of a better Understanding of Changes.
Proceeding of International Conference on Engineering Design ICED 01 Glasgow, August 21-23, 2001, S. 1–8
- Eckert et al. 2004** Eckert, Claudia; Clarkson, P. John; Zanker, Winfried, 2004.
Change and customisation in complex engineering domains.
Research in Engineering Design **15** (1), S. 1–21
DOI: 10.1007/s00163-003-0031-7

- Eckert et al. 2009** Eckert, Claudia; Weck, Olivier de; Keller, Rene; Clarkson, P. John, 2009.
Engineering Change: Drivers, Sources, and Approaches in industry.
International Conference on Engineering Design, ICED'09, S. 47–58
- Ehrlenspiel et al. 2014** Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo; Mörtl, Markus, 2014.
Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-642-41958-4
- Ehrlenspiel et al. 2020** Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo; Mörtl, Markus, 2020.
Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 8. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
ISBN: 978-3-662-62590-3
- Eichhorn et al. 2017** Eichhorn, Ulrich & Frank, von Buch, 2017.
Lieferantenleitfaden für Produktentwicklung.
Volkswagen AG, 1446, Konzern-Entwicklungsverbund (4), S. 1–121

- Elezi et al. 2011** Elezi, Fatos; Sharafi, Armin; Mirson, Alexander; Krcmar, Helmut; Lindemann, Udo; Wolf, Petra, 2011.
A Knowledge Discovery in Databases (KDD) Approach for Extracting Causes of Iterations in Engineering Change Orders.
ASME 2011 International Design Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering, S. 1401–1419
- Eversheim 2002** Eversheim, Walter, 2002.
Organisation in der Produktionstechnik 3: Arbeitsvorbereitung. 4., bearbeitete und korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer. VDI-Buch.
ISBN: 978-3-642-56336-2
- Eyers et al. 2018** Eyers, Daniel R; Potter, Andrew T; Gosling, Jonathan; Naim, Mohamed M., 2018.
The flexibility of industrial additive manufacturing systems.
International Journal of Operations & Production Management **38** (12), S. 2313–2343
DOI: 10.1108/IJOPM-04-2016-0200
- Fahrmeir et al. 2009** Fahrmeir, Ludwig; Kneib, Thomas; Lang, Stefan, 2009.
Regression. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-642-01836-7
- Fahrmeir et al. 2016** Fahrmeir, Ludwig; Heumann, Christian; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; Tutz, Gerhard, 2016.
Statistik. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-50371-3

- Feldhusen et al. 2013a** Feldhusen, Jörg & Grote, Karl-Heinrich, 2013.
Der Produktentstehungsprozess (PEP), S. 11-24.
In: Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.):
Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg:
Springer
ISBN: 978-3-642-29568-3
DOI: 10.1007/978-3-642-29569-0_2
- Feldhusen et al. 2013b** Feldhusen, Jörg & Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.), 2013.
Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg:
Springer.
ISBN: 978-3-642-29568-3
DOI: 10.1007/978-3-642-29569-0
- Feldinger 2018** Feldinger, Ulrich, 2018.
Fahrzeugdesign und Produktentstehung, S. 7-29.
In: Feldinger, Ulrich (Hrsg.): *Hybride Modellnutzung in der
automotiven Formfindung*. Wiesbaden: Springer
Fachmedien
ISBN: 978-3-658-23451-5
DOI: 10.1007/978-3-658-23452-2_2
- Feldmann et al. 2016** Feldmann, Carsten & Pumpe, Andreas, 2016.
3D-Druck – Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-15195-9

- Fricke et al. 2000** Fricke, Ernst; Gebhard, Bernd; Negele, Herbert; Igenbergs, Eduard, 2000.
Coping with changes: Causes, findings, and strategies.
Systems Engineering **3** (4), S. 169–179
DOI: 10.1002/1520-6858(2000)3:4<169:AID-SYS1>3.0.CO;2-W
- Fritz et al. 2018** Fritz, Alfred Herbert; Schmütz, Jörg; Wieneke-Toutaoui, Burghilde, 2018.
Urformen, S. 7-132.
In: Fritz, Alfred H. (Hrsg.): *Fertigungstechnik*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer
ISBN: 978-3-662-56534-6
DOI: 10.1007/978-3-662-56535-3_2
- Gandhi et al. 2013** Gandhi, Anshuk; Magar, Carmen; Roberts, Roger, 2013.
How technology can drive the next wave of mass customization.
McKinsey & Company, S. 2–9
- Gausemeier 2006** Gausemeier, Jürgen (Hrsg.), 2006.
Vernetzte Produktentwicklung: Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking. München: Hanser.
ISBN: 978-3446227255
- Gebhardt 2016** Gebhardt, Andreas, 2016.
Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser.
ISBN: 9783446445390

- Gebhardt 2018** Gebhardt, Marcel, 2018.
Kostenkalkulation im Kontext technischer Produktänderungen: Entwicklung und Evaluation eines kausalanalytischen Ansatzes zur Prognose indirekter Änderungskosten: - Eine Untersuchung kundeninduzierter technischer Produktänderungen am Beispiel eines Unternehmens aus der automotiven Antriebstechnik -.
Ulm, Universität Ulm, Dissertation
- Gebhardt et al. 2018** Gebhardt, Marcel & Schmied, Christian, 2018.
Aufwandsarme Quantifizierung von indirekten Änderungskosten in der Antriebstechnik
- Gemmerich 1995** Gemmerich, Marcus (Hrsg.), 1995.
Technische Produktänderungen: Betriebswirtschaftliche und empirische Modellanalyse. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
ISBN: 978-3-8244-6242-1
DOI: 10.1007/978-3-663-09030-4
- Geschka 1993** Geschka, Horst, 1993.
Wettbewerbsfaktor Zeit: Beschleunigung von Innovationsprozessen. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie.
ISBN: 3-478-32050-X
- Giancristofaro et al. 2003** Giancristofaro, R. Arboretti. & Salmaso, L., 2003.
Model performance analysis and model validation in logistic regression.
STATISTICA, (2), S. 375-396

- Gibson et al. 2015** Gibson, Ian; Rosen, David; Stucker, Brent (Hrsg.), 2015.
Additive Manufacturing Technologies. New York:
Springer.
ISBN: 978-1-4939-2112-6
- Gille 2013** Gille, Christian, 2013.
*Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider
Produkte*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-02693-6
- Gourav et al. 2017** Gourav, Dwivedi & Samir, K Srivastava and Rajiv K.
Srivastava, 2017.
Analysis of barriers to implement additive manufacturing
technology in the Indian automotive sector.
*International Journal of Physical Distribution & Logistics
Management* **47** (10), S. 972–991
- Grösser 2017** Grösser, Stefan N., 2017.
Complexity Management and System Dynamics Thinking,
S. 69-92.
In: Grösser, Stefan N; Reyes-Lecuona, Arcadio; Granholm,
Göran (Hrsg.): *Dynamics of Long-Life Assets*. Cham:
Springer International Publishing
ISBN: 978-3-319-45437-5
DOI: 10.1007/978-3-319-45438-2_5
- Großklaus 2014** Großklaus, Rainer H. G., 2014.
*Von der Produktidee zum Markterfolg: Innovationen
planen, einführen und erfolgreich managen*. 2., Aufl.
Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler.
ISBN: 978-3-8349-4593-8

- Guba et al. 1994** Guba, Egon G. & Lincoln Yvonna S., 1994.
Competing Paradigms in Qualitative Research, S. 105-117.
In: Denzin, Norman K; Lincoln, Yvonna S. (Hrsg.):
Handbook of qualitative research. Thousand Oaks: Sage
Publications
ISBN: 0-80394-679-1
- Hamraz et al. 2013a** Hamraz, Bahram; Caldwell, Nicholas H. M; Clarkson, P.
John, 2013.
A Holistic Categorization Framework for Literature on
Engineering Change Management.
Systems Engineering **16** (4), S. 473–505
DOI: 10.1002/sys.21244
- Hamraz et al. 2013b** Hamraz, Bahram; Caldwell, N. H. M; Clarkson, P. J., 2013.
A Matrix-Calculation-Based Algorithm for Numerical
Change Propagation.
IEEM Transaction on Engineering Management **60** (1),
S. 186–198
- Hamraz et al. 2015** Hamraz, Bahram & Clarkson, P. John, 2015.
Industrial evaluation of FBS Linkage – a method to
support engineering change management.
Journal of Engineering Design **26** (1-3), S. 24–47
DOI: 10.1080/09544828.2015.1015783
- Hartschen et al. 2009** Hartschen, Michael; Scherer, Jiri; Brügger, Chris, 2009.
*Innovationsmanagement: Die 6 Phasen von der Idee zur
Umsetzung*. 1. Aufl. Offenbach am Main: GABAL.
ISBN: 9783869360157

Hastie et al. 2009

Hastie, Trevor; Tibshirani, Robert; Friedman, Jerome H., 2009.

The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. Second edition. New York: Springer.

ISBN: 978-0-387-84858-7

Hausenblas 2018

Hausenblas, Erika, 2018.

Mathematische Konzepte aus der Risikoanalyse, Montanuniversität Leoben, Skript.

Verfügbar unter: https://angemath.unileoben.ac.at/fileadmin/shares/amat/docs/Risikoanalyse/skript_hausenblas_risikotheorie.pdf

Zugriff am: 17.03.2023

Heindorf 2010

Heindorf, Viktoria, 2010.

Der Einsatz moderner Informationstechnologien in der Automobilproduktentwicklung: Produktivitätspotenziale und Systemkomplementaritäten. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.

ISBN: 978-3-8349-2454-4

Heine 2017

Heine, Tobias, 2017.

Additive Manufacturing als Baustein zur gestaltungsgerechten Produktentwicklung in der Fahrzeugelektronik am Beispiel automobiler Zugangssysteme, S. 175-194.

In: Lachmayer, Roland; Lippert, Rene B. (Hrsg.): *Additive Manufacturing Quantifiziert.* Berlin, Heidelberg: Springer

ISBN: 978-3-662-54112-8

DOI: 10.1007/978-3-662-54113-5_12

- Helling 2009** Helling, Hauke, 2009.
Konzept eines integrierten Produkt- und Prozessmodells zur effizienten Steuerung der Entwicklungsreife am Beispiel der Automobilentwicklung.
Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Dissertation
- Hinojos A et al. 2020** Hinojos A, Luis F; Iakymenko, Natalia; Alfnes, Erlend, 2020.
Engineering Changes in the Engineer-to-Order Industry: Challenges of Implementation, S. 662-670.
In: Wang, Yi et al. (Hrsg.): *Advanced Manufacturing and Automation IX*, 634. Singapore: Springer
- Homburg 2017** Homburg, Christian, 2017.
Marketingmanagement. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-13655-0
- Hu 2013** Hu, S. Jack, 2013.
Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization.
Procedia CIRP **7**, S. 3–8
DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.002
- Huang et al. 1999** Huang, G. Q. & Mak, K. L., 1999.
Current practices of engineering change management in UK manufacturing industries.
International Journal of Operations & Production Management **19** (1), S. 21–37
DOI: 10.1108/01443579910244205

- Huang et al. 2003** Huang, G.Q; Yee, W.Y; Mak, K.L, 2003.
Current practice of engineering change management in
Hong Kong manufacturing industries.
Journal of Materials Processing Technology **139** (1-3),
S. 481–487
DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00524-7
- Huang et al. 2015** Huang, Yong; Leu, Ming C; Mazumder, Jyoti; Donmez,
Alkan, 2015.
Additive Manufacturing: Current State, Future Potential,
Gaps and Needs, and Recommendations.
Journal of Manufacturing Science and Engineering **137**
(1), S. 1–10
DOI: 10.1115/1.4028725
- IBM Cloud Education 2020** IBM Cloud Education, 2020.
Monte-Carlo-Simulation.
Verfügbar unter: [https://www.ibm.com/de-de/cloud/
learn/monte-carlo-simulation](https://www.ibm.com/de-de/cloud/learn/monte-carlo-simulation)
Zugriff am: 18.01.2022
- Jacqueline O 2018** Jacqueline O, 2018.
Altair Enlighten Award für den BMW i8 Roadster.
Verfügbar unter: [https://www.3dnatives.com/de/altair-
enlighten-award-2018-220820181/](https://www.3dnatives.com/de/altair-enlighten-award-2018-220820181/)
Zugriff am: 10.08.2021

- Jania 2004** Jania, Thilo, 2004.
Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Paderborn: Universitätsbibliothek
- Jarratt et al. 2005** Jarratt, Timothy; Clarkson, J; Eckert, Claudia, 2005.
Engineering change, S. 262-285.
In: Clarkson, P. J; Eckert, C. M. (Hrsg.): *Design Process Improvement*. London: Springer
- Jarratt et al. 2011** Jarratt, T. A. W; Eckert, C. M; Caldwell, N. H. M; Clarkson, P. J., 2011.
Engineering change: an overview and perspective on the literature.
Research in Engineering Design **22** (2), S. 103–124
DOI: 10.1007/s00163-010-0097-y
- Jockisch et al. 2009** Jockisch, Maike & Rosendahl, Jens, 2009.
Klassifikation von Modellen.
In: Bandow, Gerhard; Holzmüller, Hartmut H. (Hrsg.): *„Das ist gar kein Modell!“*. Springer eBook Collection Business and Economics. Wiesbaden: Gabler
ISBN: 978-3-8349-1842-0
- Kampker et al. 2017a** Kampker, Achim; Gerdes, Jürgen; Schuh, Günther (Hrsg.), 2017.
Think Big, Start Small. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-54981-0
DOI: 10.1007/978-3-662-54997-1

- Kampker et al. 2017b** Kampker, Achim; Gerdes, Jürgen; Schuh, Günther, 2017.
Die Street Scooter-Lösungsbausteine, S. 105-141.
In: Kampker, Achim; Gerdes, Jürgen; Schuh, Günther
(Hrsg.): *Think Big, Start Small*. Berlin, Heidelberg: Springer
ISBN: 978-3-662-54981-0
DOI: 10.1007/978-3-662-54997-1_6
- Kernschmidt et al. 2014** Kernschmidt, Konstantin; Behncke, Florian; Chucholowski,
Nepomuk; Wickel, Martina; Bayrak, Gülden; Lindemann,
Udo; Vogel-Heuser, Birgit, 2014.
An Integrated Approach to Analyze Change-situations in
the Development of Production Systems.
Procedia CIRP **17**, S. 148–153
DOI: 10.1016/j.procir.2014.01.081
- Keskin et al. 2017** Keskin, Fatma Demircan; Ventura, Kati; Soyuer, Haluk;
Kabasakal, Inanc, 2017.
From mass customization to product personalization in
automotive industry: potentials of industry 4.0.
Journal of Management, Marketing and Logistics **4** (3),
S. 244–250
DOI: 10.17261/Pressacademia.2017.486
- Koch 2009** Koch, Jörg, 2009.
*Marktforschung: Grundlagen und praktische
Anwendungen*. 5., überarb. und erw. Aufl. München:
Oldenbourg. Managementwissen für Studium und Praxis.
ISBN: 978-3-486-58765-4

-
- Koch 2017** Koch, Eckart, 2017.
Globalisierung: Wirtschaft und Politik. Wiesbaden:
Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-08706-7
- Koh et al. 2013** Koh, Edwin C.Y; Caldwell, Nicholas H.M; Clarkson, P. John,
2013.
A technique to assess the changeability of complex
engineering systems.
Journal of Engineering Design **24** (7), S. 477–498
DOI: 10.1080/09544828.2013.769207
- Köhler 2009** Köhler, Christian, 2009.
*Technische Produktänderungen: Analyse und Beurteilung
von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des
CPM/PDD-Ansatzes*.
Saarbrücken, Universität Saarbrücken, Dissertation
- Koren et al. 2015** Koren, Y; Shpitalni, M; Gu, P; Hu, S. J., 2015.
Product Design for Mass-Individualization.
Procedia CIRP **36**, S. 64–71
DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.050
- KPMG 2019** KPMG, 2019.
Global Automotive Executive Survey 1019.
KPMG's 20th consecutive, S. 1–25

- Kratzer et al. 2021a** Kratzer, Markus J; Meyer, Julian; Hoefler, Florian; Urban, Nikolaus, 2021.
Decision Support System for a metal additive manufacturing process chain design for the automotive Industry, S. 470-482.
In: Meboldt, Mirko (Hrsg.): *Industrializing Additive Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing AG
ISBN: 978-3-030-54334-1
- Kratzer et al. 2021b** Kratzer, Markus; Buchner, Christoph; Kübler, Patrick; Szost, Blanka; Bauernhansl, Thomas, 2021.
Methode zur zeitpunktabhängigen Prognose von Änderungsaufwänden.
Die zeitpunktabhängige Prognose von Änderungsaufwänden bei technischen Bauteiländerungen.
WT Werkstattstechnik (5), S. 327–335
- Kratzer et al. 2022** Kratzer, Markus. J; Bauch, Lukas; Burkert, Torsten; Szost, Blanka; Bauernhansl, Thomas; Kratzer, M. J; Bauch, L; Burkert, T; Szost, B; Bauernhansl, T., 2022.
Reasons for Engineering Changes Affecting Part-specific Tools: An Investigation in the Automotive Industry.
2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), S. 477-481
DOI: 10.1109/IEEM50564.2021.9672777

- Kröger et al. 2019** Kröger, Harald; Bauer, Harald; Reinhart, Gunther, 2019.
Kostenstruktur zur Bewertung von Änderungsauswirkung
in der Produktion.
ZWF **114** (9), S. 1–7
DOI: 10.1109/SysEng.2017.8088301
- Kubicek 1977** Kubicek, Herbert, 1977.
Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte
Forschungsdesign als Elemente einer
Konstruktionsstrategie empirischer Forschung, S. 3-36.
In: Köhler, R. (Hrsg.): *Empirische und
handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der
Betriebswirtschaftslehre*. Stuttgart: C. E. Poeschel
- Kuckartz et al. 2008** Kuckartz, Udo; Dresing, Thorsten; Rädiker, Stefan; Stefer,
Claus, 2008.
*Qualitative Evaluation: Der Einstieg in die Praxis. 2.,
aktualisierte Auflage*. Wiesbaden: VS Verlag für
Sozialwissenschaften.
ISBN: 978-3-531-15903-4
- Kulkarni et al. 1986** Kulkarni, V. G. & Adlakha, V. G., 1986.
Markov and Markov-Regenerative pert Networks.
Operations Research **34** (5), S. 769–781
DOI: 10.1287/opre.34.5.769
- Kumke 2018** Kumke, Martin, 2018.
*Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten
Bauteilen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-22208-6

- Lachmayer et al. 2020** Lachmayer, Roland & Lippert, René Bastian, 2020.
Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-59788-0
- Langer et al. 2012** Langer, Stefan; Wilberg, Julian; Maier, Anja; Lindemann, Udo, 2012.
Änderungsmanagement-Report 2012: Studienergebnisse zu Ursachen und Auswirkungen, aktuellen Praktiken, Herausforderungen und Strategien in Deutschland.
Technische Universität München, S. 1–46
- Leopold-Wildburger et al. 2009** Leopold-Wildburger, Ulrike; Becker, Otwin; Kuehrer, Martin, 2009.
Forecasting, S. 1068-1074.
In: Floudas, Christodoulos A; Pardalos, Panos M. (Hrsg.):
Encyclopedia of Optimization. Boston, MA: Springer US
ISBN: 978-0-387-74758-3
DOI: 10.1007/978-0-387-74759-0_186
- Levitt 1965** Levitt, Theodore, 1965.
Exploit the Product Life Cycle.
Harvard Business Review, S. 1–28
- Li 2012** Li, Weilin, 2012.
Modeling and Managing Engineering Changes in a Complex Product Development Process, Syracuse University, Dissertation

- Lilliefors 1967** Lilliefors, Hubert W., 1967.
On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with
Mean and Variance Unknown.
Journal of the American Statistical Association **62** (318),
S. 399–402
DOI: 10.1080/01621459.1967.10482916
- Lindemann et al. 2007** Lindemann, Udo & Maurer, Maik, 2007.
Facing Multi-Domain Complexity in Product
Development, S. 351-361.
In: Krause, Frank-Lothar (Hrsg.): *The Future of Product
Development*. Berlin, Heidelberg: Springer
ISBN: 978-3-540-69819-7
DOI: 10.1007/978-3-540-69820-3_35
- Lindemann et al. 2009** Lindemann, Udo; Maurer, Maik; Braun, Thomas, 2009.
*Structural complexity management: An approach for the
field of product design*. Berlin: Springer.
ISBN: 9783540878889
- Lindemann et al. 2012** Lindemann, Christian; Jahnke, Ulrich; Moi, Matthias.
Koch, Rainer, 2012.
Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better
Understanding of Cost Drivers in additive Manufacturing.
*2012 International Solid Freeform Fabrication Symposium,
University of Texas at Austin.*, S. 177–188
- Magerhans 2016** Magerhans, Alexander, 2016.
Marktforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-00890-1

- Malak et al. 2013** Malak, René. C. & Aurich, Jan. C., 2013.
Software Tool for Planning and Analyzing Engineering
Changes in Manufacturing Systems.
Procedia CIRP **12**, S. 348–353
DOI: 10.1016/j.procir.2013.09.060
- Malcolm 1959** Malcolm, 1959.
Application of a Technique for Research and
Development Program Evaluation.
Operations Research **7** (5), S. 646–669
DOI: 10.1287/opre.7.5.646
- Martens 2008** Martens, Bernd, 2008.
Fahrzeuganlaufmanagement bei Volkswagen am Beispiel
des VW Tiguan.
In: Schuh, Günther (Hrsg.): *Anlaufmanagement in der
Automobilindustrie erfolgreich umsetzen*. VDI-Buch.
Berlin: Springer
ISBN: 978-3-540-78407-4
- Massey 1951** Massey, Frank J., 1951.
The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit.
Journal of the American Statistical Association **46** (253),
S. 68–78
DOI: 10.1080/01621459.1951.10500769
- Maurer 2007** Maurer, Maik S., 2007.
Structural awareness in complex product design, Zugl.:
München, Techn. Univ., Diss., 2007. 1. Aufl. München:
Verl. Dr. Hut. Produktentwicklung.
ISBN: 9783899636321

- Mayring 1994** Mayring, Philipp, 1994.
Qualitative Inhaltsanalyse, S. 159-175.
In: Boehm, Andreas (Hrsg.): *Texte verstehen*. Schriften zur Informationswissenschaft, 14. Konstanz: Univ.-Verl.
ISBN: 3-87940-503-4
- McKinsey 2016** McKinsey, 2016.
Automotive Revolution — Perspective towards 2030.
Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/disruptive-trends-that-will-transform-the-auto-industry/de-DE>
Zugriff am: 17.03.2023
- McKnight et al. 2010** McKnight, Patrick E. & Najab, Julius, 2010.
Kruskal-Wallis Test.
The Concise Corsini Encyclopedia of Psychology and Behavioral Science **1** (1), S. 1–10
- Mehta 2010** Mehta, Chandresh R., 2010.
Knowledge-based Methods for Evaluation of Engineering Changes, University of Michigan, Dissertation
- Milling et al. 2008** Milling, Peter & Jürging, Jan, 2008.
Der Serienanlauf in der Automobilindustrie: Technische Änderungen als Ursache oder Symptom von Anlaufschwierigkeiten?, S. 67-82.
In: Himpel, Frank (Hrsg.): *Spektrum des Produktions- und Innovationsmanagements*. Gabler Edition Wissenschaft.
1. Aufl. Wiesbaden: Gabler
ISBN: 978-3-8350-0894-6

- Möhrle 2018** Möhrle, Markus, 2018.
Gestaltung von Fabrikstrukturen für die additive Fertigung. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-57706-6
- Montgomery 2011** Montgomery, Douglas C., 2011.
Applied statistics and probability for engineers. 5th ed.
Hoboken, NJ: Wiley.
ISBN: 978-0-470-05304-1
- Moore 1959** Moore, Edward. F., 1959.
The shortest path through a maze.
Proceedings of the International Symposium on Theory of Switchin (Part 2), S. 285–292
- Morche et al. 2018** Morche, Dirk; Schmitt, Fabian; Genuit, Klaus; Elsen, Olaf; Kampker, Achim; Deutskens, Christoph; Heimes, Heiner Hans; Swist, Mateusz; Maue, Andreas; vom Hemdt, Ansgar; Lienemann, Christoph; Haunreiter, Andreas; Wessel, Saskia; Hollah, Ansgar; Friedrich, Bernd; Vest, Matthias; Georgi-Maschler, Tim; Honggang, Wang, 2018.
Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität, S. 181-277.
In: Kampker, Achim; Vallée, Dirk; Schnettler, Armin (Hrsg.): *Elektromobilität*. Berlin, Heidelberg: Springer
ISBN: 978-3-662-53136-5
DOI: 10.1007/978-3-662-53137-2_5

- Müller-Gronbach et al. 2012** Müller-Gronbach, Thomas; Novak, Erich; Ritter, Klaus (Hrsg.), 2012.
Monte Carlo-Algorithmen. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-540-89140-6
DOI: 10.1007/978-3-540-89141-3
- Müller-Stewens et al. 2010** Müller-Stewens, Günter & Müller, Adrian, 2010.
Strategic Foresight – Trend- und Zukunftsforschung als Strategieinstrument, S. 239-257.
In: Reimer, Marko; Fiege, Stefanie (Hrsg.): *Perspektiven des Strategischen Controllings*. Wiesbaden: Gabler
ISBN: 978-3-8349-1611-2
DOI: 10.1007/978-3-8349-8805-8_15
- Mun 2008** Mun, Johnathan, 2008.
Advanced analytical models: Over 800 models and 300 applications from the basel II accord to wall street and beyond. Hoboken, NJ: Wiley. Wiley finance series.
ISBN: 978-0470179215
- Nagel 2003** Nagel, Herbert, 2003.
Empirische Sozialforschung.
Verfügbar unter: https://statmath.wu.ac.at/people/hatz/efe/theorie/esf_nagel.pdf
Zugriff am: 12.03.2023
- Nahmias et al. 2015** Nahmias, Steven & Olsen, Tava L., 2015.
Production and operations analysis. 7. ed. Long Grove, Ill.: Waveland Pr.
ISBN: 978-1-4786-2306-9

-
- Nahrstedt 2015** Nahrstedt, Harald (Hrsg.), 2015.
Die Monte-Carlo-Methode. essentials. Wiesbaden:
Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-10148-0
DOI: 10.1007/978-3-658-10149-7
- Naunheimer et al. 2019a** Naunheimer, Harald; Bertsche, Bernd; Ryborz, Joachim;
Novak, Wolfgang; Fietkau, Peter (Hrsg.), 2019.
Fahrzeuggetriebe. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-58882-6
DOI: 10.1007/978-3-662-58883-3
- Naunheimer et al. 2019b** Naunheimer, Harald; Bertsche, Bernd; Ryborz, Joachim;
Novak, Wolfgang; Fietkau, Peter, 2019.
Produktentstehungsprozess bei Fahrzeuggetrieben,
S. 717-752.
In: Naunheimer, Harald et al. (Hrsg.): *Fahrzeuggetriebe.*
Berlin, Heidelberg: Springer
ISBN: 978-3-662-58882-6
DOI: 10.1007/978-3-662-58883-3_14
- Neuhausen 2001** Neuhausen, Jörn, 2001.
*Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme
für Unternehmen der Serienproduktion.*
RWTH Aachen, Universitätsbibliothek
- Norm DIN 6789** DIN 6789:2013-10.
*Dokumentationssystematik_Verfälschungssicherheit und
Qualitätskriterien für die Freigabe digitaler Produktdaten.*

-
- Norm DIN 6789-3** DIN 6789-3:2013-10.
Dokumentationssystematik – Änderungen von Dokumenten und Gegenständen, Allgemeine Anforderungen.
- Norm DIN 69901-5** DIN 69901-5:2009-01.
Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5: Begriffe.
- Norm DIN 8580** DIN 8580:2003-9.
Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung
- Norm DIN EN ISO 10209** DIN EN ISO 10209:2012-11.
Technische Produktdokumentation – Vokabular –: Begriffe für technische Zeichnungen, Produktdefinition und verwandte Dokumentation (ISO 10209:2012);
- Norm ISO/ASTM 52900** ISO/ASTM 52900:2021-11.
Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary.
- Object Management Group 2021** OBJECT MANAGEMENT GROUP 2021.
Object Management Group: Systems Modeling Language. What is OMG SysML.
Verfügbar unter: <https://www.omg.sysml.org/what-is-sysml.htm>
Zugriff am: 13.12.2021
- Olmez 2021** Olmez, Hatice, 2021.
Designing Resilient Manufacturing Systems In the Presence of Change. Cambridge: University Library
DOI: 10.17863/CAM.74334

- Ostertagová et al. 2014** Ostertagová, Eva; Ostertag, Oskar; Kováč, Jozef, 2014.
Methodology and Application of the Kruskal-Wallis Test.
Applied Mechanics and Materials **611**, S. 115–120
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.611.115
- Patzak 1982** Patzak, Gerold, 1982.
*Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme:
Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin: Springer.
ISBN: 978-3-540-11783-4
- Picot et al. 2020** Picot, Arnold; Reichwald, Ralf; Wigand, Rolf T; Möslein,
Kathrin M; Neuburger, Rahild; Neyer, Anne-Katrin, 2020.
Information, Organisation und Management – Auf dem
Weg zur grenzenlosen Unternehmung, S. 1-10.
In: Picot, Arnold et al. (Hrsg.): *Die grenzenlose
Unternehmung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien
ISBN: 978-3-658-28564-7
DOI: 10.1007/978-3-658-28565-4_1
- Plehn 2017** Plehn, Christian, 2017.
*A method for analyzing the impact of changes and their
propagation in manufacturing systems*, Dissertation.
München: Herbert Utz Verlag. Forschungsberichte IWB
Band 333.
ISBN: 978-3-8316-4695-1

-
- Plehn et al. 2016** Plehn, Christian; Stein, Florian; Neufville, Richard de; Reinhart, Gunther, 2016.
Assessing the Impact of Changes and their Knock-on Effects in Manufacturing Systems.
Procedia CIRP **57**, S. 479–486
DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.083
- Pleschak et al. 1996** Pleschak, Franz & Sabisch, Helmut, 1996.
Innovationsmanagement. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
UTB für Wissenschaft Betriebswirtschaftslehre.
ISBN: 978-3825281229
- Popper 1959** Popper, Karl, 1959.
The Logic of Scientific Discovery. 2nd ed. Hoboken: Taylor and Francis. Routledge Classics.
ISBN: 9780415278430
- Popper 1962** Popper, Karl, 1962.
Die Logik der Sozialwissenschaften, S. 233-248.
In: *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozial-Psychologie*:
Westdeutscher Verlag
DOI: 10.1007/s11577-017-0425-6
- Porter 1985** Porter, Michael Eugene, 1985.
Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance. New York: Free Press.
ISBN: 0-02-925090-0

-
- Prakash et al. 2018** Prakash, K. Satish; Nancharaih, T; Rao, V. SubbaV., 2018.
Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An
Overview.
Materials Today: Proceedings **5** (2), S. 3873–3882
DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.642
- PWC 2018** PWC, 2018.
Five trends transforming the Automotive Industry.
PricewaterhouseCoopers GmbH, S. 1–48
- Rabe et al. 2008** Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid, 2008.
*Verifikation und Validierung für die Simulation in
Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und
Techniken*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-540-35281-5
- Raubold 2011** Raubold, Ulrich (Hrsg.), 2011.
Lebenszyklusmanagement in der Automobilindustrie.
Wiesbaden: Gabler.
ISBN: 978-3-8349-2862-7
DOI: 10.1007/978-3-8349-6613-1
- Rebentisch et al. 2016** Rebentisch, Eric; Schuh, Günther; Riesener, Michael;
Breunig, Stefan; Pott, Alexander; Sinha, Kaushik, 2016.
Assessment of Changes in Technical Systems and their
Effects on Cost and Duration based on Structural
Complexity.
Procedia CIRP **55**, S. 35–40
DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.033

-
- Rebentisch et al. 2017** Rebentisch, Eric; Hoensbroech, Ferdinand; Schuh, Günther, 2017.
ASSESSMENT OF CHANGES IN ENGINEERING DESIGN USING CHANGE PROPAGATION COST ANALYSIS.
21st International Conference on Engineering Design, S. 69–78
- Reichenbach 1930** Reichenbach, Hans, 1930.
Kausalität und Wahrscheinlichkeit.
Erkenntnis - An International Journal of Scientific Philosophy **1** (1), S. 158–188
- Reichwald et al. 2012** Reichwald, Ralf & Lindemann, Udo, 2012.
Integriertes Änderungsmanagement. Softcover reprint of the hardcover 1st ed. 1998. Berlin: Springer.
ISBN: 978-3-642-71958-5
- Rencher 2002** Rencher, Alvin C., 2002.
Methods of multivariate analysis. 2nd ed. New York: J. Wiley. Wiley series in probability and mathematical statistics.
ISBN: 0471418897
- Rennemann 2007** Rennemann, Thomas, 2007.
Logistische Lieferantenauswahl in globalen Produktionsnetzwerken: Rahmenbedingungen, Aufbau und Praxisanwendung eines kennzahlenbasierten Entscheidungsmodells am Beispiel der Automobilindustrie, Zugl.: Eichstätt, Univ., Diss., 2007. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. Gabler Edition Wissenschaft.
ISBN: 9783835008588

- Rickenbacher et al. 2013** Rickenbacher, L; Spierings, Adriaan; Wegener, Konrad, 2013.
An integrated cost-model for SLM.
Rapid Prototyping Journal **19** (3), S. 208–214
DOI: 10.1108/13552541311312201
- Riesenhuber 2007** Riesenhuber, Felix, 2007.
Großzählige empirische Forschung, S. 1-16.
In: Albers, Sönke (Hrsg.): *Methodik der empirischen Forschung*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage.
Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler
|d GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden
ISBN: 978-3-8349-9121-8
- Roland Berger 2017** Roland Berger, 2017.
Automotive Disruption Radar: Tracking disruption signals in the automotive industry.
Verfügbar unter: <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Automotive-Disruption-Radar.html>
Zugriff am: 12.03.2023
- Rosen 2012** Rosen, Kenneth H., 2012.
Discrete mathematics and its applications. 7th ed. New York: McGraw-Hill.
ISBN: 0073383090
- Rouibah et al. 2003** Rouibah, Kamel & Caskey, Kevin, R., 2003.
Change management in concurrent engineering from a parameter perspective.
Computers in Industry **50**, S. 14–34

-
- Rudert et al. 2015** Rudert, Steffen & Trumpfheller, Jens, 2015.
Vollumfänglich durchdacht - Der
Produktentstehungsprozess.
Porsche Engineering Magazin, S. 10–13
- Ruffo et al. 2007** Ruffo, M. & Hague, R.J.M, 2007.
Cost estimation for rapid manufacturing - simultaneous
production of mixed components using laser sintering.
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,
S. 1585-1291
- Sabadka et al. 2019** Sabadka, Dušan; Molnár, Vierošlav; Fedorko, Gabriel,
2019.
Shortening of Life Cycle and Complexity Impact on the
Automotive Industry.
TEM Journal **8** (4), S. 1295–1301
DOI: 10.18421/TEM84-27
- Sarvankar et al. 2019** Sarvankar, Shruti Garnesh & Yewale, Sankret Nandaram,
2019.
Additive Manufacturing in Automobile Industr.
*INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH IN
AERONAUTICAL AND MECHANICAL ENGINEERING* **7** (4),
S. 1–10
- SASIG 2010** VDA 4965 V2.0:2010-01.
*White Paper Engineering Change Management Reference
Process.*

Schedlbauer 2008

Schedlbauer, Michael, 2008.
Adaptive Logistikplanung auf Basis eines standardisierten, prozessorientierten Bausteinkonzepts, Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2008. Garching b. München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml).
ISBN: 9783981181975

Schlink 2017

Schlink, Haiko, 2017.
Kalkulation der Produktkosten für eine kostenorientierte Entwicklung (einperiodige Rechnung), S. 123-259.
In: Schlink, Haiko (Hrsg.): *Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Fachmedien
ISBN: 978-3-658-13949-0
DOI: 10.1007/978-3-658-13950-6_2

Schmidt 2016

Schmidt, Tobias, 2016.
Potentialbewertung generativer Fertigungsverfahren für Leichtbauteile. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-52995-9

Schneider 2008

Schneider, Markus, 2008.
Logistikplanung in der Automobilindustrie: Konzeption eines Instruments zur Unterstützung der taktischen Logistikplanung vor "Start-of-Production" im Rahmen der Digitalen Fabrik, Zugl.: Regensburg, Univ., Diss., 2008.
Wiesbaden: Gabler Verlag.
ISBN: 978-3-834-99900-9

- Scholz et al. 2018** Scholz, Ulrich; Pastoors, Sven; Becker, Joachim H; Hofmann, Daniela; van Dun, Rob, 2018.
Praxishandbuch Nachhaltige Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN: 978-3-662-57319-8
- Schreiner 2012** Schreiner, Martin, 2012.
Stochastische Modellierung des Gewährleistungsrisikos in der Automobilzulieferindustrie.
Graz, Digital Library Technische Universität, Dissertation
- Schrieverhoff P. et al. 2014** Schrieverhoff P; de Neufville R; Lindemann U., 2014.
Valuation of Product Adaptability in Architecture Design.
International Disgn Conference - Design 2014, S. 373–383
- Schuh et al. 2018** Schuh, Günther & Riesener, Michael, 2018.
Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools. 3., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser.
ISBN: 978-3-446-45225-1
- Schuh et al. 2021a** Schuh, Günther; Guetzlaff, Andreas; Sauermann, Frederick; Krug, Marius, 2021.
Data-based improvement of engineering change impact analyses in manufacturing.
Procedia CIRP **99**, S. 580–585
DOI: 10.1016/j.procir.2021.03.079
- Schuh et al. 2021b** Schuh, Günther & Dölle, Christian, 2021.
Sustainable Innovation: Nachhaltig Werte schaffen. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
ISBN: 978-3-662-61910-0

- Schulz 2014** Schulz, Matthias, 2014.
Logistikintegrierte Produktentwicklung. Wiesbaden:
Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-04926-3
- Schulz et al. 1999** Schulz, Armin P. & Fricke, Ernst, 1999.
Incorporating Flexibility, Agility, Robustness, And
Integrated Systems - Key To Success? ADAPTABILITY
WITHIN THE DESIGN OF.
IEEE - 18th Digital Avionics Systems Conference, S. 1–8
- Schumacher 2022** Schumacher, Felix Jochen, 2022.
*Methodische Identifikation und Entwicklung von
Automobilkomponenten für die additive Serienfertigung*,
Dissertation. Braunschweig: Universitätsbibliothek
DOI: 10.24355/dbbs.084-202203231507-0
- Seifert 2021** Seifert, Philipp, 2021.
*Einfluss der additiven Fertigung auf den
Produktlebenszyklus am Beispiel des Automobilbaus der
BMW Group: Betreut bei BMW durch Kratzer, Markus*,
RWTH Aachen, Masterarbeit
- Shanker et al. 2012** Shanker, Prabhu; Mokos, Beshoy; Summers, Joshua D.,
2012.
Reasons for Change Propagation: a case study in an
automotive OEM.
*Clemson Engineering Design Applications and Research
(CEDAR) (4)*, S. 1–24

- Sharafi 2013** Sharafi, Armin, 2013.
Knowledge Discovery in Databases. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-02001-9
- Siddiqi et al. 2011** Siddiqi, Afreen; Bounova, Gergana; Weck, Olivier L. de; Keller, Rene; Robinson, Bob, 2011.
A Posteriori Design Change Analysis for Complex Engineering Projects.
Journal of Mechanical Design **133**, S. 1–11
- Sipl et al. 2021** Sippl, Fabian & Reinhart, Gunther, 2021.
A Framework for Data-Based Change Impact Analysis in Manufacturing.
Procedia CIRP **104**, S. 247–252
DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.042
- Smith et al. 1997** Smith, Robert P. & Eppinger, Steven D., 1997.
A Predictive Model of Sequential Iteration in Engineering Design.
Management Science **43** (8), S. 1104–1120
DOI: 10.1287/mnsc.43.8.1104
- Stachowiak 1973** Stachowiak, Herbert, 1973.
Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer.
ISBN: 3211811060
- Steffen et al. 2019** Steffen, Adrienne & Doppler, Susanne, 2019.
Einführung in die Qualitative Marktforschung.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-25107-9

- Steinhäuser 2018** Steinhäuser, Tobias, 2018.
Methode zur Reifebewertung und Priorisierung von Aufgaben in der Serienreifmachung komplexer Produkte.
München, Universitätsbibliothek TUM
- Steminger 2011** Steminger, Gerhard, 2011.
Aufklärung und Kritik.
Schwerpunkt: David Hume zum 300. Geburtstag,
Zeitschrift für freies Denken und humanistische
Philosophie **18** (1), S. 1–292
- Sterman 2002** Sterman, John D., 2002.
System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a
Complex World.
*Massachusetts Institute of Technology Engineering
Systems Division Working Paper Series*, S. 1–29
- Steward 1981** Steward, Donald V., 1981.
The design structure system: A method for managing the
design of complex systems.
IEEE Transactions on Engineering Management **EM-28**
(3), S. 71–74
DOI: 10.1109/TEM.1981.6448589
- Sudlhoff 2007** Sudlhoff, Wolfgang, 2007.
*Methodik zur Bewertung standortübergreifender
Mobilität in der Produktion*, Dissertation. München:
Herbert Utz Verlag.
ISBN: 978-3-8316-0749-5

-
- Sullivan et al. 2013** Sullivan, Gail M. & Artino, Anthony R., 2013.
Analyzing and interpreting data from likert-type scales.
Journal of graduate medical education 5 (4), S. 541–542
DOI: 10.4300/JGME-5-4-18
- Sykora 2021** Sykora, Constantin, 2021.
*Bewertung des Einflusses von Additive Manufacturing auf
Folgekosten von technischen Änderungen im
Automobilbau: Betreut bei BMW durch Kratzer, Markus.*
Augsburg, Universität Augsburg
- Taagepera 2008** Taagepera, Rein, 2008.
Geometric Means and Lognormal Distributions, S. 120-
127.
In: Taagepera, Rein (Hrsg.): *Making Social Sciences More
Scientific*: Oxford University Press
ISBN: 9780199534661
DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199534661.003.0009
- Tale-Yazdi et al. 2019** Tale-Yazdi, A; Kattner, N; Becerril, L; Lindemann, U., 2019.
A Literature Review on Approaches for the Retrospective
Utilisation of Data in Engineering Change Management.
*2018 IEEE International Conference on Industrial
Engineering and Engineering Management (IEEM)*,
S. 612–616
DOI: 10.1109/IEEM.2018.8607569

- Terwiesch et al. 1999** Terwiesch, Christian & Loch, Christoph H., 1999.
Managing the Process of Engineering Change Orders: The Case of the Climate Control System in Automobile Development.
Journal of Product Innovation Management **16**, S. 160–172
- Thom 1980** Thom, Norbert, 1980.
Grundlagen des betrieblichen Innovationsmanagements.
2., völlig neu bearbeitete Auflage. Königstein/Ts.: Hanstein.
ISBN: 3-7756-6208-1
- Töllner et al. 2009** Töllner, Alke; Jungmann, Thorsten; Bücker, Matthias; Brutscheck, Tobias, 2009.
Modelle und Modellierung, S. 3-21.
Terminologie, Funktionen und Nutzung.
In: Bandow, Gerhard; Holzmüller, Hartmut H. (Hrsg.):
„Das ist gar kein Modell!“: Terminologie, Funktionen und Nutzung. Springer eBook Collection Business and Economics. Wiesbaden: Gabler
ISBN: 978-3-8349-1842-0
- Tomczak 1992** Tomczak, Torsten, 1992.
Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft. Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz, S. 77-87.
In: *Marketing ZFP- Journal of Research and Management*,
2. München: C.H. Beck
DOI: 10.15358/0344-1369-1992-2-77

- Tomczak et al. 2014** Tomczak, Maciej & Tomczak, Ewa, 2014.
The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. *TRENDS in Sport Sciences* **1** (21), S. 19–25
- Ullah et al. 2016** Ullah, Inayat; Tang, Dunbing; Yin, Leilei, 2016.
Engineering Product and Process Design Changes: A Literature Overview.
Procedia CIRP **56**, S. 25–33
DOI: 10.1016/j.procir.2016.10.010
- Ullah et al. 2017** Ullah, Inayat; Tang, Dunbing; Wang, Qi; Yin, Leilei, 2017.
Least Risky Change Propagation Path Analysis in Product Design Process.
Systems Engineering **20** (4), S. 379–391
DOI: 10.1002/sys.21400
- Ullah et al. 2018** Ullah, Inayat; Tang, Dunbing; Yin, Leilei; Hussain, Ishfaq; Wang, Qi, 2018.
Cost-effective propagation paths for multiple change requirements in the product design.
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science **232** (9), S. 1572–1585
DOI: 10.1177/0954406217707788

- Ulrich 1981** Ulrich, Hans, 1981.
Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft.
In: Geist, Manfred; Köhler, Richard (Hrsg.): *Die Führung des Betriebes*. Stuttgart: Poeschel
ISBN: 3-7910-0308-9
- Ulrich et al. 1976** Ulrich, Peter & Hill, Wilhelm, 1976.
Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre.
Wirtschaftswissenschaftliches Studium : Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt 5 (7+8), S. 304–309
- Ulrich et al. 2020** Ulrich, Karl T; Eppinger, Steven D; Yang, Maria C., 2020.
Product design and development. Seventh edition. New York NY: McGraw-Hill Education.
ISBN: 9781260043655
- Vahs et al. 2015** Vahs, Dietmar & Brem, Alexander, 2015.
Innovationsmanagement: Von der Idee zur erfolgreichen Vermarktung. 5. überarbeitete Auflage 2015. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
ISBN: 3799269592
- VDA 2009** VDA, 2009.
Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette: Produktentstehung - Reifegradabsicherung für Neuteile - Methoden, Messkriterien, Dokumentationen. 2. Auflage. Frankfurt am Main: Hennrich Druck + Medien GmbH

- VDI 3405** VDI 3405:2014-12.
Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen
- Vogel 2015** Vogel, Jürgen, 2015.
Prognose von Zeitreihen. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN: 978-3-658-06836-3
- Volkswagen AG 2018** Volkswagen AG, 2018.
Automobildesign wandelt sich zum Mobilitätsdesign.
Verfügbar unter: <https://www.volkswagenag.com/de/news/2018/06/automobile-design-changes-to-mobility-design.html>
Zugriff am: 26.10.2021
- Volpato et al. 2008** Volpato, Giuseppe & Stochetti, Andrea, 2008.
Managing product life-cycle in the industry: evaluating carmakers effectiveness.
International Journal of Automotive Technology and Management **8** (1), S. 1–15
- Wang et al. 2017** Wang, Yi; Ma, Hai-Shu; Yang, Jing-Hui; Wang, Ke-Sheng, 2017.
Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production.
Advances in Manufacturing **5** (4), S. 311–320
DOI: 10.1007/s40436-017-0204-7

- Wasmer et al. 2011** Wasmer, Anna; Staub, Günter; Vroom, Regine W., 2011.
An industry approach to shared, cross-organisational engineering change handling - The road towards standards for product data processing.
Computer-Aided Design **43** (5), S. 533–545
DOI: 10.1016/j.cad.2010.10.002
- Weber 2009** Weber, Julian, 2009.
Vehicle Development Projects – An Overview, S. 1-15.
In: Weber, Julian (Hrsg.): *Automotive Development Processes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
ISBN: 978-3-642-01252-5
DOI: 10.1007/978-3-642-01253-2_1
- Wickel 2017** Wickel, Martina, 2017.
Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen.
München, Universitätsbibliothek TUM, Dissertation
- Wickel et al. 2014** Wickel, Martina & Lindemann, Udo, 2014.
A Retrospective Analysis of Engineering Change Orders to Identify Potential for future Improvements.
NordDesign, S. 692–701

- Wickel et al. 2015** Wickel, Martina; Chucholowski, Nepomuk; Behncke, Florian; Lindemann, Udo, 2015.
Comparison of Seven Company-Specific Engineering Change Processes, S. 125-136.
In: Schabacker, Michael et al. (Hrsg.): *Modelling and Management of Engineering Processes*. Berlin, Heidelberg: Springer
ISBN: 978-3-662-44008-7
DOI: 10.1007/978-3-662-44009-4_11
- Wiendahl et al. 2020** Wiendahl, Hans-Hermann & Denner, Timo, 2020.
Arbeitsplanung, S. 165-191.
In: Bauernhansl, Thomas (Hrsg.): *Fabrikbetriebslehre 1*. Lehrbuch, 1. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg
ISBN: 978-3-662-44538-9
DOI: 10.1007/978-3-662-44538-9_6
- Wister 2004** Wister, Wolfgang, 2004.
Prozeßorientierte Produktentwicklung: der Homologationsprozeß.
ETH Zürich, S. 1–18
- Wohlers Associates 2018** Wohlers Associates, 2018.
Wohlers Report: 3d Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Furt Collins USA: ASTM International.
ISBN: 978-0-9913332-7-1

- Wright 1997** Wright, I. C., 1997.
A review of research into engineering change management: implications for product design.
Design Studies **18** (1), S. 33–42
- Wynn et al. 2014** Wynn, David C; Caldwell, Nicholas H. M; John Clarkson, P., 2014.
Predicting Change Propagation in Complex Design Workflows.
Journal of Mechanical Design **136** (8), S. 1–13
DOI: 10.1115/1.4027495
- Yeasin et al. 2020** Yeasin, Fatma Nur; Grenn, Michael; Roberts, Blake, 2020.
A Bayesian Networks Approach to Estimate Engineering Change Propagation Risk and Duration.
IEEE Transactions on Engineering Management **67** (3), S. 869–884
DOI: 10.1109/TEM.2018.2884242
- Yin et al. 2017** Yin, Leilei; Tang, Dunbing; Ullah, Inayat; Wang, Qi; Zhang, Haitao; Zhu, Haihua, 2017.
Analyzing engineering change of aircraft assembly tooling considering both duration and resource consumption.
Advanced Engineering Informatics **33**, S. 44–59
DOI: 10.1016/j.aei.2017.04.006
- Zäh 2013** Zäh, Michael F., 2013.
Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren.
München: Hanser. Kostengünstig Produzieren.
ISBN: 978-3-446-22854-2

Zeyn 2017

Zeyn, Helmut, 2017.

Industrialisierung der Additiven Fertigung: Digitalisierte Prozesskette – von der Entwicklung bis zum einsetzbaren Artikel. 1 Auflage. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, VDE Verlag GmbH

Zionts 1979

Zionts, Stanley, 1979.

MCDM — If not a Roman Numeral, then what?"

The Institute of Management Sciences 9 (4), S. 94–101

Anhang

Anhang 1: Definition und Kodierungsregeln für Änderungsursachen (in Anlehnung an Kratzer et al. 2022)

Kategorie	Definition und Kodierungsregel
1. Probleme bei Montage	Probleme beim Fügen: z.B. Fügen der Bauteile nicht möglich/ schwierig/ Risiko unkorrekter Fügeprozesse/ Fehlen von Zugänglichkeit oder Platzmangel.
2. Geometrische Konflikte	Es bestehen geometrische Konflikte (Kollision, Package etc.) zwischen Bauteilen, die nicht eindeutig der Montage zugeordnet werden können.
3. Design/Optik	Wenn Design- und Optikmaßnahmen erforderlich werden, die im Sichtfeld des Kunden sind.
4. Fugenübergang/ Spaltmaß	Wenn Fugenübergang bzw. Spaltmaß zwischen Bauteilen nicht den Anforderungen entspricht.
5. Nicht spezifizierbare Ursache	Wenn kein Grund für eine Änderung genannt wird.
6. Mechanische Eigenschaften / Steifigkeit	Wenn die mechanische Eigenschaften oder die Steifigkeit verbessert werden soll.
7. Sonstige Änderungsursachen	Wenn die Anzahl der Nennungen für die Erzeugung einer neuen Kategorie zu gering ist (≤ 10) und der Grund keiner anderen Kategorie zuordenbar ist.
8. Crasheigenschaften/ Passive Sicherheit	Sicherstellung der Passiven Sicherheit z.B. Crashverhalten / Fußgängerschutz
9. Akustische Auffälligkeiten	Bei Auffälligkeit abnormale Geräusche. Wenn etwas vibriert/knattert/ knarzt/ brummt etc.
10. Dichtigkeit/ Korrosion	Korrosion tritt auf. Geändertes Bauteil verursacht meist die Undichtigkeit, die dann zu Korrosion führt. Das Wort Korrosion muss dabei nicht direkt genannt werden.
11. Fertigungsursprung	Wenn z.B. die Anlage nicht fähig ist, das Bauteil so herzustellen, der Prozess nicht stabil ist oder die Anlage die Kapazität nicht erreicht.
12. Komfort und Ergonomie	Wenn Kundenanforderungen im Bereich Komfort und Ergonomie verbessert werden sollen.
13. Kostenreduzierung	Zur Reduzierung des zeitlichen Aufwands bzw. der Reduktion von meist Herstellungskosten.
14. Geometrische Toleranzen u. Maßhaltigkeit	Wenn geometrische Toleranzprobleme bestehen.
15. Fahrdynamik/ Fahrverhalten	Zur Verbesserung der Fahrdynamik und des Fahrverhaltens.
16. Gewicht/Leichtbau	Wenn der primäre Auslöser das Gewicht ist.

Anhang 2: Ankerbeispiele für Änderungsursachen

Kategorie	Ankerbeispiel
1. Probleme bei Montage	„Schwierige Montage der ...Abdeckung" „Die Montage der ...blende nur sehr schwer möglich. Für den Serienbetrieb nicht akzeptabel, da die Blende nur mit hohem Kraftaufwand... eingeschoben werden kann"
2. Geometrische Konflikte	„Unzureichender Bauraum ..." „dadurch ergibt sich eine Kollision mit dem Einleger.
3. Design/Optik	"wird ... aus ästhetischen Gründen verlängert." „dass eine Beschichtung... nicht zu der ... geforderten Oberflächenqualität führt (Sicht-Teile!)"
4. Fugenübergang/ Spaltmaß	„Abstand in X zu...[Komponente XY]... zu groß" „Spalt zwischen ... [Komponente X]... und [Komponente Y]."
5. Nicht spezifizierbare Ursache	-
6. Mechanische Eigenschaften / Steifigkeit	„Rissbildung im Grundmaterial. Betriebsfestigkeit über Laufzeit ist nicht gegeben.“ „Labilität in X und Y“
7. Sonstige Änderungsursachen	-
8. Crasheigenschaften/ Passive Sicherheit	„Im [Fahrzeugmodell XY] ergibt sich aufgrund der Fahrzeugeigenschaften eine höhere Belastung im Heckcrash ... wodurch es zu Testversagen kommt"
9. Akustische Auffälligkeiten	„Bauteil ... schwingt zur sehr durch, somit kann es zu einem Störgeräusch kommen" „Während der Fahrt durch.. Bauteil XY... wahrnehmbare Rollgeräusche."
10. Dichtigkeit/ Korrosion	„Abdichtbarkeit im Bereich ... nicht gewährleistet ... Gefahr Wassereintritt" „DYKO-Ergebnisse: ... Beginnende Korrosion ausgehend von Beschnittkante..."
11. Fertigungsursprung	„Prozessicheres Fügen und anschließendes Schweißen nicht möglich." „...keine prozssichere rissfreie Herstellung."
12. Komfort und Ergonomie	„Sitzkomfortverbesserung" „Steigerung Klimakomfort für den Kunden."
13. Kostenreduzierung	„Anpassung Kunststoffeinleger ... Entfall der Nacharbeit im Werk" „Anpassung Geometrie Bauteil XY. Neues Werkzeugnest --> HK Reduzierung
14. Geometrische Toleranzen u. Maßhaltigkeit	„Toleranzen im Bereich der Verschraubungen nicht berücksichtigt. Deshalb muß ... eine Anpassung im Serienwerkzeug vorgenommen werden“ „Maßhaltigkeitunzureichend"
15. Fahrdynamik/ Fahrverhalten	„...Steigerung der Fahrdynamik (stat. Steifigkeit) ... " „Probleme ... bei bestimmten Fahrmanövern zu erwarten: ..."
16. Gewicht/Leichtbau	„Gewichtspotential bei [XY]" „Erreichung Zielgewicht"

Anhang 3: Unterschiede in der Höhe der Werkzeugänderungskosten bei unterschiedlichen Änderungsursachen

Änderungsursachen	Werkzeugänderungskosten einer Bauteiländerung								
	Fahrzeug 1			Fahrzeug 2			Fahrzeug 3		
	N	Norm. \bar{x}	Mittlerer Rang	N	Norm. \bar{x}	Mittlerer Rang	N	Norm. \bar{x}	Mittlerer Rang
1 Probleme beim Fügen	180	0,54	229,3	96	0,45	101,8	151	0,23	166,9
2 Geometrische Konflikte	64	0,83	259,5	32	0,57	100,2	35	0,17	173,4
3 Design	58	1,48	201,1	30	0,65	111,3	42	0,39	196,8
4 Fugenmaße	15	0,83	275,4	11	0,39	110,4	50	0,23	206,1
5 Mechanische Eigenschaften	47	1,10	271,1	6	0,29	88,0	31	0,36	244,0
6 Crasheigenschaften	44	0,98	254,9	11	1,27	145,2	26	0,39	240,8
7 Akustische Auffälligkeiten	49	0,60	233,7	16	0,41	111,4	12	0,21	179,1
8 Dichtigkeit/ Korrosion	20	0,68	245,5	15	0,88	147,3	32	0,37	193,6

Anhang 4: Negative Zusatzeffekte von Änderungen vor Serienstart, resultierend aus einer langen Änderungsdauer

(A1) Welche negativen Zusatzeffekte entstehen bei einer Änderung vor Serienstart, die bei einer schnelleren Umsetzung mit AM weniger stark bzw. nicht entstehen würden?“			
Nr.	Kernaussage/ Paraphrase	Codierung/ Generalisierung: Längere Änderung bedeutet ...	Kernaussagen/ Hauptkategorie
1	Werkzeugänderung oft nicht zur nächsten Bauphase möglich.	Änderungen nicht zur nächsten Bauphase umsetzbar	K1: Änderungen, besonders welche, die länger dauern, können im PEP häufiger nicht zur nächsten Bauphase umgesetzt werden. Dies führt zu geringerer Produktreife und dadurch zu weiteren Kosten bzw. (späten) teureren Lösungen.
2	Entdeckte Probleme in frühen Vorserien erst kurz vor SOP behoben.	Änderungen nicht zur nächsten Bauphase umsetzbar	
3	Problemdeckung kurz vor Hardwareaufbau führt zu Konzepterprobung mit altem Stand.	Änderungen nicht zur nächsten Bauphase umsetzbar	
4	Verzicht auf notwendige Änderungen am Versuchswerkzeug bei bevorstehendem Wechsel auf Serienwerkzeug.	Änderungen nicht zur nächsten Bauphase umsetzbar	
5	Zeit zwischen Vorserien zu knapp für Änderungsumsetzung.	Änderungen nicht zur nächsten Bauphase umsetzbar	
6	Verspäteter Ergebnissrückführung bei neuen komplexen Bauteilen besonders problematisch.	geringere Reife (Produkt und Prozess)	
7	Änderungsumsetzung nicht zur nächsten Vorserie bedeutet: nicht-repräsentativer Anlauf der Serienprozesse und Produktreife leidet.	geringere Reife (Produkt und Prozess)	
8	Änderungsumsetzung nicht zur nächsten Bauphase resultiert in geringerer Produktreife und nachträglich teuren Lösungen bei Sonderbetriebsmitteln und Herstellkosten.	späte teure Lösungen	
9	Unreifes Produkt generiert in späteren Phasen Probleme.	späte teure Lösungen	
10	Später Ergebnissrückführung durch lange Änderungsdauer führt zu Lösungen mit Sicherheitsfaktor.	teure Lösungen	
11	Niedrige Produktreife machte zu späterem Zeitpunkt eine teure Lösung erforderlich.	späte teure Lösungen	
12	Eine geringere Produktreife erzeugt später potentiell Gewährleistungskosten.	spätere Probleme	

Anhang 5: Negative Zusatzeffekte von Änderungen nach Serienstart, resultierend aus einer langen Änderungsdauer

(A2) Welche negativen Zusatzeffekte entstehen bei einer Änderung nach Serienstart, die bei einer schnelleren Umsetzung mit AM weniger stark bzw. nicht entstehen würden?“			
Nr.	Kernaussage/ Paraphrase	Codierung/ Generalisierung: Längere Änderung bedeutet ...	Kernaussagen/ Hauptkategorie
1	Ex-ante Abschätzung der Änderungsdauer ist zur Bestimmung der Vorproduktionsstückzahl erforderlich.	höhere Vorproduktionsstückzahl	K2: Schnellere Änderungs- umsetzung bedeutet weniger Vorproduktion und daher weniger Kosten für Behälter, Lager und Zusatzkapazität.
2	Zusätzliche Lagerfläche für vorproduzierte Bauteile	höhere Kosten für zusätzliche Lagerfläche	
3	Angemietete oder vorhanden Fläche des Lieferanten	höhere Kosten für zusätzliche Lagerfläche	
4	Behälter sind zur Bauteillagerung notwendig.	höhere Behälterkosten	
5	Vorproduktion in Zusatzschichten	höhere Kosten für Zusatzkapazität	
6	Mehraufwand der Vorproduktion über Zusatzschichten	höhere Kosten für Zusatzkapazität	
7	Bei hoher Lieferantenauslastung: Fertigung in Zusatzschichten, Vergabe der Zusatzkapazität oder eines anderen Bauteils. In jedem Fall entstehen Kosten.	höhere Kosten für Zusatzkapazität	
8	Mehrkosten durch zusätzliche Mitarbeiter bzw. Wochenendarbeit	höhere Kosten für Zusatzkapazität	
9	Anzahl Zusatzschichten ist von Vorproduktionsstückzahl abhängig.	höhere Kosten für Zusatzkapazität	
10	Gewährleistungsfälle in jedem Fahrzeug. Prüfen einer technische Änderung bei Häufung der Fälle und Kosten.	Gewährleistungskosten-Relevanz nach SOP	K3: Schnellere Änderungs- umsetzung bedeutet schnellere Reduktion von Gewährleistungs- kosten, Produktkosten und Nacharbeit.
11	Geometrische Änderung sind bei Qualitätsproblemen, die zu Gewährleistung führen, die häufigste Lösung.	Gewährleistungskosten-Relevanz nach SOP	
12	Jedes weiter produzierte Teil birgt bis zur Änderungsumsetzung das Risiko, zusätzliche Gewährleistungskosten zu erzeugen.	spätere Gewährleistungskostenreduktion	
13	Änderungen nach Serienstart zur Produktkostenreduktion	Relevanz Produktkostenreduktion	
14	Produktkostenreduktion ist erst wirksam, wenn Änderung umgesetzt ist.	spätere Produktkostenreduktion	
15	Potentielle Nacharbeit bei jedem Bauteil bzw. Fahrzeug mit Mangel.	höhere Nacharbeitskosten	

Anhang 6: Studie 3: Zusammensetzung der Interviewteilnehmer (in Anlehnung an Seifert 2021)

Code	Fahrzeugsegment	Berufserfahrung in Jahren
<i>B01</i>	Segment B & C	≥ 5
<i>B02</i>	Segment B & C	≥ 5
<i>B03</i>	Segment B & C	≥ 15
<i>B04</i>	Segment B & C	≥ 10
<i>B05</i>	Segment D	≥ 10
<i>B06</i>	Segment D	≥ 5
<i>B07</i>	Segment E	≥ 10
<i>B08</i>	Segment E	≥ 10
<i>B09</i>	Segment F	≥ 15
<i>B10</i>	Segment F	≥ 15
<i>B11</i>	Segment F	≥ 5
<i>B12</i>	Segment F	≥ 10

Anhang 7: Studie 3: Beispielhafter Interviewleitfaden (in Anlehnung an Seifert 2021)

Beispiel Interviewleitfaden für Luxus-Segment**A. Konnektivität:**

- i. Welche fortschreitenden Anforderungen an die Konnektivität sind in Zukunft für Fahrzeuge aus dem Segment Luxus besonders relevant?
- ii. Lassen sich bei diesen Anforderungen Unterschiede zwischen den verschiedenen Märkten erkennen?
- iii. Welche Hardware-Komponenten müssen heutzutage regelmäßiger aktualisiert werden als früher? Wofür sind Kund*innen tatsächlich bereit, mehr Geld auszugeben?

B. Elektrifizierung:

- i. Welche fortschreitenden Anforderungen an die Elektrifizierung sind in Zukunft für Fahrzeuge aus dem Segment Luxus besonders relevant?
- ii. Lassen sich bei diesen Anforderungen Unterschiede zwischen den verschiedenen Märkten erkennen?
- iii. Welche Hardware-Komponenten müssen in Zukunft regelmäßig aktualisiert werden? Wofür sind Kund*innen tatsächlich bereit, mehr Geld auszugeben?

C. Automatisiertes Fahren:

- i. Welche fortschreitenden Anforderungen an das autonome Fahren sind in Zukunft für Fahrzeuge aus dem Segment Luxus besonders relevant?
- ii. Lassen sich bei diesen Anforderungen Unterschiede zwischen den verschiedenen Märkten erkennen?
- iii. Welche Hardware-Komponenten müssen schon aktuell oder in Zukunft regelmäßig aktualisiert werden? Wofür sind Kund*innen tatsächlich bereit, mehr Geld auszugeben?

D. Personalisierung/Design:

- i. Ist der Trend einer Mass Personalization bei der Fahrzeugkonfiguration auch in den Märkten des Luxus-Segments zu beobachten?
 - a) Wenn ja: Welche personalisierbaren Komponenten sind für die Kunden besonders interessant?
 - b) Wenn nein:
 - i. Welche Komponenten müssen aufgrund von sich verändernden Kundenanforderungen an die Personalisierung besonders häufig im Lebenszyklus nach SOP aktualisiert werden?
 - ii. Worauf legen die Kunden des Luxus-Segments speziellen Wert bei personalisierbaren Komponenten?
 - iii. Wie wird eine Komponente persönlich?

ÜBERGREIFENDE FRAGEN

- ii. Wäre eine verbesserte Update-Fähigkeit in den genannten Bereichen und/oder eine verbesserte Personalisierbarkeit auch für Kunden von Gebrauchtfahrzeugen interessant? Worauf legt der Kunde hier besonderen Wert?
- iii. Wie schätzt das Produktmanagement die Zahlungsbereitschaft der Kund*innen ab? Wie wird ein potentieller Umsatzzuwachs quantifiziert?

Anhang 8: Randbedingungen und Herausforderungen innerhalb der Trends

1) Welche Randbedingungen und Herausforderungen ergeben sich bei der Umsetzung der vier Trends ?			Anzahl der Nennungen												Inter-views	
			Klein/Mittel				Groß/Exekutive				Luxus					
Suchfeld	Generalisierung 1	Generalisierung 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Σ	
Konnektivität (Updates)	Randbedingungen	Innovationsstarke Wettbewerber	0	0			3	0	0	0	0	0	0	0	3	1
		Consumer-Product Lebenszyklus	1	0			1	0	0	0	0	0	0	0	2	2
		Fehlende Markenloyalität	2	0			1	0	0	0	0	0	0	0	3	2
		Vorteil für Drittanbieter	0	0			1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
			0	0			1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Herausforderungen - Umsetzung	Geringe Zahlungsbereitschaft bei Gebrauchtfahrzeugen	0	0			1	0	0	0	0	1	0	0	2	2
		Geringe Zahlungsbereitschaft	0	0			1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
		Einmalaufwand	1	0			4	0	0	0	0	1	1	3	10	5
		Absicherungsaufwand	0	0			2	2	0	0	0	0	0	0	4	2
		Technische Umsetzung	0	0			0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Elektrifizierung (Updates)	Randbedingungen	Marktregulierung	1	0			2	1	1	0	0	0	0	5	4	
		Differenzierung Top-Modell	0	0			0	0	0	0	0	1	1	2	2	
	Herausforderungen - Umsetzung	Geringe Zahlungsbereitschaft bei Gebrauchtfahrzeugen	0	0			0	1	0	0	0	0	0	1	2	2
		Geometrische Integration	1	0			0	4	0	0	0	0	0	0	5	2
		Hohe Kosten	0	0			2	0	0	0	0	0	0	0	2	1
Automatisiertes Fahren (Updates)	Randbedingungen	Innovationsstarke Wettbewerber	0	0			2	0	1	0	0	0	0	3	2	
		Aktualität im Lebenszyklus	0	0			0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
	Herausforderungen - Umsetzung	Marktregulierungen/ Anforderungen	1	0			0	0	1	0	0	0	0	0	2	2
		Reifegrad	0	0			0	0	0	0	0	0	2	1	3	2
		Geringe Zahlungsbereitschaft	0	0			0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
		Geometrische Integration	2	1			3	0	0	0	0	1	3	10	5	
		Absicherungsaufwand	0	0			3	0	1	0	0	0	0	2	6	3
		Hohe Kosten	0	0			0	0	2	0	0	0	0	1	3	2
Designupdates und Personalisierung (inkl. Editionen)	Randbedingungen	Modelle mit geringer Stückzahl	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	1	0	6	3
		Vorteil für Drittanbieter	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	2
		Build-to-Stock	0	2	0	1	0	0	0	1	2	0	0	0	6	4
		Restwert/ Austauschbarkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4	1
	Herausforderungen - Umsetzung	Markenwerte Exterieur beibehalten	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	2
		Lange Lieferzeiten vermeiden	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3
		Lokale Fertigung	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
		Regionale Authentizität (Editionen)	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2
		Reaktionsfähigkeit bei Editionen	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
		Ersatzteilverfügbarkeit	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
		Story verkaufen	0	2	3	0	0	0	0	0	0	1	3	9	4	
		Geringe Zahlungsbereitschaft	0	0	6	5	0	0	0	2	0	0	0	0	13	3
		Steuerungstechnischer Aufwand	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
		Austauschbarkeit ermöglichen	0	0	0	0	1	0	3	2	0	0	3	9	4	
		Hochwertigkeit	0	2	3	0	1	1	0	0	1	2	2	12	7	
		Echtheit	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	4	2	
		Aufwand für Kunde minimieren	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	
		Einfache Konfiguration ermöglichen	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
		Absicherungsaufwand	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	4	4	
		Homologationsaufwand	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	2	
Werkzeugkosten	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	1			

Anhang 9: Innovationsideen/ Einsatzfelder für eine änderungsflexible Fertigungstechnologie bei Konnektivität und Elektrifizierung

2) Welche Einsatzfelder ergeben sich für eine änderungsflexible Fertigungstechnologie in den vier definierten trendspezifischen Suchfeldern?				Anzahl der Nennungen												Inter-views		
				Klein/Mittel			Groß/Exekutive				Luxus							
Suchfeld	Generalisierung 1	Generalisierung 2	Generalisierung 3: Ideen/ Einsatzfelder	1, 2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Σ			
Konnektivität	Consumer Electronics Modernität, Aktualität	Smart-Device Integration und Sichtbarkeit	Ladetechnologie		1		1				1		1		4	4		
			Ablage/Halterung		2		1		2	1	2	1	1		10	7		
			Schnittstellentechnologie		1				2	1						4	3	
		Schnittstellen- ausstattung	Schnittstellentechnologie							1							1	1
			Visual UI		1	1		2	2	1			2	1	2	12	8	
		Infotainment- systeme	Head-Unit					1									1	1
			Infotainmentsystem sonstiges					2									2	1
			Passagier- Entertainment	Beifahrer-Entertainment		1			1	1			1	1	1	6	6	
		Audiosystem	Rear-Seat-Entertainment				1		2	2		1	1	1	1	9	7	
			-											1		1	1	
Entry-Device Technologie	-											1		1	1			
	Fahrzeuginteraktion	optische Interaktionssysteme		1		N. A.									1	1		
Elektrifizierung	State of the Art & Usability	Erhöhung Reichweite	Aerodynamik, Rollwiderstand		1										1	1		
			Leistungselektronik										1	1	1	1		
			Batterie					3	2			1	1	7	4			
		Erleichterung Laden	Ladetechnologie		1			2	1			2	2	8	5			
	Ladetechnologie						2						2	1				
	Differenzierung	Erhöhung Reichweite	-										1	1	1			
		Begeisterungs- fähigkeit	Verbesserte Beschleunigung	Antriebsstrang				2						2	1			
	Komfort	Verbesserung der akustischen Abschirmung	Geräuschkämpfung						1				1	2	2			

Anhang 11: Expertenfragebogen zur Ermittlung von Einflussgrößen auf das Bauteiländerungsverhalten (Entstanden im Rahmen der Betreuung der Abschlussarbeiten von (Bauch 2020); (Sykora 2021))

	Bauteileigenschaften	Erläuterung	Antwort
0	/	In welchem Zeitraum waren Sie an der Entwicklung des Fahrzeugprojekts beteiligt?	
1	Änderungsausbreitung aufgrund geometrischer Verknüpfung (GV)	Wie stark ist die geometrische Verknüpfung mit anderen Bauteilen, die viele Änderungen hervorrufen?	1: sehr gering 2: gering 3: mittel 4: hoch 5: sehr hoch
2	Änderungsausbreitung aufgrund funktionaler Verknüpfung (FV)	Wie stark ist die funktionale Verknüpfung mit anderen Bauteilen, die erfahrungsgemäß viele Änderungen hervorrufen?	1: sehr gering 2: gering 3: mittel 4: hoch 5: sehr hoch
3	Funktionale Komplexität (FK)	Wie hoch ist die funktionale Komplexität des Bauteils?	1: sehr gering 2: gering 3: mittel 4: hoch 5: sehr hoch
4	Serienwerkzeugkosten (WKZ)	Wie hoch sind die Kosten für das Serienwerkzeug, mit dem das Bauteil gefertigt wird?	Angabe in €
5	Bauteilmasse (m)	Wie hoch ist das Bauteilgewicht? (Wurde aus den Zeichnungen herausgelesen)	Angabe in g
6	Prognosegüte der virtuellen Erprobung (PG)	Bitte schätzen Sie die Prognosegüte der virtuellen Erprobung/ Absicherung/ Simulation des Bauteils in % ein?	Angabe in %
7	Neuheitsgrad (N) des Bauteils. Konzept neu.	Wie schätzen Sie den Neuheitsgrad des Bauteils ein?	1: sehr gering 2: gering 3: mittel 4: hoch 5: sehr hoch
8	Großserienprojekt (GS)	(Bauteile in einem Fahrzeugprojekt > 50.000 Fahrzeuge über Laufzeit werden in die Kategorie Großserienprojekt eingeteilt.	Ja/ Nein
9	Homologationsrelevanz (HR)	Anzahl der homologationsrelevanten Merkmale eines Bauteils (Bei > 0 ist ein Bauteil homologationsrelevant)	Angabe der Anzahl
10	Montagerisiko (RM). Risiko einer Änderung aufgrund Montierbarkeit.	Wie schätzen Sie die Montierbarkeit des Bauteils ein? (Mögliche Probleme: Gefahr der Beschädigung, schlechter Halt, Kollision, Gefahr falscher Einbau)	1: sehr gering 2: gering 3: mittel 4: hoch 5: sehr hoch
11	Designrelevanz (DR)	Ist das Bauteil im Sichtbereich (z.B. Dekorblende) oder in Verbindung mit einem Bauteil im Sichtbereich (z.B. Halter einer Blende)?	Ja/ Nein
12	Relevanz für Crashtest (CR)	Ist das Bauteil crashrelevant?	Ja/ Nein
13	Risiko der ungewollten akustischen Auffälligkeiten (AA)	Wie hoch ist das Risiko, dass ungewollte akustische Auffälligkeiten (z.B. Klappern, Schwingungen) bei einem Bauteil auftreten?	1: sehr gering 2: gering 3: mittel 4: hoch 5: sehr hoch
14	Bauteil übernimmt Funktion Abdichtung zum Korrosionsschutz (FKS)	Übernimmt das Bauteil eine Funktion zur Abdichtung, die bei Verfehlen zu Korrosion des Bauteils oder eines anderen Bauteils führen könnte?	Ja/ Nein

Anhang 12: **Änderungswahrscheinlichkeit (GÄ)**: Hauptkomponentenanalyse vor der Durchführung der logistischen Regression: Korrelationsmatrix, der unabhängigen Variablen, Anti-Image-Korrelationsmatrix und Überprüfung der Eignung über KMO-Kriterium (Darstellung in Erweiterung zu Bauch 2020, S. 75–78)

Korrelation nach Pearson														
	GS	PG	GV	FV	FK	HR	DR	AA	FKS	CR	N	RM	WZK	m
GS	1	-0,07	-0,01	0,09	0,08	,25**	-,25**	-0,02	0,09	-0,05	-,20**	-0,07	0,14*	0,12
PG	-0,07	1	-0,10	-0,04	-,18**	-0,09	-0,10	-,14*	-0,08	-0,03	-,17*	-,16*	0,00	0,04
GV	-0,01	-0,10	1	,64**	,57**	,22**	0,10	,29**	0,08	,23**	,37**	,28**	,22**	,23**
FV	0,09	-0,04	,64**	1	,58**	,30**	-0,02	,20**	-0,05	,27**	,40**	,28**	,17*	,19**
FK	0,08	-,18**	,57**	,58**	1	,38**	0,01	,23**	,16*	,18**	,37**	,22**	,31**	,30**
HR	,25**	-0,09	,22**	,30**	,38**	1	-0,07	-0,08	0,09	,35**	0,07	-0,01	,31**	,32**
DR	-,25**	-0,10	0,1	-0,02	0,01	-0,07	1	,21**	-0,03	0,06	,20**	,16*	0,05	0,07
AA	-0,02	-,14*	,29**	,20**	,23**	-0,08	,21**	1	-0,01	0,00	,18**	,21**	0,10	0,09
FKS	0,09	-0,08	0,08	-0,05	,16*	0,09	-0,03	-0,01	1	-0,02	-0,03	,21**	,19**	,20**
CR	-0,05	-0,03	,23**	,27**	,18**	,35**	0,06	0,00	-0,02	1	,22**	,17*	,24**	,26**
N	-,20**	-,17*	,37**	,40**	,37**	0,07	,20**	,18**	-0,03	,22**	1	,20**	,14*	0,13
RM	-0,07	-,16*	,28**	,28**	,22**	-0,01	,16*	,21**	,21**	,18*	,20**	1	,16*	0,11
WZK	0,14*	0,00	,22**	,17*	,31**	,31**	0,05	0,10	,19**	,24**	,14*	,16*	1	,85**
m	0,12	0,04	,23**	,19**	,30**	,32**	0,07	0,09	,20**	,26**	0,13	0,11	,85**	1

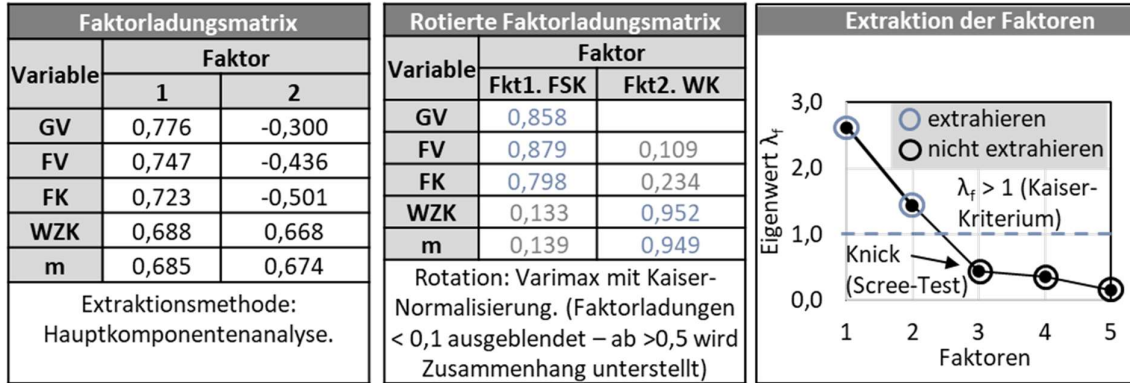
** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.
 * . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.



Anti-Image-Korrelation						Eignung für Hauptkomponentenanalyse
	GV	FV	FK	WZK	m	
GV	,737 ^a	-,47	-,28	-,02	-,03	Ziemlich gut
FV	-,47	,701 ^a	-,35	-,05	,07	Ziemlich gut
FK	-,28	-,35	,798 ^a	-,01	-,12	Ziemlich gut
WZK	-,02	-,05	-,01	,563 ^a	-,83	kläglich
m	-,03	,07	-,12	-,83	,556 ^a	kläglich
Insgesamt	,654 ^a					Mittelmäßig

^a Maß der Stichprobeneignung (KMO-Kriterium)

Anhang 13: **Änderungswahrscheinlichkeit (GÄ)**: Hauptkomponentenanalyse vor Durchführung der logistischen Regression: Faktorladungsmatrix, rotierte Faktorladungsmatrix, Extraktion der Faktoren über Kaiser-Kriterium und Scree-Test (in Anlehnung an Bauch 2020, S. 75–78)



Faktor	Erklärte Gesamtvarianz								
	Anfängliche Eigenwerte			Summen von quadrierten Faktorladungen für Extraktion			Rotierte Summe der quadrierten Ladungen		
	Gesamt λ_f	% der Varianz	% kumuliert	Gesamt	% der Varianz	% kumuliert	Gesamt	% der Varianz	% kumuliert
Fkt1. FSK	2,63	52,50	52,50	2,63	52,50	52,50	2,18	43,66	43,66
Fkt2. WK	1,43	28,64	81,14	1,43	28,64	81,14	1,87	37,49	81,14
3	0,44	8,76	89,90						
4	0,35	7,08	96,98						
5	0,15	3,02	100,00						

Anhang 14: **Änderungswahrscheinlichkeit (GÄ):** Logistische Regression – Überprüfung der Einzelhypothesen
(Darstellung in Erweiterung zu Bauch 2020, S. 80)

Unabhängige Variable	Abhängige Variable	$\hat{\beta}_j$	$s_{\hat{\beta}_j}$	Wald	p-Wert
GV	GÄ	0,531	0,125	17,912	0,000*
FV	GÄ	0,435	0,119	13,486	0,000*
FK	GÄ	0,481	0,122	15,469	0,000*
Fkt1. SK	GÄ	0,601	0,148	16,434	0,000*
WZK/10000	GÄ	0,034	0,009	15,430	0,000*
m	GÄ	0,001	0,000	18,757	0,000*
Fkt2. WK	GÄ	1,711	0,459	13,876	0,000*
PG	GÄ	0,026	0,128	0,042	0,837
N	GÄ	0,602	0,124	23,538	0,000*
GS	GÄ	-0,649	0,293	4,923	0,027*
HR	GÄ	0,769	0,276	7,748	0,005*
RM	GÄ	0,304	0,146	4,343	0,037*
DR	GÄ	0,814	0,280	8,431	0,004*
CR	GÄ	1,246	0,284	19,199	0,000*
AA	GÄ	0,115	0,120	0,913	0,339
FKS	GÄ	0,616	0,334	3,407	0,065

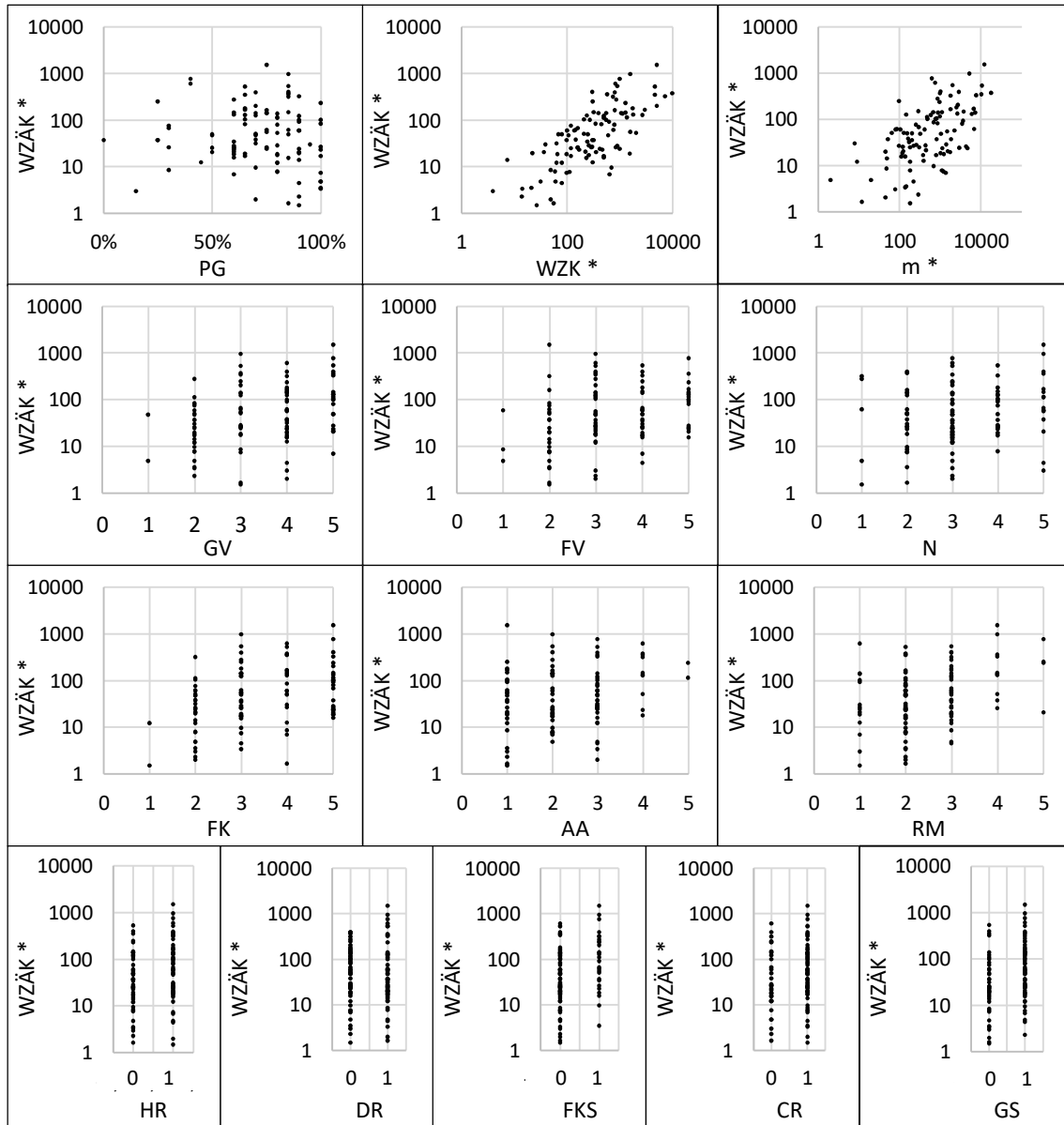
* Auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Anhang 15: **Änderungsintensität (ÄI)**: logistische Regression – Überprüfung der Einzelhypothesen

Unabhängige Variable	Abhängige Variable	$\hat{\beta}_j$	$s_{\hat{\beta}_j}$	Wald	p-Wert
GV	ÄI	0,083	0,179	0,217	0,641
FV	ÄI	-0,002	0,180	0,000	0,989
FK	ÄI	0,064	0,172	0,137	0,712
WZK/10000	ÄI	0,040	0,010	9,373	0,002*
m	ÄI	0,001	-0,268	7,223	0,007*
PG	ÄI	-0,639	0,974	0,431	0,511
N	ÄI	0,212	0,187	1,284	0,257
GS	ÄI	0,103	0,408	0,064	0,800
HR	ÄI	0,241	0,398	0,366	0,545
RM	ÄI	0,841	0,249	11,369	0,001*
DR	ÄI	0,458	0,400	1,307	0,253
CR	ÄI	1,394	0,452	9,528	0,002*
AA	ÄI	0,142	0,195	0,526	0,468
FKS	ÄI	0,896	0,494	3,282	0,070

* Auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Anhang 16: **Werkzeugänderungskosten (WZÄK)**: Modellvoraussetzungen prüfen – a. Linearer Einfluss durch einzelne Streudiagramme zwischen unabhängigen Variablen und den WZÄK (Hinweis: WZÄK wurden aus Gründen des Informationsschutzes normiert; die Ordinate der Zielvariable WZÄK ist logarithmiert sowie die Abszisse der WZK* und der Masse m*) (Darstellung in Erweiterung zu Bauch 2020, S. 83)

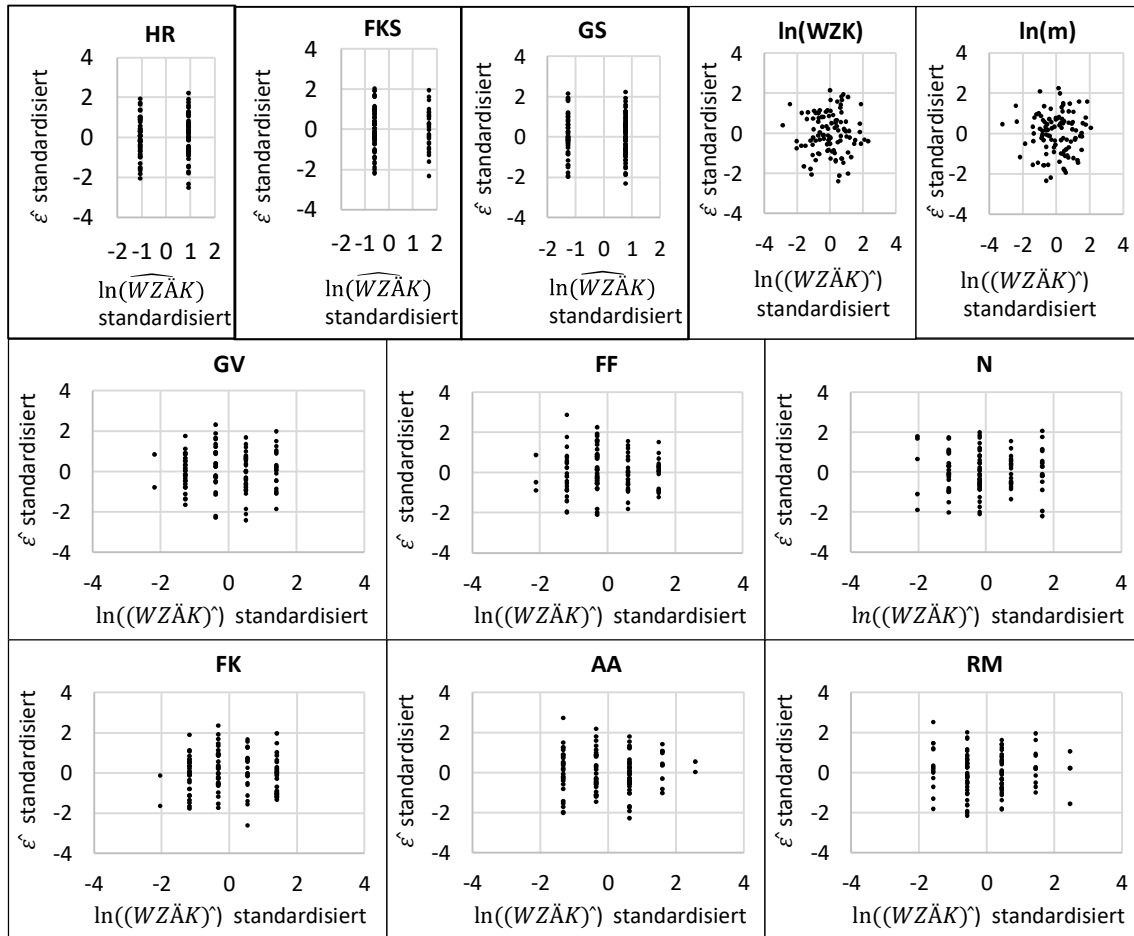


Anhang 17: **Werkzeugänderungskosten (WZÄK)**: Einzelhypothesen: Modellvoraussetzungen prüfen – a. Prüfen auf linearen Einfluss der unabhängigen Variablen → p-Werte; d. Prüfen auf unkorrelierte Störgrößen → Durbin-Watson-Statistik (Darstellung in Erweiterung zu Bauch 2020, S. 84)

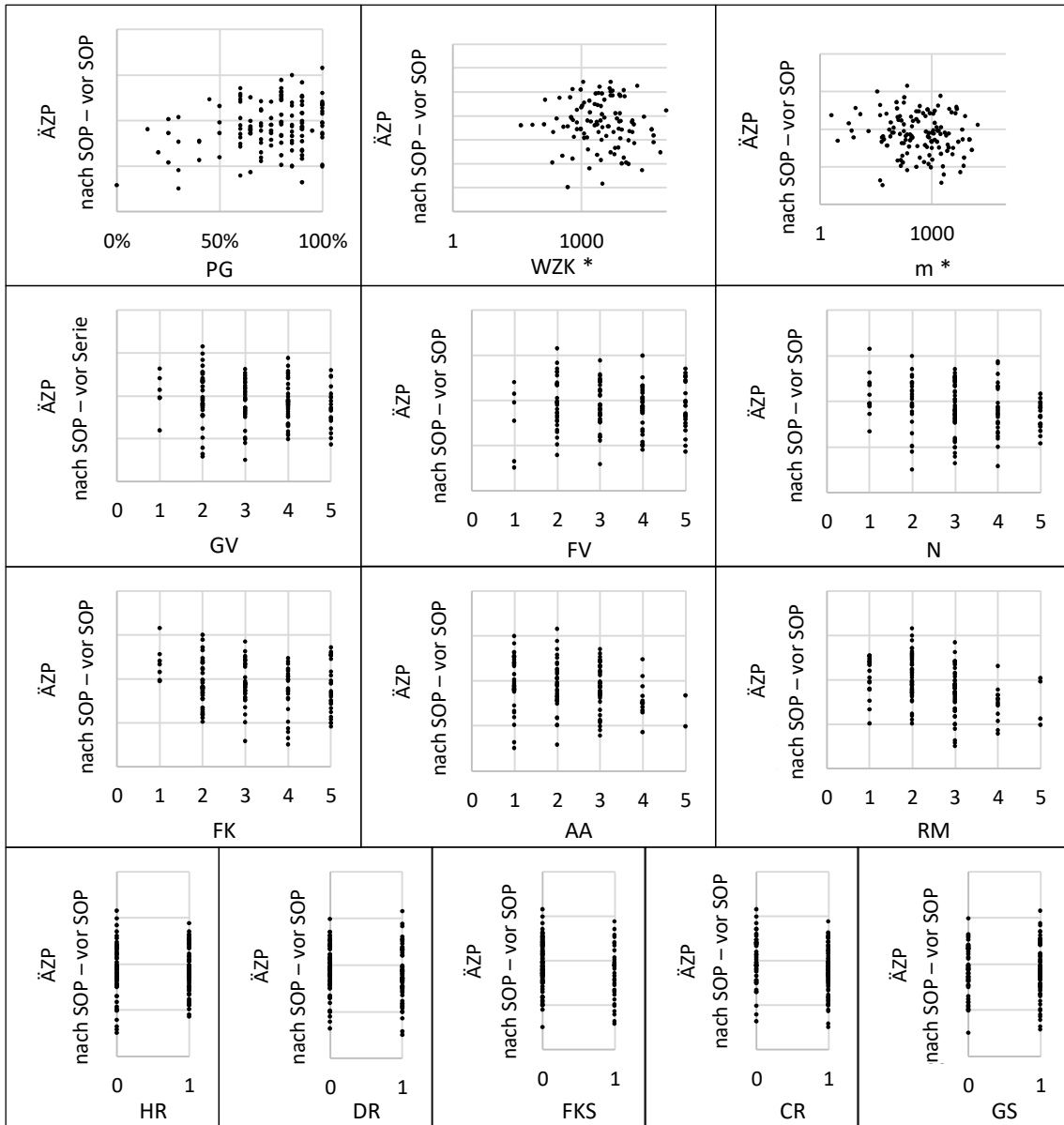
Unabhängige Variable	Abhängige Variable	Durbin-Watson d	Koeffizient $\hat{\beta}_1$	Standardfehler $s_{\hat{\beta}_1}$	Koeffizient $\hat{\beta}_1$ standardisiert	p-Wert
GV	ln(WZÄK)	2,003	0,461	0,123	0,346	0,000*
FV	ln(WZÄK)	2,065	0,408	0,126	0,304	0,002*
FK	ln(WZÄK)	2,041	0,479	0,117	0,374	0,000*
ln(WZK)	ln(WZÄK)	1,930	0,719	0,066	0,731	0,000*
ln(m)	ln(WZÄK)	1,963	0,501	0,069	0,580	0,000*
PG	ln(WZÄK)	2,086	0,596	0,698	0,854	0,395
N	ln(WZÄK)	2,093	0,291	0,132	0,212	0,030*
GS	ln(WZÄK)	2,158	0,913	0,286	0,300	0,002*
HR	ln(WZÄK)	2,135	0,609	0,285	0,206	0,035*
RM	ln(WZÄK)	2,081	0,564	0,137	0,376	0,000*
DR	ln(WZÄK)	2,087	0,008	0,291	0,003	0,979
CR	ln(WZÄK)	2,172	0,522	0,315	0,161	0,101
AA	ln(WZÄK)	2,037	0,334	0,139	0,231	0,018*
FKS	ln(WZÄK)	2,006	1,011	0,318	0,299	0,002*

* Auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant. (über t-Test)

Anhang 18: **Werkzeugänderungskosten (WZÄK)**: Einzelhypothesen: Modellvoraussetzungen prüfen – c. Homoskedastizität der Störgrößen über Streudiagramme standardisierter Residuen in Abhängigkeit von den standardisierten geschätzten logarithmierten Werkzeugänderungskosten $\ln(\widehat{WZÄK})$ (Darstellung in Erweiterung zu Bauch 2020, S. 111)



Anhang 19: **Spätester Änderungszeitpunkt (ÄZP):** Modellvoraussetzungen prüfen – a. Linearer Einfluss durch einzelne Streudiagramme zwischen unabhängigen Variablen und dem spätesten Änderungszeitpunkt (Hinweis: WKZ wurden aus Gründen des Informationsschutzes normiert; die Abszisse der WKZ* und der Masse m^* ist logarithmiert) (Darstellung in Erweiterung zu Sykora 2021, S. 74)

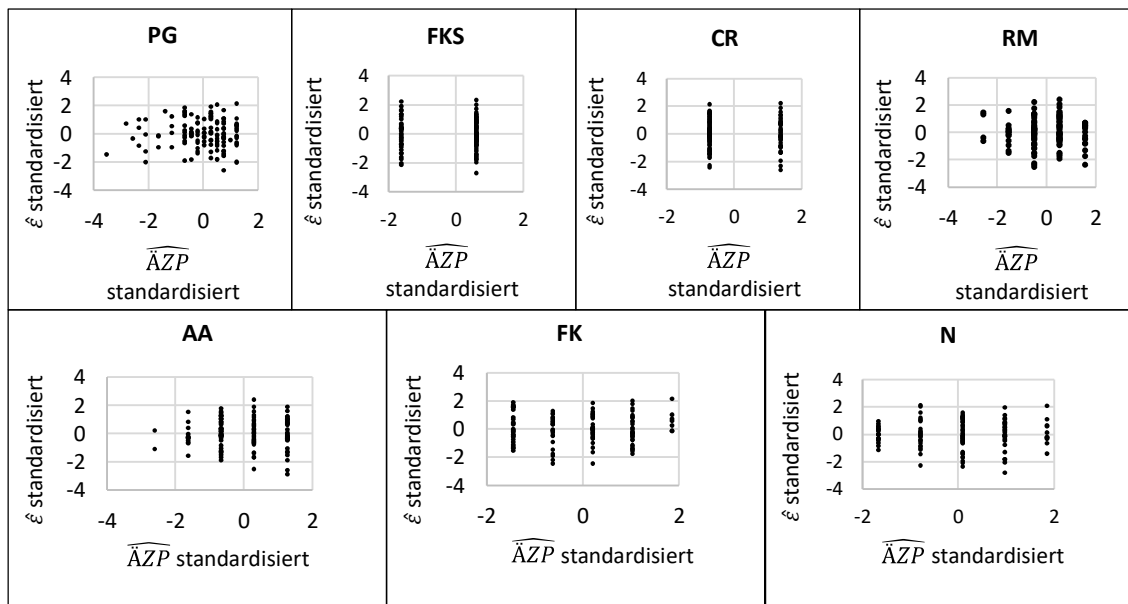


Anhang 20: **Spätester Änderungszeitpunkt (ÄZP)**: Einzelhypothesen: Modellvoraussetzungen prüfen – a. Prüfen auf linearen Einfluss der unabhängigen Variablen → p-Werte; d. Prüfen auf unkorrelierte Störgrößen → Durbin-Watson-Statistik (Darstellung in Erweiterung zu Sykora 2021, S. 77)

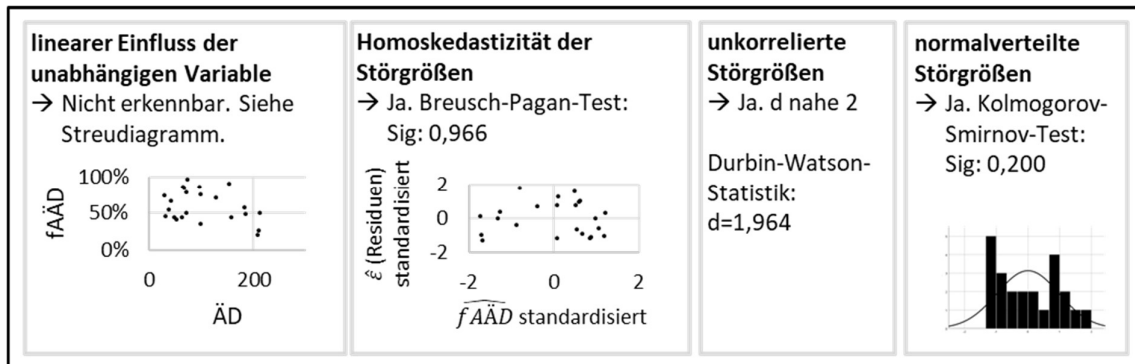
Unabhängige Variable	Abhängige Variable	Durbin-Watson d	Koeffizient β_1	Standardfehler s_{β_1}	Koeffizient $\hat{\beta}_1$ standardisiert	p-Wert
GV	ÄZP	2,254	-1,435	0,811	-0,155	0,079
FV	ÄZP	2,290	-0,120	0,831	-0,013	0,886
FK	ÄZP	2,278	-1,544	0,766	-0,175	0,046*
ln(WZK) (n=105)	ÄZP	2,237	-0,455	0,643	-0,070	0,481
ln(m)	ÄZP	2,258	-0,781	0,510	-0,134	0,128
PG	ÄZP	2,339	14,152	4,306	0,279	0,001*
N	ÄZP	2,256	-2,004	0,810	-0,214	0,015*
GS	ÄZP	2,289	0,295	1,909	0,14	0,877
HR	ÄZP	2,283	0,542	1,877	0,026	0,773
RM	ÄZP	2,194	-4,369	0,895	-0,396	0,000*
DR	ÄZP	2,328	-2,479	1,866	-0,117	0,186
CR	ÄZP	2,290	-4,614	1,941	-0,206	0,019*
AA	ÄZP	2,337	-2,199	0,890	-0,213	0,015*
FKS	ÄZP	2,252	-4,405	2,061	-0,186	0,034*

→ + spätester Änderungszeitpunkt früher; bei – spätester Änderungszeitpunkt später
 *. Auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant. (über t-Test)

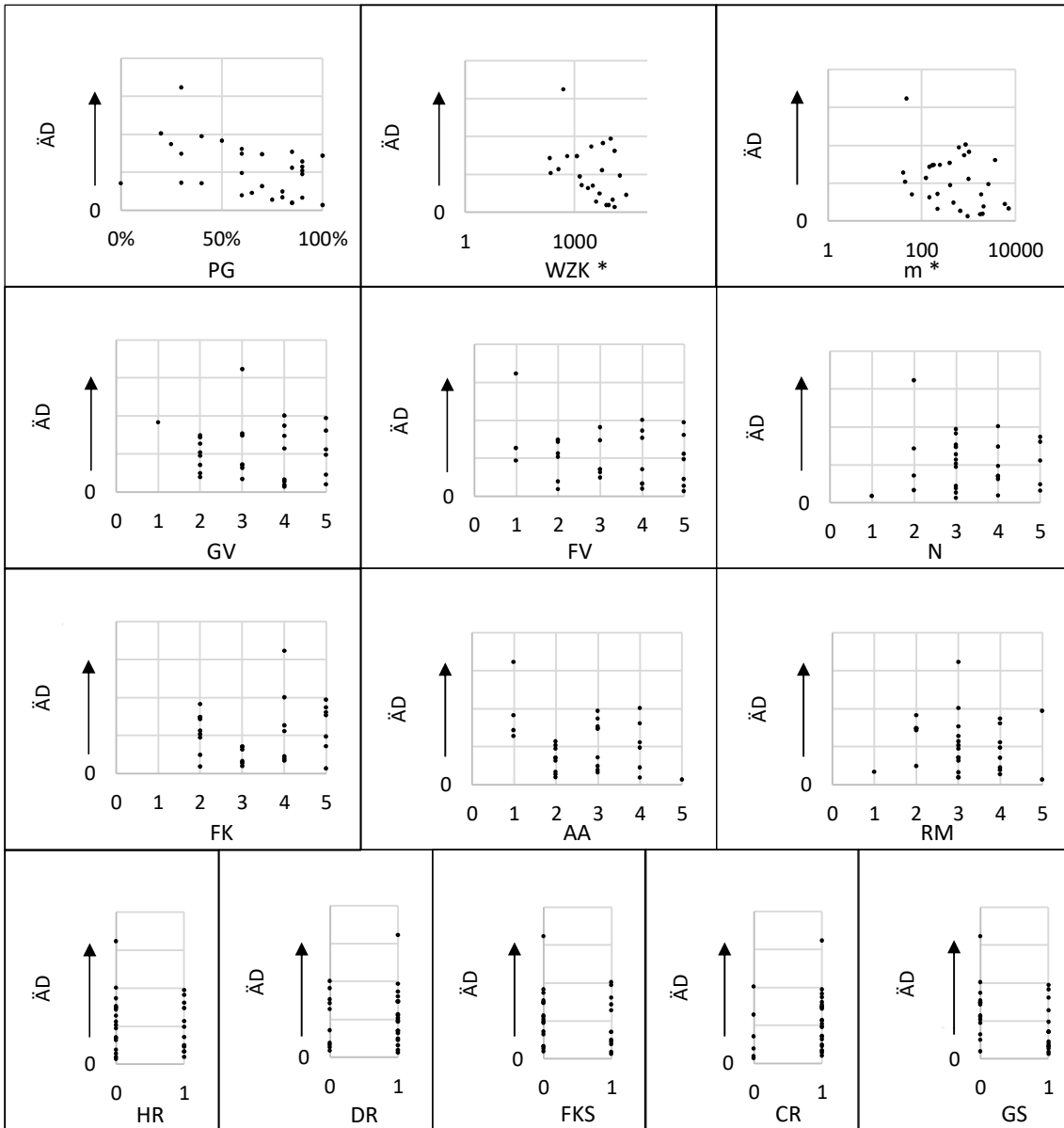
Anhang 21: **Spätester Änderungszeitpunkt (ÄZP)**: Einzelhypothesen: Modellvoraussetzungen prüfen – c. Homoskedastizität der Störgrößen – Streudiagramme standardisierter Residuen in Abhängigkeit der standardisierten geschätzten logarithmierten spätesten Änderungszeitpunkte (ÄZP)



Anhang 22: Fertigungsspezifischer Anteil an der Änderungsdauer (fÄÄD): Modellvoraussetzungen prüfen



Anhang 23: **Änderungsdauer Serienbauteile (ÄD):** Modellvoraussetzungen prüfen – a. Linearer Einfluss durch einzelne Streudiagramme zwischen unabhängigen Variablen und der Änderungsdauer (Hinweis: Änderungsdauer wurde aus Gründen des Informationsschutzes nicht quantifiziert dargestellt; die Abszisse der WZK* und der Masse m* ist logarithmiert)

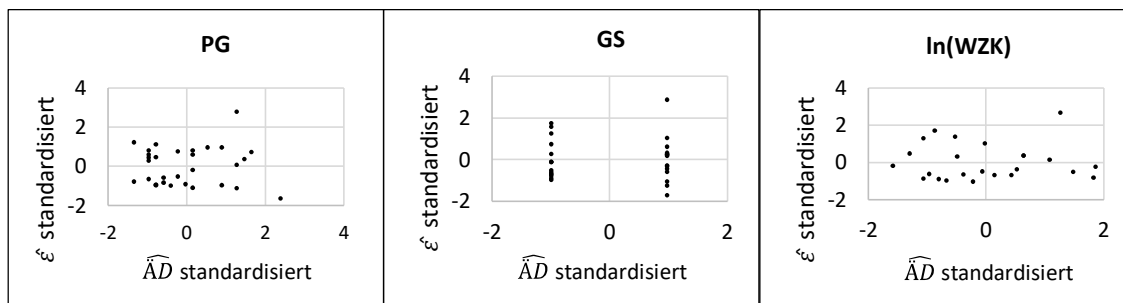


Anhang 24: **Änderungsdauer Serienbauteile (ÄD)**: Einzelhypothesen: Modellvoraussetzungen prüfen – a. Prüfen auf linearen Einfluss der unabhängigen Variablen → p-Werte; d. Prüfen auf unkorrelierte Störgrößen → Durbin-Watson-Statistik

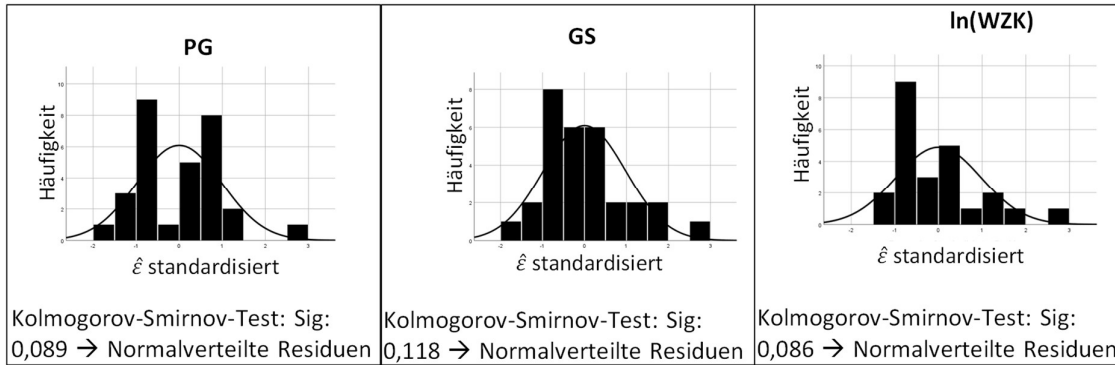
Unabhängige Variable	Abhängige Variable	Durbin-Watson d	Koeffizient $\hat{\beta}_1$	Standardfehler $s_{\hat{\beta}_1}$	Koeffizient $\hat{\beta}_1$ standardisiert	p-Wert
GV	ÄD	2,085	-5,246	11,239	-0,088	0,644
FV	ÄD	2,205	-12,826	9,692	-0,243	0,196
FK	ÄD	1,976	7,229	11,158	0,122	0,522
ln(WZK) (n=24)	ÄD	2,324	-21,291	10,089	-0,410	0,046*
ln(m)	ÄD	2,324	-17,556	8,633	-0,359	0,052
PG	ÄD	1,747	-113,559	44,947	-0,431	0,017*
N	ÄD	2,070	-1,513	12,926	-0,022	0,908
GS	ÄD	2,267	-54,000	24,209	-0,388	0,034*
HR	ÄD	2,037	-17,273	26,614	-0,122	0,522
RM	ÄD	2,089	-6,641	14,202	-0,088	0,644
DR	ÄD	2,092	9,350	17,810	0,063	0,739
CR	ÄD	2,023	34,625	32,181	0,199	0,291
AA	ÄD	2,021	-16,508	12,260	-0,246	0,189
FKS	ÄD	2,058	-19,083	26,570	-0,134	0,479

* Auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant. (über t-Test)

Anhang 25: **Änderungsdauer Serienbauteile (ÄD)**: – Modellvoraussetzungen prüfen – c. Homoskedastizität der Störgrößen (Einzelhypothesen) – Streudiagramme standardisierter Residuen in Abhängigkeit der standardisierten geschätzten Änderungsdauer (ÄD)



Anhang 26: **Änderungsdauer (ÄD): Einzelhypothesen:** Modellvoraussetzungen prüfen – e. Normalverteilte Residuen – Normalverteilungsdiagramme der Residuen und Komogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung



Anhang 27: **Änderungswahrscheinlichkeit (GÄ):** Mittelwerte und Standardabweichungen der Variablen in der Stichprobe. Notwendig für die Standardisierung zur Anwendung der Hauptkomponentenanalyse

Variable	\bar{x}_j	s_j
GV	3,045	1,177
FV	3,000	1,216
FK	3,009	1,197
WZK	256.020	540.535
m	969	2124

Anhang 28: Ergebnis Expertenbefragung: Von welchen Variablen hängen die Gewährleistungskosten ab?

Von welchen Variablen (außer der Dauer) hängen die Gewährleistungskosten ab?			
Nr.	Kernaussage/ Paraphrase	Codierung/ Generalisierung	Kernaussagen/ Hauptkategorie
1	Risiko für Gewährleistungskosten sind abhängig von produzierter Stückzahl.	Einfluss auf Gewährleistungskosten: Stückzahl	K1: Die Gewährleistungskosten sind abhängig von Stückzahl und Eintrittsrisiko. Das Eintrittsrisiko hängt vom Fahrzeugtyp ab. Die Datenbasis, um Gewährleistungsrisiken und Änderungen nach Serienstart zu verknüpfen ist im Unternehmen vorhanden.
2	Stückzahl und potenzieller Ausfall ist entscheidend für die Höhe der Gewährleistungskosten.	Einfluss auf Gewährleistungskosten: Stückzahl und Eintrittsrisiko (Wahrscheinlichkeit x Auswirkungsstärke)	
3	Für Cabrios sind z.B. höhere Gewährleistungskosten eingeplant, da mehr Verschleißteile vorhanden sind.	Gewährleistungskosten-Vergleichbarkeit bei ähnlichem Fahrzeugtyp.	
4	Die Anzahl der Gewährleistungsfälle und Gewährleistungskosten innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Claimperiod) ist auf den Produktionszeitraum eines Fahrzeugs zurückzuführen.	Datenbasis Gewährleistungskosten vorhanden.	
5	Gewährleistungskosten sind mit Qualitätsproblemen verknüpft und diese wiederum mit Änderungen.	Datenbasis Gewährleistungskosten vorhanden.	

Anhang 29: Ergebnis Expertenbefragung: Wann ist eine Vorproduktion notwendig? Von welchen Variablen hängt der Umfang ab?

Wann ist eine Vorproduktion notwendig? Von welchen Variablen hängt der Umfang ab?			
Nr.	Kernaussage/ Paraphrase	Codierung/ Generalisierung	Kernaussagen/ Hauptkategorie
1	Vorproduktionskosten fallen nicht bei jeder Änderung nach SOP an.	Voraussetzung für Vorproduktionskosten vorhanden.	K1: Die Vorproduktionskosten entstehen nicht bei jeder Änderung nach Serienstart.
2	Bei neuem Werkzeug (wenn altes Werkzeug nicht mehr angepasst wird) meist keine Vorproduktion notwendig.	Voraussetzung für Vorproduktion: Werkzeugänderung	
3	Bei geringer Werkzeugauslastung eines Bauteils fallen häufig keine Vorproduktionskosten an, da dann Bestände die Regel sind.	Voraussetzung für Vorproduktionskosten: Geringe Bestände im Normalbetrieb	
4	Wenn einige Jahre nach SOP die Auslastung sinkt, sinken bei Änderungen die Vorproduktionskosten.	Bedingungen von Vorproduktionskosten: Hohe Auslastung	
5	Die benötigte Stückzahl der Vorproduktion ist auch abhängig von der benötigten monatlichen Stückzahl des Bauteils.	Einfluss auf Vorproduktionsstückzahl: Stückzahl Normalbetrieb.	K2: Die Vorproduktionsstückzahl ist über die Stückzahl im Normalbetrieb, und die relevante Änderungsdauer inkl. Sicherheitsfaktor zu berechnen.
6	Es ist eine ex-ante Abschätzung der Änderungsdauer zur Bestimmung der Vorproduktionsstückzahl erforderlich.	Einfluss auf Vorproduktionsstückzahl: abgeschätzte Änderungsdauer + Sicherheitsfaktor	

Anhang 30: Ergebnis Expertenbefragung – Von welchen Variablen (außer der Dauer) hängen die Zusatzkapazitätskosten der Vorproduktion ab?

Von welchen Variablen (außer der Dauer) hängen die Zusatzkapazitätskosten der Vorproduktion ab?			
Nr.	Kernaussage/ Paraphrase	Codierung/ Generalisierung	Kernaussagen/ Hauptkategorie
1	Wenn aufgrund einer Änderung eine Vorproduktion notwendig ist und die Auslastung des Lieferanten hoch ist (wenig Volumenflexibilität) entstehen Probleme und Kosten.	Erhöhte Auslastung bei geringer Volumenflexibilität führt zu Zusatzkapazitätskosten.	K1: Kosten für Zusatzkapazitäten entstehen, wenn mehr produziert werden muss, als der Produzent eingeplant hat.
2	Bei dringenden Änderungen entstehen meist Zusatzkapazitätskosten in der Vorproduktion durch Wochenend-Schichten.	Zuschlagsfaktor für Zusatzkapazitäten.	
3	Die zusätzliche notwendige Kapazität kann als Faktor, aufgrund von Schichtzuschlägen, beaufschlagt werden.	Zuschlagsfaktor für Zusatzkapazitäten.	K2: Die Kosten für Zusatzkapazitäten können über die Fertigungskosten, einen Zuschlagsfaktor und die Stückzahl in der Vorproduktion abgeschätzt werden.
4	Durchschnittswerte bei Aufschlag für zusätzliche Kapazität sinnvoll, da tatsächliche Aufwände zum Prognosezeitpunkt nicht vorhanden (z.B. freie Kapazitäten zum Änderungszeitpunkt)	Zuschlagsfaktor für Zusatzkapazitäten.	
5	Prozentsatz der Zusatzaufschläge ist bedingt durch zusätzliche Arbeiten in Nacht- und Wochenendschichten.	Zuschlagsfaktor für Zusatzkapazitäten.	
6	Für die Zusatzkapazitäten kann ein erfahrungsbasierter Aufschlagfaktor verwendet werden.	Zuschlagsfaktor für Zusatzkapazitäten.	
7	Die Kosten für Zusatzkapazität ergeben sich aus Fertigungskosten, dem Zuschlagsfaktor und der Stückzahl der Vorproduktion.	Fertigungskosten, Zuschlagsfaktor, Stückzahl der Vorproduktion	

Anhang 31: Ergebnis Expertenbefragung – Von welchen Variablen (außer der Dauer) hängen die Lagerkosten der Vorproduktion ab?

Von welchen Variablen (außer der Dauer) hängen die Lagerkosten für die Vorproduktion ab?			
Nr.	Kernaussage/ Paraphrase	Codierung/ Generalisierung	Kernaussagen/ Hauptkategorie
1	Lagerkosten sind abhängig von Behältervolumen. Behältervolumen ist abhängig von Bauteilvolumen und Packungsdichte.	Niedrige Packungsdichte und hohes Bauteilvolumen führen zu hohem Behältervolumen. Hohes Behältervolumen führt zu hohen Lagerkosten.	K1: Die Lagerkosten sind abhängig von Bauteilvolumen, und Packungsdichte (und somit Behälterart).
2	Zusätzliche Lagerfläche bei großen sperrigen Bauteilen besonders hoch. Bei kleinen Schüttgutbauteile fällt sie wenig ins Gewicht.	Niedrige Packungsdichte und hohes Bauteilvolumen führen zu hohem Behältervolumen. Hohes Behältervolumen führt zu hohen Lagerkosten.	

Anhang 32: Ergebnis Expertenbefragung – Von welchen Variablen (außer der Dauer) hängt die Behälterkosten der Vorproduktion ab?

Von welchen Variablen (außer der Dauer) hängen die Behälterkosten ab?			
Nr.	Kernaussage/ Paraphrase	Codierung/ Generalisierung	Kernaussagen/ Hauptkategorie
1	Zusätzliche Behälter notwendig, wenn mehr benötigt werden, als vorhanden sind.	Prämisse für Behälterkosten: Behälterbestand	K1: Wenn Behälter aufgrund Vorproduktion notwendig werden, sind die Kosten von der Robustheit der Bauteile, den Kosten pro Behälter und dem Umfang der Vorproduktion abhängig.
2	Bei empfindlichen Bauteilen werden häufig spezielle Einmalverpackungen verwendet.	Behälterwahl und Kosten von Bauteilrobustheit abhängig	
3	Anzahl Ersatzbehälter und Kosten sind von Bauteilbeschaffenheit abhängig. Poliertes Bauteil benötigt teurere Behälter als Schüttgut.	Behälterwahl und Kosten von Bauteilrobustheit abhängig	
4	Unterschiedliche Behälter in der Logistik. Standardbehälter, Kartonagen etc.	Unterschiedliche Behälterwahl	
5	Behälterkosten pro Bauteil und Umfang der Vorproduktion bestimmen die Behälterkosten.	Behälterkosten pro Bauteil und Umfang der Vorproduktion bestimmen die Kosten	

Anhang 33: Reduktionspotenzial von Zusatzkosten einer Änderung nach Serienstart – Vorproduktion: Kapazitätskosten – Sensitivitätsanalyse an einem Beispiel

fÄD (werkzeuggebunden)			fÄD (AM)	$y(St_a)$	$y(S_F)$	$y(FEK_{VP})$	$y(SA_{VP})$	Kosten Zusatzkapazität				
\hat{y}	$Q_{10\%}$	$Q_{90\%}$	\hat{y}					\hat{y}	$Q_{10\%}$	$Q_{90\%}$	\hat{y} (AM)	Potenzial
71	14	138	10	18.000	5%	0,30 €	50%	551	109	1071	78	473
							25%	276	55	536	39	237
							100%	1102	218	2142	156	946
						0,50 €	50%	918	182	1785	130	788
							25%	459	91	893	65	394
							100%	1837	363	3570	260	1577
					10%	0,30 €	50%	1102	218	2142	156	946
							25%	551	109	1071	78	473
							100%	2204	436	4284	312	1892
						0,50 €	50%	1837	363	3570	260	1577
							25%	918	182	1785	130	788
							100%	3673	727	7140	520	3153
				40.000	5%	0,30 €	50%	1224	242	2380	173	1051
							25%	612	121	1190	87	526
							100%	2449	484	4760	347	2102
						0,50 €	50%	2041	404	3967	289	1752
							25%	1020	202	1983	144	876
							100%	4081	807	7933	578	3504
					10%	0,30 €	50%	2449	484	4760	347	2102
							25%	1224	242	2380	173	1051
							100%	4898	969	9520	693	4204
						0,50 €	50%	4081	807	7933	578	3504
							25%	2041	404	3967	289	1752
							100%	8163	1615	15867	1156	7007

Legende

fÄD (werkzeuggebunden)

fÄD (AM)

 $y(St_a)$ $y(S_F)$ $y(FEK_{VP})$

Fertigungsspezifische Änderungsdauer der werkzeuggebundenen Version

Fertigungsspezifische Änderungsdauer der AM-Version des Bauteils

Jahresstückzahl des Bauteils

Sicherheitsfaktor (um diesen Faktor werden mehr Bauteile vorproduziert, als bei der prognostizierten Änderungsdauer notwendig wären)

Fertigungseinzelkosten pro Bauteil

Anhang 34: Reduktionspotenzial von Zusatzkosten einer Änderung nach Serienstart – Vorproduktion: Lagerflächenkosten – Sensitivitätsanalyse an einem Beispiel

fÄD (werkzeuggebunden)			fÄD (AM)	VPD	$y(S_F)$	Abrufintervall	$y(K_F)$	$y(h_L)$	$y(St_a)$	$y(V_{BT})$	Verpackung	Stapelbar PD_{BT}	Kosten Zusätzliche Lagerfläche				
\hat{y}	$Q_{10\%}$	$Q_{90\%}$	\hat{y}										\hat{y}	$Q_{10\%}$	$Q_{90\%}$	\hat{y} (AM)	Potenzial
71	14	138	10	0,5* fÄD	5 %	7	6	3	18.000	42 cm ³	Einmal	schlecht $Q_{25\%}$	17	1	73	<1	17
												mittel $Q_{50\%}$	12	1	52	<1	12
												gut $Q_{75\%}$	9	1	39	<1	9
											Standard	schlecht $Q_{25\%}$	27	2	117	1	26
												mittel $Q_{50\%}$	13	1	56	<1	13
												gut $Q_{75\%}$	7	1	31	<1	7
										350 cm ³	Einmal	schlecht $Q_{25\%}$	144	14	616	3	141
												mittel $Q_{50\%}$	103	10	443	2	101
												gut $Q_{75\%}$	77	8	330	2	75
											Standard	schlecht $Q_{25\%}$	231	23	993	5	226
												mittel $Q_{50\%}$	109	11	468	2	107
												gut $Q_{75\%}$	62	6	265	1	61
									40.000	42 cm ³	Einmal	schlecht $Q_{25\%}$	40	4	167	1	39
												mittel $Q_{50\%}$	29	3	120	1	28
												gut $Q_{75\%}$	21	2	89	<1	21
											Standard	schlecht $Q_{25\%}$	65	7	271	1	64
												mittel $Q_{50\%}$	32	3	132	1	31
												gut $Q_{75\%}$	17	2	71	<1	17
										350 cm ³	Einmal	schlecht $Q_{25\%}$	337	36	1404	7	330
												mittel $Q_{50\%}$	239	26	998	5	234
												gut $Q_{75\%}$	179	19	748	4	175
											Standard	schlecht $Q_{25\%}$	538	58	2245	11	527
												mittel $Q_{50\%}$	262	28	1093	5	257
												gut $Q_{75\%}$	144	16	600	3	141

Legende

- fÄD (werkzeuggebunden) Fertigungsspezifische Änderungsdauer der werkzeuggebundenen Version
- fÄD (AM) Fertigungsspezifische Änderungsdauer der AM-Version des Bauteils
- VPD Angenommene Dauer der Vorproduktion, abhängig von der fertigungsspezifischen Änderungsdauer fÄD
- $y(S_F)$ Sicherheitsfaktor (um diesen Faktor werden mehr Bauteile vorproduziert, als bei der prognostizierten Änderungsdauer notwendig wären)
- Abrufintervall In diesem Intervall werden die vorproduzierten Bauteile vom Fahrzeugwerk wieder abgerufen (Angabe in Tagen)
- $y(St_a)$ Jahresstückzahl des Bauteils
- $y(K_F)$ Flächenkosten in €/m² und Monat
- $y(h_L)$ Lagerhöhe in m (Meter)
- $y(V_{BT})$ Bauteilvolumen in cm³
- PD_{BT} Packungsdichte → Anwender gibt Einschätzung der Stapelbarkeit 1-5 (1 = gut = hohe Packungsdichte $\hat{=} Q_{75\%}$, basierend auf der Verteilung historischer Daten)
- Verpackungsart Unterscheidung in Standardbehälter und Einmalverpackung

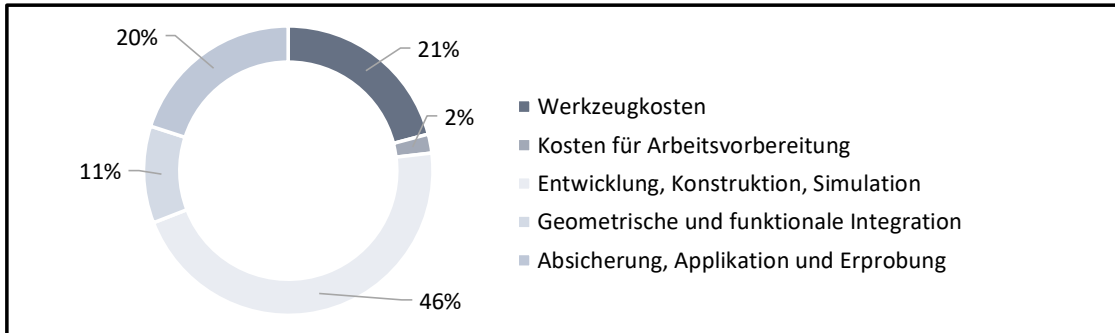
Anhang 35: Reduktionspotenzial von Zusatzkosten einer Änderung nach Serienstart – Vorproduktion: Behälterkosten – Sensitivitätsanalyse an einem Beispiel

fÄD (werkzeuggebunden)			fÄD (AM)	VPD	$y(S_F)$	Abrufintervall	$y(St_a)$	$y(V_{BT})$	Verpackung	$VVK_{BT} / VVmK_{BT}$	Kosten zusätzliche Behälter					
\hat{y}	$Q_{10\%}$	$Q_{90\%}$	\hat{y}								\hat{y}	$Q_{10\%}$	$Q_{90\%}$	\hat{y} (AM)	Potenzial	
71	14	138	10	0,5* fÄD	5 %	7	18.000	42 cm ³	Einmal	hoch $Q_{75\%}$	1529	298	2953	209	1320	
										mittel $Q_{50\%}$	935	183	1806	133	802	
										gering $Q_{25\%}$	558	109	1077	80	478	
									Standard	hoch $Q_{75\%}$	197	13	833	4	193	
										mittel $Q_{50\%}$	86	6	366	2	84	
										gering $Q_{25\%}$	38	2	159	1	37	
								350 cm ³	Einmal	hoch $Q_{75\%}$	12578	2622	24247	1759	10819	
										mittel $Q_{50\%}$	7812	1628	15060	1067	6745	
										gering $Q_{25\%}$	4631	965	8927	669	3962	
									Standard	hoch $Q_{75\%}$	1660	161	6992	35	1625	
										mittel $Q_{50\%}$	735	71	3096	15	720	
										gering $Q_{25\%}$	321	31	1353	7	314	
								40.000	42 cm ³	Einmal	hoch $Q_{75\%}$	3328	674	6444	477	2851
											mittel $Q_{50\%}$	2046	415	3963	291	1755
											gering $Q_{25\%}$	1259	255	2438	173	1086
										Standard	hoch $Q_{75\%}$	435	39	1814	9	426
											mittel $Q_{50\%}$	196	17	816	4	192
											gering $Q_{25\%}$	83	7	348	2	81
									350 cm ³	Einmal	hoch $Q_{75\%}$	28455	5767	55103	3917	24538
											mittel $Q_{50\%}$	17069	3459	33054	2450	14619
											gering $Q_{25\%}$	10411	2110	20161	1458	8953
										Standard	hoch $Q_{75\%}$	3693	330	15409	78	3615
											mittel $Q_{50\%}$	1596	142	6661	34	1562
											gering $Q_{25\%}$	698	62	1912	15	683

Legende

- fÄD (werkzeuggebunden) Fertigungsspezifische Änderungsdauer der werkzeuggebundenen Version
- fÄD (AM) Fertigungsspezifische Änderungsdauer der AM-Version des Bauteils
- VPD Angenommene Dauer der Vorproduktion, abhängig von der fertigungsspezifischen Änderungsdauer fÄD
- $y(S_F)$ Sicherheitsfaktor (um diesen Faktor werden mehr Bauteile vorproduziert, als bei der prognostizierten Änderungsdauer notwendig wären)
- Abrufintervall wieder In diesem Intervall werden die vorproduzierten Bauteile vom Fahrzeugwerk abgerufen (Angabe in Tagen)
- $y(St_a)$ Jahresstückzahl des Bauteils
- $y(K_F)$ Flächenkosten in €/m² und Monat
- $y(h_L)$ Lagerhöhe in m (Meter)
- $y(V_{BT})$ Bauteilvolumen in cm³
- VVK_{BT} Volumenverpackungskosten (€/cm³) → Anwender gibt Einschätzung der Robustheit & Stapelbarkeit 1-5 (z.B. 2 = gute Stapelbarkeit → geringe $VVK_{BT} \triangleq Q_{25\%}$, basierend auf der Verteilung historischer Daten)
- $VVmK_{BT}$ Volumenverpackungsmietkosten (€/cm³) → Anwender gibt Einschätzung der Robustheit & Stapelbarkeit 1-5 (z.B. 2 = gute Stapelbarkeit → geringe $VVK_{BT} \triangleq Q_{25\%}$, basierend auf der Verteilung historischer Daten)
- Verpackungsart Unterscheidung in Standardbehälter und Einmalverpackung

Anhang 36: Anwendung von Baustein 2 - Schritt 3 – Anteil der Einmalaufwände je Update, wenn das Bauteil werkzeuggesteigert wird



Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Additive Manufacturing Campus (AMC) der BMW Group in den Jahren von 2018 bis 2022 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors zahlreiche studentische Arbeiten. Diejenigen, deren Ergebnisse maßgeblich zur vorliegenden Dissertation beigetragen haben oder eine wesentliche Inspiration waren, sind nachstehend aufgeführt. Der Autor dankt allen Studierenden und im Besonderen Lukas Bauch, Christoph Buchner, Philipp Seifert, Constantin Sykora und Yao Lu für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Anhang 37: Studienarbeiten, die zur vorliegenden Dissertation beigetragen haben

Studierende	Titel der Studienarbeit	Beigetragen zu
Bauch, L.	Entwicklung eines Modells zur Prognose der Werkzeugänderungskosten eines Bauteils - Ein Beitrag zur Bewertung des Vorteils additiver Fertigungsverfahren bei geometrischen Änderungen	Kapitel 3, 6, 7
Buchner, C.	Bewertung von Bauteiländerungen in der Additiven Fertigung	Kapitel 6
Seifert, P.	Einfluss der additiven Fertigung auf den Produktlebenszyklus am Beispiel des Automobilbaus der BMW Group	Kapitel 3, 6, 7
Sykora, C.	Bewertung des Einflusses von Additive Manufacturing auf Folgekosten von technischen Änderungen im Automobilbau	Kapitel 3, 6

