

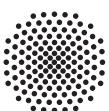
Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau

Eduard Wagner

Multimethodisches Verfahren für anforderungsgerechte Produkt- und Produktionsmodule in Karosseriestrukturen



stuttgarter
maschinenbau
interdisziplinär und vielfältig



Universität Stuttgart

Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT



Universität Stuttgart



Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau

Band 22

Herausgeber: Prof. Dr. Katharina Hölzle, MBA
Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel

Eduard Wagner

**Multimethodisches Verfahren für
anforderungsgerechte Produkt- und
Produktionsmodule in Karosseriestrukturen**

Fraunhofer Verlag

Kontaktadresse:

Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT)
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
info@iat.uni-stuttgart.de
<https://www.iat.uni-stuttgart.de/>

Titelbild: © <https://www.istockphoto.com/de> - gorodenkoff, 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISSN: 2750-655X

ISBN: 978-3-8396-1977-3

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2023

Druck und Weiterverarbeitung: Fraunhofer-Druckerei, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2023

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
verlag@fraunhofer.de
www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V.

Hansastraße 27 c
80686 München
www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Geleitwort

Die deutsche Wirtschaft ist weltweit bekannt für ihren Anlagen- und Maschinenbau. Dabei ist die Universität Stuttgart mit ihren beiden Maschinenbau fakultäten – unter deren Dach sich 42 Institute befinden – die größte universitäre Einrichtung für den Maschinenbau in Deutschland. Unsere wissenschaftliche Exzellenz stützt sich dabei auf unsere zahlreichen Promovierenden und ihre hervorragenden Dissertationen. Viele dieser Dissertationen entstehen in lokaler, nationaler und internationaler Zusammenarbeit mit renommierten Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, der Fraunhofer-Gesellschaft und der Max-Planck-Gesellschaft. Dabei reicht das inhaltliche Spektrum der Dissertationen von Biotechnik, Energietechnik, Fahrzeugtechnik, Kybernetik und Systemtechnik, Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Produktionstechnik bis hin zur Verfahrenstechnik und stützt sich auf die sechs Forschungsschwerpunkte Advanced Systems Engineering, Autonome Produktion, Software-Defined Manufacturing, Resiliente Versorgung, Biointelligenz und Dekarbonisierung der Industrie. Die Ergebnisse aus den Dissertationen zielen darauf ab, kunden-, produkt-, prozess- und mitarbeiterorientierte Technologie zielgerichtet und zeitnah zu entwickeln und anzuwenden.

Viele der im Rahmen der Forschungsarbeiten an den Instituten entstandenen Dissertationen werden in diesen »Beiträgen zum Stuttgarter Maschinenbau« veröffentlicht. Die beiden Fakultäten des Stuttgarter Maschinenbaus wünschen den Promovierenden, dass ihre Dissertationen aus dem Bereich des Maschinenbaus in der breiten Fachwelt als maßgebliche Beiträge wahrgenommen werden und so den Wissensstand auf ein neues Niveau heben.

Für den Stuttgarter Maschinenbau



Stefan Weihe



Oliver Riedel

Vorwort der Herausgeber

Grundlage für gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Fortschritt ist Innovation. Diese entsteht aus dem Zusammenwirken von Technologie, Markt und Mensch. Die Betrachtung dieser drei Faktoren erfordert eine transdisziplinäre Zusammenarbeit und Integration unterschiedlicher Perspektiven und Fähigkeiten.

Die Forschung am Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart und dem kooperierenden Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO zeichnet sich durch diese transdisziplinäre und integrierende Sichtweise aus. Hier wird Forschung mit der Überzeugung betrieben, für Fragestellungen aus der Praxis wissenschaftliche Lösungen zu finden und diese in die Anwendung zu bringen. Auf Basis eines gemeinsamen Verständnisses, welches den Menschen in den Mittelpunkt der Betrachtungen stellt, wird der Wandel von Organisationen und Gesellschaften systemisch untersucht. Darauf aufbauend werden empirisch fundierte Modelle und Lösungsansätze abgeleitet.

Dieser Herausforderung stellen sich die Promovierenden der Institute IAT und IAO und berichten ihre Erkenntnisse vorliegend in den »Beiträgen zum Stuttgarter Maschinenbau«. Mit dieser aktuellen Reihe wird die Arbeit der früheren Institutsleiter an IAT und IAO, Hans-Jörg Bullinger und Dieter Spath, zusammen mit Wilhelm Bauer fortgeführt und auf die Zukunft ausgerichtet. Wir Herausgeber wünschen den Autorinnen und Autoren, dass ihre Dissertationen aus den Bereichen Arbeitswissenschaft, Technologie- und Innovationsmanagement in der breiten Fachwelt als wichtige und maßgebliche Beiträge wahrgenommen werden und so den Wissensstand auf ein neues Niveau heben.



Univ.-Prof. Dr. Katharina Hölzle, MBA



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel

**Multimethodisches Verfahren für anforderungsgerechte
Produkt- und Produktionsmodule
in Karosseriestrukturen**

Von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing
Engineering der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Eduard Wagner

aus Pawlodar (Kasachstan)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dieter Spath

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA

Tag der mündlichen Prüfung: 18.09.2023

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT)
der Universität Stuttgart

2023

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Graduate School of Excellence Advanced Manufacturing Engineering (GSaME) an der Universität Stuttgart in Kooperation mit der Mercedes-Benz AG in Sindelfingen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dieter Spath. Die zahlreichen richtungsweisenden Gespräche, Fragstellungen und motivierenden Denkanstöße haben maßgeblich zu neuen Herangehensweisen und damit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Weiterhin bedanke ich mich bei meinem Mitberichter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA, für das durchgehende Engagement während der gesamten Promotionszeit sowie die methodischen wie auch fachlichen Impulse während der gemeinsamen Austausch- und Diskussionsrunden am Institut.

Herrn Hans-Friedrich Jacobi möchte ich besonders herzlich für die Unterstützung und Motivation seit dem ersten Tag an der GSaME sowie die anhaltende Geduld, insbesondere während der Korrekturphase, danken. Ohne seine außerordentliche Hilfsbereitschaft wäre diese Arbeit in der vorliegenden Güte nicht gelungen. Allen Wegbegleitern und Doktoranden in der GSaME danke ich zudem für die schöne Zeit, den regelmäßigen Austausch und das Feedback in den Kolloquien.

Ich danke auch Herrn Dr.-Ing. Bernd Keller für die konstruktive Unterstützung, die fachlichen Diskussionen und die freundschaftliche Zusammenarbeit während meiner unterschiedlichen Stationen innerhalb der Mercedes-Benz AG. Ebenso bedanke ich mich bei allen Arbeitskollegen der Produktionsplanung und Entwicklung für die Unterstützung bei der Erstellung und Umsetzung der vorliegenden Arbeit.

Zum Abschluss gebührt meinen Eltern, Irina und Alexander Wagner, meiner Schwester Karina Wagner, meinen Großeltern Ella und Waldemar Markus sowie meiner Partnerin, Tiffany Lacker wie auch Regine und Thomas Lacker besonderer Dank. Ohne deren geduldige Hilfe, stetigen Rückhalt und bedingungslose Unterstützung, insbesondere in den kräftezehrenden Phasen meiner akademischen und beruflichen Laufbahn, wäre diese Arbeit nie möglich gewesen.

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern.

Kurzfassung

Die Automobilindustrie wird derzeit mit einer Vielzahl an neuen Herausforderungen und Veränderungen konfrontiert, nicht zuletzt aufgrund der schwankenden Nachfrage, einer steigenden Produktdifferenzierung sowie der Transformation hin zu alternativen Antriebstechnologien. Die resultierenden vielfältigen technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Produkt und an den Produktionsprozess werden dabei gegenwärtig nur unzureichend erfüllt. Es zeichnet sich bereits durch die steigende Komplexität ab, dass die in der Zukunft weiter zunehmenden Anforderungen nicht wie bisher bewältigt werden können. Um die daraus resultierenden Nacharbeitszeiten, Anpassungskosten und Einflüsse auf verknüpfte Prozessschritte möglichst gering zu halten, sind die vielfältigen Anforderungen an das Produkt und die Produktionsprozesse möglichst frühzeitig in den Fahrzeugentstehungsprozess zu überführen und abzugleichen. Dabei legt insbesondere die Fahrzeugkarosserie eine Vielzahl konzeptbestimmender Rahmenbedingungen fest und beeinflusst weitere Derivate und Varianten.

Durch die Zusammenfassung und Trennung der Karosseriekomponenten in vereinfachte, handhabbare und unabhängige Module kann diesen Anforderungen begegnet werden. Bisherige Lösungsansätze zur Bildung von Modulen fokussieren lediglich die Erfüllung einzelner und voneinander getrennter Anforderungen, ohne den Einbezug überschneidender und gegensätzlicher Abhängigkeiten zu beachten. Durch das entwickelte multimethodische Verfahren wird dieses fachlich-methodische Defizit behoben und die vorhandene Wissenslücke geschlossen. Eine strukturierte Anforderungserfassung, die Einbindung des impliziten Erfahrungswissens sowie die einheitliche Modellierung der Wirkungszusammenhänge ermöglichen damit einen vollständigen Abgleich der Abhängigkeiten, um abgestimmte und anpassungsfähige Module entstehen zu lassen. Über eine kombinierte Vorgehensweise unterstützen spezifische Methoden der Datenanalyse die Planungs- und Entwicklungsprozesse bei der Lösungsfindung im Karosseriebau. Damit können neben den konstruktiven Handlungsempfehlungen und quantifizierbaren wirtschaftlichen Wirkungen ebenfalls alternative Szenarien abgeleitet werden. Das entwickelte ganzheitliche Verfahren bildet damit die Grundlage für die Auslegung anforderungsgerechter Produkt- und Produktionsmodule innerhalb der Karosseriestruktur.

Abstract

The automotive industry is currently facing a variety of challenges and changes, partly due to fluctuating demand, increasing product differentiation, and the transition towards environmentally friendly vehicles. As a result the various technical and economical requirements for the product and the production process are currently not completely met. It is already becoming apparent that the increasing demands can no longer be met in the future. In order to minimize the resulting reworking times, adaptation costs, and influences on linked process steps, the various requirements of the product and the production processes must be implemented to the vehicle development process and synchronized as early as possible. The body of the vehicle, in particular, defines many concept-determining parameters and influences further derivatives and variants.

These requirements can be met by grouping and separating the body components into simple, manageable, and independent modules. However, current approaches of forming modules only focus on fulfilling individual and separate requirements without considering the inclusion of overlapping and conflicting dependencies. The developed multi-methodological approach eliminates this technical-methodological deficit and closes the research gap. This way, a structured identification of requirements, the integration of implicit practical knowledge, and the uniform modeling of the interdependencies enable a complete comparison of the dependencies to create synchronized and adaptable modules. Furthermore, using a combined approach, specific data analysis methods support the planning and development processes in finding solutions within the car body and body shop. This allows deriving alternative scenarios in addition to design recommendations and measurable economic effects. Thus, the multi-methodological approach provides a holistic approach for designing product and production modules within the body substructure.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis.....	XIV
Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis	XVI
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation.....	3
1.2 Problemstellung	6
1.3 Zielsetzung der Arbeit	9
1.4 Forschungskonzeption und Aufbau der Arbeit	11
2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft und Technik.....	13
2.1 Fahrzeugproduktion in der variantenreichen Serienfertigung	14
2.1.1 Grundlagen und Aufbau zur Karosseriestruktur	14
2.1.2 Produktion der Fahrzeugkarosserie durch den Karosseriebau	17
2.2 Entwicklungs- und Planungsprozesse für Karosserien	19
2.2.1 Entwicklungs- und Planungsprozess in der Automobilindustrie	19
2.2.2 Entwicklungs- und Planungsprozesse für die Karosserie	21
2.3 Grundlagen und Methoden zur Modularisierung	24
2.3.1 Grundlagen zur Modularisierung von Produkten und Prozessen	25
2.3.2 Modulbildung in der variantenreichen Serienfertigung	27
2.3.3 Modulbildung in der Karosserie und im Karosseriebau.....	28
2.4 Stand der Wissenschaft und Technik zur Produkt- und Produktionsmodularisierung	33
2.5 Gesamtfazit und Defizit.....	38
2.6 Herleitung des Forschungsbedarfs und der Forschungsfragen	39
3 Konzept eines multimethodischen Verfahrens	43
3.1 Zielbild und Lösungsansatz	43
3.2 Entwicklungen zum multimethodischen Verfahren.....	46
3.2.1 Anforderungserfassung und -analyse	46
3.2.2 Einheitliche Darstellung und Transformation.....	47
3.2.3 Prozesswissen und deskriptive Analyseverfahren	48
3.2.4 Modulbildung und Abgleich der Anforderungen	49
3.3 Das multimethodische Konzept zur anforderungsgerechten Modulbildung .	50
3.4 Positionierung im Fahrzeugentstehungsprozess	51

4	Multimethodisches Verfahren zur anforderungsgerechten Modulbildung	53
4.1	Anforderungserfassung und -analyse	53
4.1.1	Methodenauswahl zur Anforderungserfassung	54
4.1.2	Einflüsse in Bezug auf die Karosseriestruktur	56
4.1.3	Klassifikation und Bewertung erfasster Anforderungen	61
4.1.4	Auswahl erfolgskritischer Anforderungen an die Karosseriestruktur	63
4.2	Einheitliche Modellierung von Wirkungszusammenhängen	65
4.2.1	Methodenauswahl und Darstellungsweise	65
4.2.2	Modellierung der Karosseriestrukturen in DSM	66
4.2.3	Überführung von Anforderungen in Matrizen	69
4.3	Wissensgenerierung durch deskriptive Analysemethoden	73
4.3.1	Problembeschreibung und Grundlagen der Datenanalyse	73
4.3.2	Datenabruf und -transformation	74
4.3.3	Datenvorverarbeitung	77
4.3.4	Methoden zur deskriptiven Datenanalyse durch Data-Mining innerhalb der Fahrzeugstruktur	80
4.3.5	Evaluation, Ergebnispräsentation und -überführung	90
4.4	Modulbildung und Abgleich der Anforderungen	92
4.4.1	Individuelle Modulbildung und -zuordnung	93
4.4.2	Gewichtung und Priorisierung	95
4.4.3	Visualisierung und Abgleich der Modulbildungen	97
4.4.4	Aggregierte Clusteranalyse durch Consensus Clustering	100
4.4.5	Gewichtete und aggregierte Clusteranalyse	103
4.4.6	Komparative Bewertung und Anforderungsabgleich	106
4.5	Darstellung des multimethodischen Verfahrens	109
5	Validierung des multimethodischen Verfahrens	111
5.1	Rahmenbedingungen und Prämissen	111
5.2	Anwendung des multimethodischen Verfahrens	113
5.3	Validierungsergebnisse und Vergleich der Modulzuordnungen	125
6	Kritische Würdigung, Reflexion und Ausblick	129
6.1	Kritische Würdigung und Reflexion	129
6.2	Ausblick	135
7	Zusammenfassung	137
8	Anhang	141
8.1	Anhang A1	141
8.2	Anhang A2	146
9	Literaturverzeichnis	147

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Einflüsse und Anforderungen, ausgelöst durch die Elektromobilität.....	2
Abbildung 1-2:	PKW-Absatz und Karosserievarianz der Mercedes-Benz AG	3
Abbildung 1-3:	Vereinfachte Darstellung des Fahrzeugentstehungsprozesses	4
Abbildung 1-4:	Aufbaustufen der Karosserie in Bezug auf die Gesamtfahrzeugfunktionen	5
Abbildung 1-5:	Auszug zum Wirkungseinfluss der Grundplattform auf die Karosseriederivate	6
Abbildung 1-6:	Weiterentwicklung der heutigen Modularisierungsstrategie zu einer zukünftigen anforderungsgerechten Modulbildung.....	9
Abbildung 1-7:	Forschungsprozess und Gliederung der Arbeit in Anlehnung an ULRICH [19].....	11
Abbildung 2-1:	Beispiel zur Ableitung konkreter grundlegender, technischer und wirtschaftlicher Anforderungen an das Problemumfeld der Karosseriestruktur	13
Abbildung 2-2:	Übersicht der Gewerke für die Fahrzeugfertigung.....	14
Abbildung 2-3:	Zusammenbauten "ZB" und Aufbaustufen "Z" - Ebenen der ZB-Aufteilung in der Produktionssequenz	16
Abbildung 2-4:	Prozessablauf im Karosseriebau in Anlehnung an [11, 27, 28]	17
Abbildung 2-5:	Vereinfachte Darstellung der Prozesse im FEP in Anlehnung an [34–38]	19
Abbildung 2-6:	Prozessfolge und Abgleich von Anforderungskategorien	23
Abbildung 2-7:	Systemvergleich mit gleicher Anzahl an Elementen in Anlehnung an [51].....	25

Abbildung 2-8:	Sechs Arten der Modularität in Anlehnung an PINE [62]	27
Abbildung 2-9:	Heckwagenderivate auf Basis der Grundplattform der Limousine.....	29
Abbildung 2-10:	Wirkung des Modularisierungsgrads auf interne und externe Aufwendungen	31
Abbildung 2-11:	Vorgehensweise der systematischen Literaturanalyse in Verbindung mit der Zitationsanalyse auf Basis ausgewählter Literaturquellen	34
Abbildung 2-12:	Forschungslücke in Bezug auf die Weiterentwicklung der Modularisierung.....	40
Abbildung 3-1:	Ablauf zur Umsetzung von Leichtbaustrategien in Anlehnung an [47]	44
Abbildung 3-2:	Entwicklung der Methodenbausteine für die Methodik	45
Abbildung 3-3:	Konzept zum multimethodischen Verfahren nach [119]	50
Abbildung 4-1:	Auswahl und Kombination der Methoden zur Anforderungserfassung.....	55
Abbildung 4-2:	Auszug der technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Anforderungen als Ergebnis der Aufgabenanalyse in Anlehnung an [34, 35].....	57
Abbildung 4-3:	Klassifikation der acht Teilaspekte zur Komplexität nach [18, 132], siehe auch Tabelle 4-2.....	61
Abbildung 4-4:	Methodisches Vorgehen zur Auswahl strategischer Anforderungen	64
Abbildung 4-5:	Übertrag der a) Anforderungs- und Funktionsableitungen und b) Produktstrukturen in die Matrizenform der c) binären DSM in Anlehnung an [133]	67

Abbildung 4-6:	Übertragbarkeit von Iterationen, logischen Folgen und Gewichtungen in die Matrizenform der DSM.....	68
Abbildung 4-7:	Auszug der Überführung von Anforderungen für den "ZB LT LI" in Matrizen	71
Abbildung 4-8:	Vorgehen zur Anforderungsmodellierung in Abhängigkeitsmatrizen (DSM).....	72
Abbildung 4-9:	Verarbeitung der Datenquellen über eine Abfragefunktion zu analysefähigen und transformierten Daten.....	76
Abbildung 4-10:	Beispiel reduzierter Produkt- und Prozessmerkmale auf acht Hauptattribute.....	78
Abbildung 4-11:	a) Programmablaufplan der Prüf- und Bereinigungsfunktion, b) Übersetzungsfunktion und Ergebnis	79
Abbildung 4-12:	Beispiel zur Ableitung einer Klassifizierung aus der Zusammenfassung.....	82
Abbildung 4-13:	Beispiel für den Vergleich definierter ZB-Umfänge mehrerer Fahrzeuge innerhalb einer Fahrzeugarchitektur durch Clustering	86
Abbildung 4-14:	Beispiel zur Assoziationsanalyse "ZB Vorbau Struktur" über 3-Item-Mengen durch den Apriori-Algorithmus in Anlehnung an [149].....	88
Abbildung 4-15:	Überführung der Baumstruktur und Abhängigkeiten in eine DSM	89
Abbildung 4-16:	Beispiel für die Aufbereitung der Data-Mining Ergebnisse zur Analyse der Fügepunkteänderungen in einer webbasierten Austauschplattform	91
Abbildung 4-17:	Beispiel für das "Partitioning" einer richtungsbasierten DSM für eine Fügefolge in zusammengefasste Module und isolierte Elemente	94

Abbildung 4-18: Beispiel zum "Clustering" einer komponentenbasierter DSM in drei Module	95
Abbildung 4-19: Beispiel zur Visualisierung und Abgleich für den ZB Heckwagen	98
Abbildung 4-20: Beispiel unterschiedlicher Komponenten und Modulgruppen durch die Modulzuordnung, Gewichtung und den Konsens	99
Abbildung 4-21: Schematische Darstellung des Consensus Clustering in Anlehnung an [171]	100
Abbildung 4-22: Schrittweise schematisches Vorgehen zur Entwicklung aggregierter DSM in Anlehnung an [173, 174]	101
Abbildung 4-23: Beispiel zur Aggregation unterschiedlicher DSM und Szenarien in einem System über das Consensus Clustering.....	102
Abbildung 4-24: Beispiel zur grafischen Zusammenfassung gewichteter Partitionen durch die gewichtete Clusteranalyse zu einem strukturierten Hypergraphen.....	104
Abbildung 4-25: Beispiel zum Abgleich gewichteter Anforderungen im "ZB Längsträger Li"	105
Abbildung 4-26: Beispiel zur Auswertung und Darstellung des Übereinstimmungsgrads für die Standardkonfiguration und Szenario 1-3.....	107
Abbildung 4-27: Zusammenfassende Darstellung des entwickelten multimethodischen Verfahrens.....	110
Abbildung 5-1: Beispiel zur Anforderungs- und Funktionsverteilung sowie konstruktiven Änderung der Hauptbodenstruktur in der Verbrenner- und Batterie-Architektur	112
Abbildung 5-2: Auflösung des "ZB Hauptboden" in a) Geometrische Modelle, b) Produktstruktur und in die c) Design Structure Matrix	115

Abbildung 5-3:	Bauteilanalyse des "ZB Querträger HI RE" zur Ableitung von Abhängigkeiten	116
Abbildung 5-4:	Ableitung der Abhängigkeiten je Anforderung in die Einheitsmatrix.....	117
Abbildung 5-5:	Änderungsverhalten der Komponenten sowie Fügetechnik in Bezug auf den "ZB Hauptboden" als Ergebnis der deskriptiven Datenanalyse	118
Abbildung 5-6:	Übertrag der Ergebnisse zur Untersuchung kritischer Änderungsumfänge in eine numerische DSM entlang der Klassifikation der Quadranten Q1-Q4	119
Abbildung 5-7:	Ableitung der Modulaufteilung durch "Clustering" für den "ZB Hauptboden"	120
Abbildung 5-8:	Ausschnitt zum Abgleich der identifizierten Modulzuordnungen zur Standardkonfiguration.....	121
Abbildung 5-9:	Ableitung einer abgeglichenen Modulzuordnung für die Hauptbodenstruktur.....	122
Abbildung 5-10:	Vergleich der Modulzuordnung und -struktur zwischen der Standardkonfiguration und dem Alternativ-Szenario	123
Abbildung 5-11:	Vergleich und Gegenüberstellung der Planungskonfiguration mit dem Alternativ-Szenario der Validierung	124
Abbildung 6-1:	Fachlich-methodische Entwicklung des multimethodischen Verfahrens mit der wissenschaftlichen Neuerung in der Abbildung 4-27	134
Abbildung 8-1:	Abgleich der Modulzuordnungen und Standardkonfiguration der Validierung	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Ausschnitt bestehender Karosserieplattformen [64]	30
Tabelle 2-2:	Vergleich bestehender Methoden zur Modulbildung nach Anforderungskategorie, Bewertungskriterien und der Verknüpfung von Produkt und Produktion	37
Tabelle 4-1:	Auszug der Ergebnisse zur Domänenanalyse und Gruppenarbeit	59
Tabelle 4-2:	Auszug aus den Analyseergebnissen zur Anforderungserfassung in Bezug auf die Karosseriestruktur und den Karosseriebau	60
Tabelle 4-3:	Vergleich bestehender Verfahren anhand festgelegter Kriterien zur einheitlichen Darstellung und Transformation der Anforderungen	66
Tabelle 4-4:	Auszug der ermittelten Ziele der Datenanalyse zur Reduktion der produkt- und produktionsseitigen Änderungen.....	75
Tabelle 4-5:	Beispiel geprüfter und manipulierter Daten der Fügepunktbelegung je ZB zur Prüfung von Ausreißern und Null-Werten	80
Tabelle 4-6:	Zusammenstellung qualitativer und quantitativer Bewertungsgrößen sowie Fokusse und Zielgrößen für Modulzuordnungen in Anlehnung an [165].....	96
Tabelle 4-7:	Beispiel zum komparativen Vergleich der Transport- und Fügekosten zwischen drei Szenarien.....	108
Tabelle 5-1:	Identifizierte Anforderungen an die batterieelektrische Karosseriebodenstruktur	114
Tabelle 5-2:	Produktionswirtschaftliche Wirkungen der Modulzuordnung der Expertenschätzung durch das Alternativ-Szenario	125

Tabelle 5-3:	Vergleich der Modulzuordnungen zwischen der Standardkonfiguration und dem gebildeten Alternativ-Szenario.....	127
Tabelle 6-1:	Erfüllungsgrad der methodischen Anforderungen an das entwickelte Verfahren sowie weiterer Forschungsbedarf	136
Tabelle 8-1:	Analyseergebnisse zur Anforderungserfassung in Bezug auf die Karosseriestruktur und den Karosseriebau	141

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design
CAX	Computer Aided x
CI	Coupling-Index
Class-B-Flächen	Für den Kunden nicht sichtbare Flächen
Crossover-Fahrzeug	Kombination verschiedener Fahrzeugbauarten
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
Design Freeze	Fixierung der Design-Spezifikationen
DSM	Design Structure Matrix
ET	Einzelteile
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
FÄQ	Fügeäquivalente
FEP	Fahrzeugentstehungsprozess
FIN	Fahrzeug-Identifikationsnummer
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
Fügeäquivalenz	Einheitliches Verhältnis der mechanischen Festigkeit des Fügeverfahrens zur Kosteneinheit
FÜP	Fügapunktanzahl
HV	Hochvolt
IQA	Interquartilsabstand
KDD	Knowledge-Discovery-in-Databases
MFD	Modular Function Deployment
Mock-up	Vorführmodell
XVI	

MPV	Multi-Purpose Vehicle
NAFTA	North American Free Trade Agreement
Package	Maßkonzeption und Raumkonzept über den Längsschnitt von Automobilen
PKW	Personenkraftwagen
QG	Quality Gate
RE	Requirement Elicitation
RoW	Rest of world
SCM	Supply Chain Management
SLT	Sonderladungsträger
SOP	Start of production
STEEPL	Akronym für Sociological, Technological, Economical, Ecological, Political und Legal
SUV	Sport Utility Vehicle
TE	Technische Einheit
ULT	Universalladungsträger
WI	Whitney-Index
ZB	Zusammenbauten
Z-Linie	Aufbaustufe im Karosseriebau

1 Einleitung

„Jeder Kunde kann ein Auto in jeder gewünschten Farbe haben, solange es schwarz ist.“ (Henry Ford)

Dieses Zitat des Automobilpioniers Henry Ford steht im Gegensatz zur heutigen Erwartungshaltung des Kunden gegenüber dem Automobil als ein individualisierbares Produkt. Nicht nur die bestehende Auswahl an Antriebsarten, Ausstattungs- sowie Modellvarianten stellen ein anspruchsvolles Umfeld dar, sondern auch neue interne und externe Einflüsse auf das Produkt und die Produktion. Diese vielfältigen Einflüsse, die Erwartungshaltung des Kunden sowie die hieraus resultierenden unternehmensinternen strategischen Entscheidungen entwickeln sich zu grundlegenden, technischen wie auch wirtschaftlichen Anforderungen an die Automobilhersteller, die durch unternehmensinterne Prozesse zu erfüllen sind. Der Inhalt dieser unterschiedlichen Anforderungen beschreibt die zu erfüllende Beschaffenheit, Fähigkeit oder Leistung in Bezug auf das Produkt oder den Produktionsprozess [1].

Dies führt dazu, dass Automobilhersteller heute in immer kürzeren Zyklen neue und angepasste Produkte auf den Markt bringen und innerhalb weniger Jahre ihr gesamtes Produktspektrum verändern müssen, um weiterhin zukunftsfähig bleiben zu können [2]. Insbesondere der steigende Bedarf an elektrischen Fahrzeugen [3] führt zu einer Zunahme bei den unterschiedlichen Anforderungen an das Produkt sowie an das produzierende Unternehmen. Die Nachfrage wird darüber hinaus durch neue Herausforderungen aus dem direkten Umfeld ergänzt [4]. Diese dynamische Ausgangssituation unterschiedlicher Fahrzeuganforderungen wird durch äußere Störfaktoren zusätzlich angespannter, wie beispielsweise eine reduzierte ökonomische Aktivität infolge der COVID-19-Pandemie oder auch geopolitische Auseinandersetzungen zeigen [3, 5]. Auch künftig werden sich grundlegende technisch-organisatorische Anforderungen bei gleichzeitig stärkeren Absatzschwankungen verändern, sodass die Notwendigkeit zur Anpassung der unternehmensinternen Produktionsstrategie weiter zunimmt [6].

Um langfristig im Umfeld der Automobilindustrie wettbewerbsfähig zu bleiben und die sich ergebenden marktwirtschaftlichen Chancen nutzen zu können, sind aufkommende Anforderungen an das Unternehmen durch die internen Entwicklungs-, Planungs- und Herstellungsprozesse zu erfüllen. Diese technisch-organisatorischen Anforderungen wirken jeweils an unterschiedlichen Funktionsstellen, sodass Lösungsansätze gezielt

an den entscheidenden Positionen und zu definierten Zeitpunkten im Unternehmen entwickelt und umgesetzt werden müssen, insbesondere unter der Beachtung aller möglichen Wirkungszusammenhänge zu angrenzenden Funktionsbereichen. Bislang können mithilfe von externen Makro-Umweltanalysen mögliche Einflüsse auf einer übergeordneten Ebene untersucht werden. Hierzu eignen sich etablierte Rahmenwerke wie die STEEPL-Analyse. Damit lassen sich Schlüsselfaktoren und wesentliche Treiber aus vordefinierten Feldern identifizieren. Die Buchstaben der Methode stehen als Akronym für *Sociological, Technological, Economical, Ecological, Political* und *Legal* und bilden jeweils einen zu untersuchenden Beurteilungsfaktor [7]. Diese äußeren Faktoren sowie die resultierenden Anforderungen verändern sich dynamisch durch die Vielzahl an Einflüssen auf das Produkt und die Produktion [8]. Demnach wirken sich Anforderungen auf den Realisierungsprozess zwischen Produkt und Produktion signifikant aus, insbesondere auf den Fahrzeugentstehungsprozess (kurz: FEP).

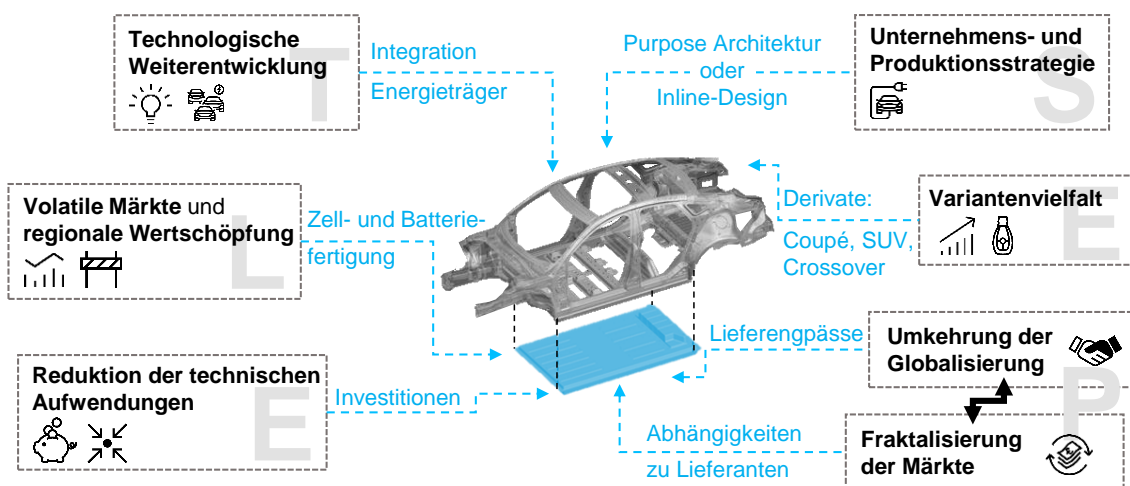


Abbildung 1-1: Einflüsse und Anforderungen, ausgelöst durch die Elektromobilität

Werden die durch die Weiterentwicklung der Elektromobilität beeinflussten grundlegenden Anforderungen an die Fahrzeugkarosserie betrachtet, zeigt sich, wie unterschiedlich diese auf denselben Bereich wirken (vgl. Abbildung 1-1). Dabei ist auf dieser übergeordneten Ebene erkennbar, dass aus dieser unstrukturierten Ansammlung von Anforderungen keine eindeutige Zuordnung zu der richtigen Funktionsstelle abgeleitet werden kann. Um dennoch die erfolgskritischen Anforderungen unter allen Einflüssen zu identifizieren und entsprechende Erfüllungsräume zu erarbeiten, liefert die vorliegende Arbeit ein multimethodisches Lösungsverfahren. Die in dieser Arbeit zugrundeliegende Ausgangssituation der Automobilindustrie sowie das entstehende Problemumfeld unabgestimmter Anforderungen an die Karosserie und den Karosseriebau werden im Folgenden vertieft.

1.1 Ausgangssituation

Schwankende Bedarfe, Produktoffensiven sowie Diversifizierungsstrategien der Automobilhersteller lassen sich durch Absatz- und Marktdaten vergangener Jahre darstellen. Wird beispielsweise der PKW-Fahrzeugabsatz der Mercedes-Benz AG von 2013 bis 2020 betrachtet (vgl. Abbildung 1-2), zeigt sich als Folge der COVID-19-Pandemie und des Halbleitern Mangels im Jahr 2019 zu 2020 neben Nachfrageschwankungen und regionalen Abweichungen im Marktwachstum in erster Linie ein Einbruch der Absatzzahlen in den westlichen Märkten (Europa und NAFTA). Auf diese Volatilität der Stückzahlenschwankungen müssen die Produktionskapazitäten der jeweiligen Produktionswerke flexibel reagieren können. Bedarfsverschiebungen der Gesamtstückzahlen sowie Fehlmengen im Absatz müssen folglich unternehmensintern ausgeglichen werden.

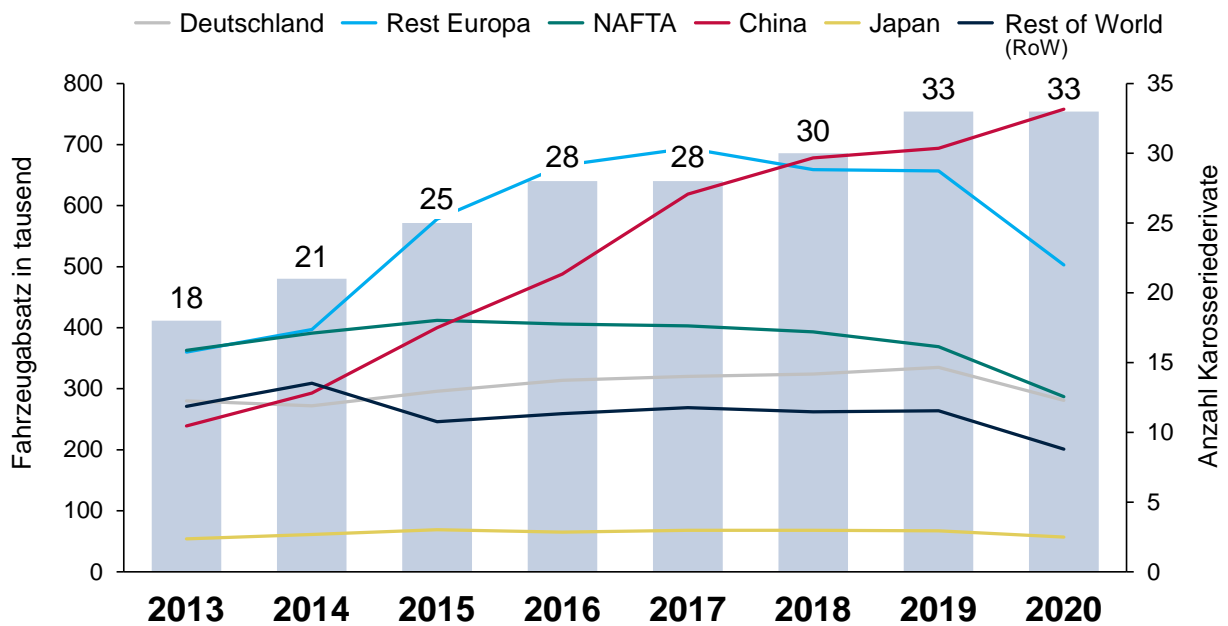


Abbildung 1-2: PKW-Absatz und Karosserievarianz der Mercedes-Benz AG

Nicht nur sich verändernde Nachfragen erschweren die Umsetzung der wirtschaftlichen Anforderungen (z. B. die Rentabilität der Produktion), sondern auch die steigende Varianz, Produktdifferenzierung und Individualisierung der Fahrzeuge infolge von Wachstumsstrategien. Allein die Anzahl der verfügbaren Grundderivate der Fahrzeugkarosserie ist so innerhalb von sieben Jahren von 18 auf 33 Karosseriederivate gestiegen. Ebenso beeinflussen neue Fahrzeugtypen (MPVs, SUVs oder Crossover-Fahrzeuge), erweiterte Karosserieformen (SUV-Cabrios, Steilheck Coupés) und auch alternative Antriebs- und Batterievarianten (paralleler und serieller Hybrid, neue Batterietechnologien) die organisatorischen und technischen Anforderungen an den FEP.

Um diese gestiegene Anzahl und Volatilität der Anforderungen innerhalb des Unternehmens beherrschbar zu gestalten, wird die Produktionsstrategie als Ausrichtung des Produktionssystems und des Organisationskonzepts stetig angepasst [8]. Die Umsetzung der Produktionsstrategie erfolgt hierbei durch das Zusammenwirken der Entwicklungs- und Planungsbereiche innerhalb der Prozessfolgen im Fahrzeugentstehungsprozess (kurz: FEP). Im FEP werden dabei alle notwendigen Prozesse der Organisation definiert, um ein neues Fahrzeug vom Konzept bis zur Serienproduktion zu realisieren. Durch die vermehrte Parallelisierung, Überschneidung und Iterationen dieser Prozessschritte sowie kurzzyklische Anpassungen der Anforderungen entsteht ein großer Einfluss auf die Prozessqualität, die Entwicklungs- und Planungskosten sowie auf die Einhaltung der Meilensteine im Projektplan (vgl. Abbildung 1-3). Der FEP wird somit die entscheidende Größe in der Ausrichtung aller Unternehmensprozesse [9].

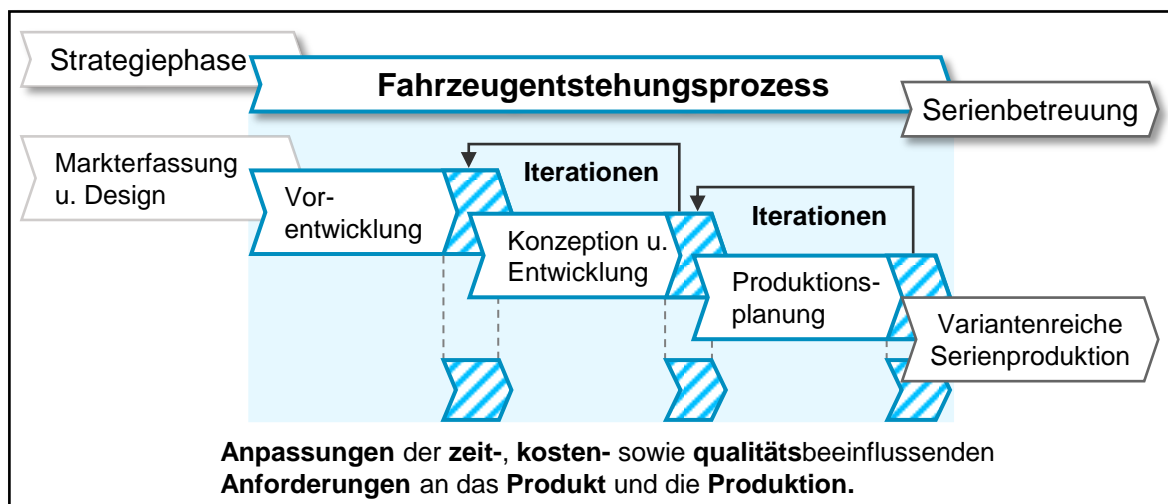


Abbildung 1-3: Vereinfachte Darstellung des Fahrzeugentstehungsprozesses

Um die grundlegenden Produkt- und Produktionsanforderungen des volatilen Umfelds der Automobilentwicklung auch zukünftig vollständig erfüllen zu können, müssen diese möglichst frühzeitig erkannt und realisiert werden [10]. Insbesondere die frühen und einleitenden Phasen des FEP gelten als kritische Erfolgsfaktoren und beeinflussen eine termingerechte Umsetzung der definierten Anforderungen. Dabei erfolgen erste maßbestimmende Anforderungen priorisiert, um nachfolgende und damit verknüpfte Prozessschritte abzusichern und um auf eine verlässliche Planungsgrundlage für Weiterentwicklungen in allen Fahrzeugphasen zurückgreifen zu können.

Das Automobil als Produkt durchläuft hierzu innerhalb der Produktion vier Teilbereiche in der Produktionskette. Die im Presswerk hergestellten Blechteile und Profile werden im Karosseriebau über den strukturellen Unterbau, den Aufbau und den Anbauteilen

zur Gesamtfahrzeugkarosserie gefügt. Je nach Ausstattung, Bauform und länderspezifischen Anpassungen werden die Fahrzeugkarossen im Karosseriebau verbindlich dem Endkunden über eine eindeutige Fahrzeug-Identifikationsnummer (FIN) zugeordnet. Somit gilt dieser Zeitpunkt als erster Entkopplungspunkt zur kundenspezifischen Produktion und damit als Start- und Knotenpunkt der Variantenbildung [10].

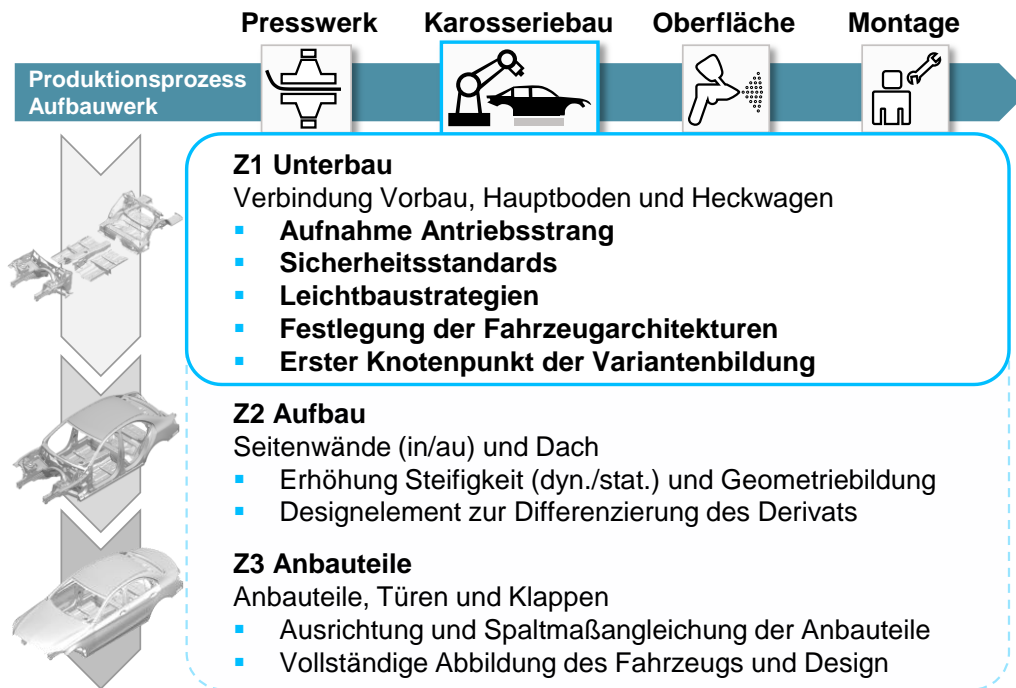


Abbildung 1-4: Aufbaustufen der Karosserie in Bezug auf die Gesamtfahrzeugfunktionen
 Insbesondere der Karosserieunterbau definiert grundsätzliche und konzeptbestimmende Rahmenbedingungen. Damit stellt dieser als erste Aufbaustufe die Basis für die Aufnahme des Antriebsstrangs, für das Erfüllen geltender Sicherheitsstandards, für die Umsetzung der Gewichtsziele sowie für die grundlegenden Parameter in der Fahrzeugarchitektur dar (vgl. Abbildung 1-4). Ebenso verantwortet der Karosseriebau durch den hohen Automatisierungsgrad und den Betrieb flächenintensiver Fertigungsanlagen einen wesentlichen Anteil der Planungsumfänge sowie -kosten [11].

Dies führt zu einer Vielzahl an kosten- und änderungswirksamen Abhängigkeiten und zu erfüllenden Anforderungen innerhalb der Karosserie sowie zu einer hohen Einflusswirkung auf die vor- und nachgelagerten Prozessschritte im Karosserie- und Automobilbau insgesamt. Der Schwerpunkt in dieser Forschungsarbeit liegt deshalb auf der Fahrzeugkarosserie und dem Karosseriebau, um letztendlich die veränderbaren und erfolgskritischen Anforderungen zu einem möglichst frühen Zeitpunkt im FEP zu ermitteln und diese in Prozessschritten mit der höchsten Einflussnahme (z. B. gegenüber den Änderungskosten etc.) zu realisieren.

In diesem Kontext können die variierenden Anforderungen an das Produkt im Umfeld der Karosseriestruktur insofern umgesetzt werden, als Einzelelemente nach Aufgaben und Funktionen in handhabbare Teilsysteme zu gruppieren sind. Feste Prämissen beeinflussen dabei die Zuordnung der Produktbestandteile zu verteilten Baugruppen. Die Kriterien, nach denen Einzelteile und Karosserieelemente zu Baugruppen zusammengefasst werden, sind jedoch nicht oder zumindest nur unzureichend auf die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktion abgestimmt. Um dennoch erfolgsabhängige Anforderungen untereinander abgleichen zu können und in allen Produktbereichen während der ersten Phasen im FEP zu verwirklichen, bedarf es des Wissens über erfolgsrelevante wirtschaftliche und technische Anforderungen. Weiterhin wird für die ganzheitliche Betrachtung der möglichen Wirkungsabhängigkeiten eine methodische Unterstützung in den o. g. frühen Phasen des FEP benötigt. Dadurch soll es möglich sein, die zukünftigen Produkt- und Produktionsanforderungen an die Karosseriestruktur durch ein geeignetes Verfahren vollständig zu erfüllen, um nachträgliche Anpassungen, nachteilige Änderungen sowie Iterationen im FEP zu vermeiden.

1.2 Problemstellung

Auch zukünftig wird sich das Umfeld der Automobilproduktion durch neue, kurzzyklische und volatile Anforderungen und Einflüsse verändern. Aus Produktsicht kann dabei die Varianz der Karosseriederivate und -formen in der Fahrzeugarchitektur über die Darstellung als Baumstruktur verdeutlicht werden (vgl. Abbildung 1-5).

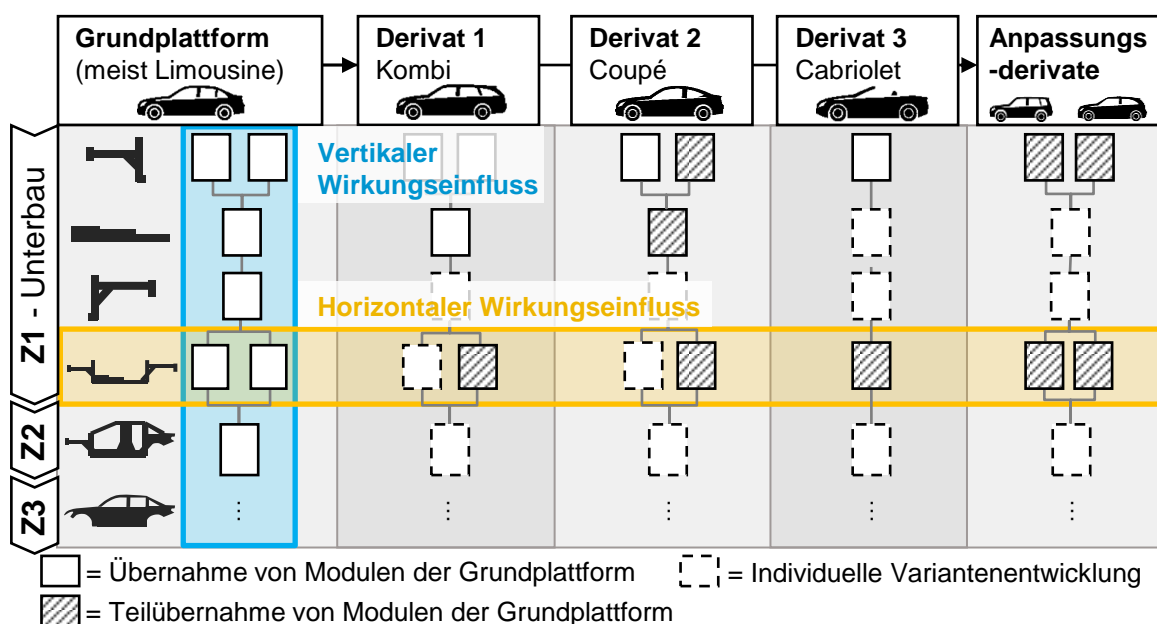


Abbildung 1-5: Auszug zum Wirkungseinfluss der Grundplattform auf die Karosseriederivate

So beeinflussen die Weiterentwicklung und der Wandel von hybriden Antrieben hin zu vollständig elektrisch angetriebenen Fahrzeugen die grundlegenden Produkt- und Produktionsanforderungen an die Variantenvielfalt in der Fahrzeugkarosserie [10, 12, 13]. Änderungseinflüsse im Unterbau der jeweiligen Fahrzeugplattform wirken demnach gleichermaßen in horizontaler (entlang der Produktderivate) und vertikaler (entlang der Produktionskette) Richtung [14]. In Abbildung 1-5 entsteht so beispielsweise ein horizontaler Wirkungseinfluss einer Grundplattform auf vier abgeleitete Derivate und auf insgesamt sieben Unterbauvarianten. Zudem besteht in vertikaler Richtung für jede dieser Varianten eine Abhängigkeit und Einflusswirkung entlang der Prozessschritte in den Aufbaustufen Z2 und Z3. Mit jeder Variante und Aufbaustufe steigt damit die Anzahl der zu berücksichtigenden Teilsysteme sowie der Produkt- und Produktionsanforderungen. Um somit den FEP in Automobilunternehmen in den frühen Phasen an neue Anforderungen und kurzzyklische Änderungen anpassen zu können, ist eine strukturierte Analyse und Umsetzung funktionsbestimmender Anforderungen aus dem externen und internen Umfeld erforderlich.

Der Anspruch dieser Arbeit und des zu entwickelnden Verfahrens liegt folglich darin, bestehende Grundanforderungen an die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems mit neuen technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an die Karosserie und den Karosseriebau vollständig abzugleichen und damit die Systemkomplexität zu reduzieren. Unter dem Begriff "Komplexität" soll hier nach der Systemtheorie die Anzahl und Vielfalt der Elemente wie auch Verknüpfungen innerhalb statischer und dynamischer Systeme unter Unsicherheit und zeitlichen Veränderungen verstanden werden [15, 16].

Zur Erfüllung eines Teils der Ansprüche wird bereits die Methode der Modularisierung genutzt. Hierbei werden Teilsysteme in Module zerlegt und durch die funktionale und physische Entkopplung der Funktionen geordneter handhabbar. Dennoch werden nur einzelne und grundlegende Anforderungen (z. B. Maßhaltigkeit, Leichtbau etc.) der Teilsysteme getrennt voneinander bearbeitet. Außerdem gibt es bis heute bei den Automobilherstellern wenig Verständnis und kaum Einigung darüber, was eine Modularisierungsstrategie wirklich bedeutet [17]. Dabei kommt es zu einem verringerten Erfüllungsgrad der Anforderungen bei gleichzeitig höheren Abstimmungsbedarfen. Folglich entstehen gegenläufige Abhängigkeiten, die schließlich zu Kompromissen auf Kosten geringer priorisierter Anforderungen führen [18]. Konventionelle Vorgehensweisen und bestehende Ansätze der Modularisierung bilden lediglich individuelle Einzellösungen für jede neue Anforderung und führen neben einer verringerten Planungsgenauigkeit

zu wirtschaftlichen Mehraufwendungen durch erhöhte Planungsbedarfe. Gleichzeitig sinkt durch bislang nicht bekannte Anforderungen die Kompatibilität der bereits gesetzten Produkt- und Produktionsmodule und Änderungen am Produkt oder Prozess führen somit durch die parallelisierten und eng verknüpften Entwicklungs- und Planungsprozesse zu weiteren termin-, zeit- und qualitätskritischen Anpassungen. Diese Anpassungen führen innerhalb der Entwicklungs- und Planungsprozesse zu einer Zunahme der Planungszeiten, einer höheren Mitarbeiterauslastung und damit zu steigenden Personalkosten der indirekten Mitarbeiter. Entwickeln sich aus der verringerten Planungsgenauigkeit (Detaillierung der notwendigen Funktionen) dann Fehler in der Produktentwicklung oder in der Produktionsplanung, entstehen zudem Nacharbeitskosten in Form von Ausschusskosten sowie nachträglichen Investitionskosten.

Durch die unzureichende Adaptionmöglichkeit bisheriger Methoden an variable und funktionsrelevante Anforderungen erfolgt daher keine ganzheitliche Abstimmung unter produktionswirtschaftlichen Zielgrößen (Kosten, Zeit und Ergebnisqualität). Konkret folgen somit als Konsequenz des mangelnden Abgleichs und der Umsetzung veränderlicher Grundanforderungen neben Investitionskosten für Umbaumaßnahmen oder neuen Produktionsanlagen ebenfalls konstruktive Restriktionen in der Produktentwicklung und im Design. Des Weiteren können daraus entstandene zeitkritische Änderungen zu einer Anpassung gesetzter Meilensteine im Projektplan oder zu einer Verschiebung des geplanten Produktionsstarts und zu zusätzlichen Material-, Lager- und Transportkosten durch nicht produzierte Einheiten führen. Folglich werden mithilfe bestehender Methoden zur Reduzierung der Komplexität innerhalb des Fahrzeugentstehungsprozesses neue, erfolgskritische und kurzfristig auftretende Anforderungen in einem künftig noch volatileren Umfeld kaum mehr zu erfüllen sein.

Um die Planungsgenauigkeit in den frühen Phasen des FEP zu erhöhen und methodisch geführt die technischen sowie wirtschaftlichen Anforderungen abstimmen zu können, bedarf es einer Weiterentwicklung der bisherigen Lösungsansätze zur Modularisierung in den Entwicklungs- und Planungsprozessen der Automobilindustrie. Das zu entwickelnde Verfahren muss nicht wie bisher Module auf der Grundlage einzelner Anforderungen berücksichtigen, sondern muss die technisch-organisatorischen und wirtschaftlichen Anforderungen vollständig abgestimmt und anpassbar in den Prozess der Modulbildung überführen. Damit können frühzeitig änderungsrobuste Module entwickelt werden und durch die damit erhöhte Planungsgenauigkeit eine Reduktion der Fixkosten wie Anlageninvestitionen oder Flächenkosten erfolgen. Mit der Identifikation

erfolgskritischer Einflussfaktoren zu einem möglichst frühen Zeitpunkt im FEP können anforderungsgerechte Produkt- und Produktionsmodule mit einer reduzierten Komplexität, höheren Qualität und einer genaueren Aussagekraft gegenüber dem Einfluss auf produktionswirtschaftlichen Zielgrößen gebildet werden.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Die Problemstellung in Bezug auf die Karosseriestruktur und den Karosseriebau liegt somit im Fehlen der methodischen Weiterentwicklung der bisherigen Modularisierungsstrategie, um anforderungsgerecht Module zu bilden und diese in produktabhängige (individuelle) und produktunabhängige (wiederverwendbare) zu unterscheiden (vgl. Abbildung 1-6). Der Begriff der anforderungsgerechten Modulbildung stellt somit eine spezifische und fokussierte Orientierung zur Anordnung von Elementen in Module nach definierten und aktuellen technologischen wie auch wirtschaftlichen Maßstäben dar. Hieran lässt sich auch die Forschungslücke festmachen, die diesbezüglich durch ein neu zu konzipierendes Verfahren geschlossen werden soll.

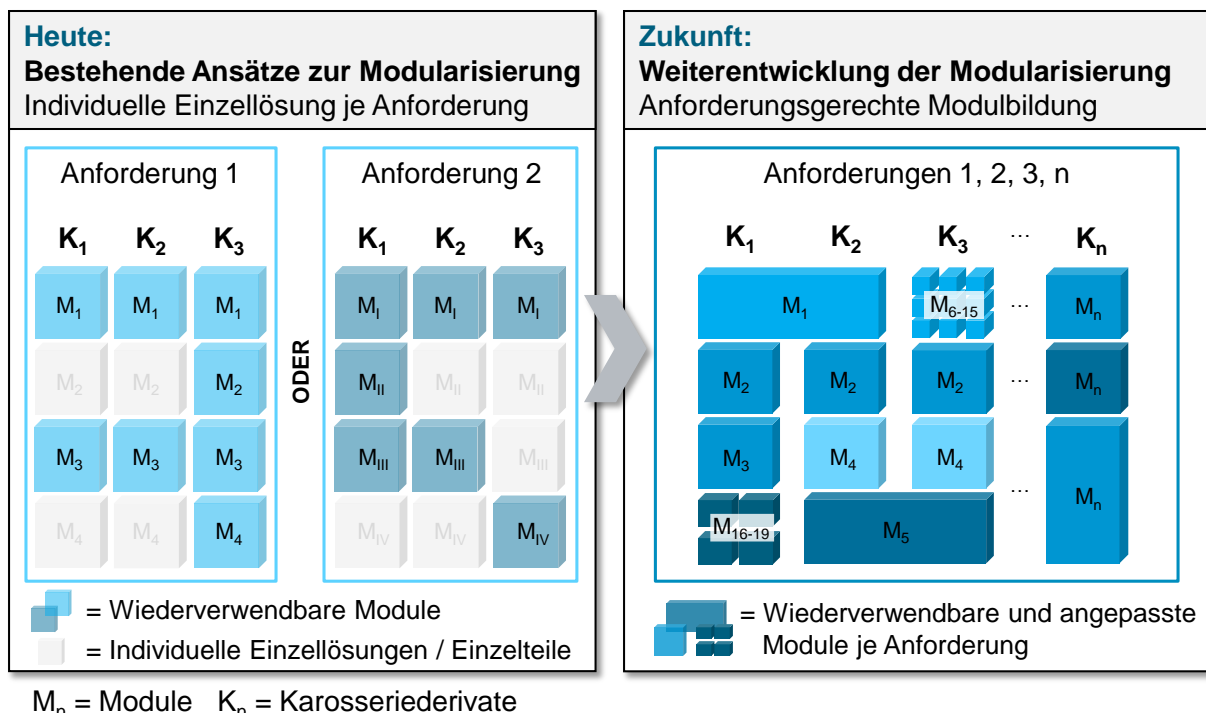


Abbildung 1-6: Weiterentwicklung der heutigen Modularisierungsstrategie zu einer zukünftigen anforderungsgerechten Modulbildung

Heutige Ansätze zur Modularisierung leiten bislang für jede vordefinierte Anforderung eine eigenständige und individuelle Einzellösung ab (vgl. Abbildung 1-6). Zwar können daraus erste Modulzuordnungen in den Karosseriederivaten gebildet werden, aber

ohne einen Abgleich oder die Abstimmung bestehender Wechselwirkungen zwischen den Modulbildungen für jede Anforderung zu ermöglichen. Übereinstimmende und damit wiederverwendbare Module (z. B. M_1 in Abbildung 1-6) zwischen den Derivaten entstehen folglich zufällig oder durch die Erfahrung der Domänenexperten und nicht durch ein methodisch geführtes Vorgehen oder den Einbezug von Produkt-, Prozess- und Produktionsdaten. Es wird lediglich eine punktuelle und nicht abgestimmte Einflusswirkung auf die einzelnen produktionswirtschaftlichen Größen erzielt, sodass kurzfristige Anpassungen meist hohe Änderungskosten und zeitkritische Modifikationen auslösen. Dadurch lässt sich die Komplexität der Module und Systeme durch die derzeitigen Ansätze zur Modularisierung nur begrenzt vermindern.

Um zukünftig aus einer Vielzahl an neuen und veränderlichen Anforderungen abgestimmte Module reduzierter Komplexität abzuleiten und Synergien zwischen den Anforderungen sowie den Karosseriederivaten nutzbar zu gestalten, bedarf es einer Weiterentwicklung der Modularisierung. Durch eine angepasste Modulbildung werden identifizierte Baugruppen über mehrere Karosseriederivate standardisiert, um beispielsweise eine Reduzierung der Fixkosten durch mehrfach und variantenübergreifend einsetzbare Module (M_2 in Abbildung 1-6) zu erreichen. Gleichzeitig ist es möglich, aus gegensätzlichen Anforderungen individuelle und produktabhängige Module zu bilden (M_{16-19} in Abbildung 1-6) und variantenspezifische Eigenschaften zu erfüllen.

Das Ziel der Arbeit ist es somit, ein multimethodisches Verfahren zur Überführung vollständig abgestimmter technisch-organisatorischer sowie wirtschaftlicher Anforderungen für den Prozess der Modulbildung zu entwickeln. Mit der Identifikation erfolgskritischer Anforderungen zu einem frühen Zeitpunkt im FEP können auf diese Weise neue Produkt- und Produktionsmodule gebildet werden. Auch unter dem Einbezug von ungenutzten sowie impliziten Wissen kann darüber hinaus auf kurzfristige Anpassungen frühzeitig reagiert werden. Die in der Industrie erkannte Wissenslücke liegt somit zwischen den heutigen Ansätzen und den derzeitigen Methoden zur Modularisierung sowie der zukünftig stark präferierten Zielsetzung, die Modulbildung anforderungsgerechter gestalten zu müssen (vgl. Abbildung 1-6). Damit soll ein Beitrag zur Reduktion der Entwicklungs- und Planungszeit innerhalb der Karosseriestruktur und des Karosseriebaus geleistet werden. Zudem erfolgt durch die Erhöhung der Planungsgenauigkeit und -sicherheit gegenüber kurzzyklischen Änderungen insbesondere eine Verringerung der (indirekten) Personalkosten wie auch der Investitionskosten für nachträgliche Umbaumaßnahmen der Fertigungsanlagen.

1.4 Forschungskonzeption und Aufbau der Arbeit

Durch das beschriebene Problemumfeld aus der betrieblichen Praxis ist es erforderlich, die vorliegende Problemstellung wissenschaftstheoretisch einzuordnen und einen passenden methodischen Forschungsansatz zur Lösungsfindung zu definieren. Durch die Verknüpfung von induktiven und deduktiven Vorgehensweisen sind die relevanten Methoden zur Lösung der erkannten Probleme im FEP zu erarbeiten. Damit ist für die Ergebnisse der Forschungsarbeit neben dem Erkenntnisgewinn die Umsetzbarkeit der entwickelten Methodik nachzuweisen. Die Verknüpfung von praktischen Erkenntnissen und angewandter Wissenschaft wird daher im Rahmen dieser Arbeit genutzt. Der Aufbau und die Gliederung der Arbeit orientieren sich demnach an den sieben Phasen des Forschungsprozesses nach ULRICH [19], dargestellt in Abbildung 1-7.

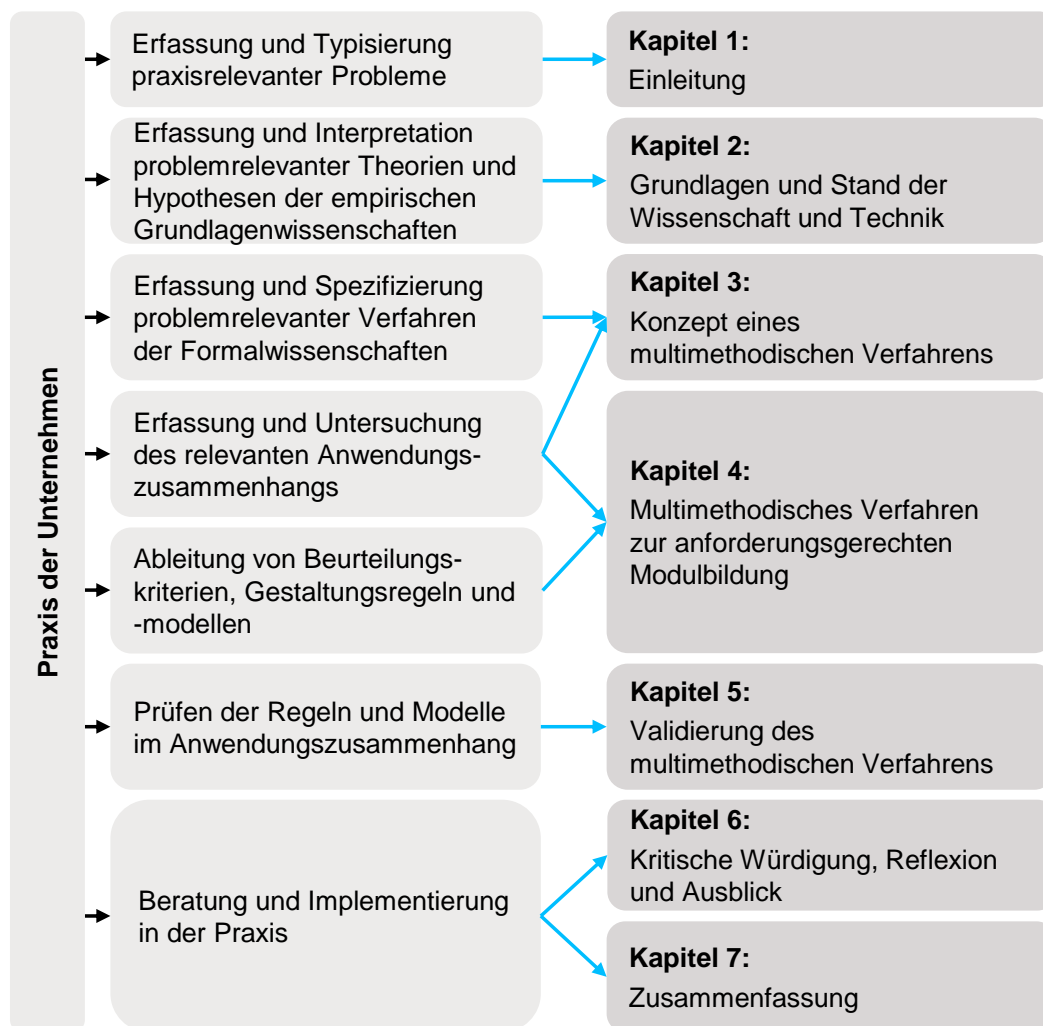


Abbildung 1-7: Forschungsprozess und Gliederung der Arbeit in Anlehnung an ULRICH [19]
 Aus der induktiv empirischen Erfassung praxisrelevanter Probleme innerhalb der Automobilindustrie und der Karosseriestruktur ist bereits die Einleitung als **erstes Kapitel**

erfolgt. Hierbei wird die Problemstellung der Arbeit aus der Ausgangssituation sowie der Erfüllbarkeit der zu bedienenden fachlich-methodischen Anforderungen im Kontext zum eingegrenzten Umfeld abgeleitet.

Kapitel 2 dient der Identifikation und Analyse der bestehenden Lösungsansätze aus dem derzeitigen Stand der Wissenschaft und Technik. Hierzu werden Grundlagen und notwendige Begrifflichkeiten der Automobilentwicklung erläutert sowie das Verständnis zur Modularisierung in der Literatur aufgezeigt. Durch die dabei hierausgearbeiteten Defizite bei den derzeit angewendeten Methoden kann die wissenschaftliche Forschungslücke verdeutlicht, der Forschungsbedarf benannt sowie die daraus abgeleiteten Forschungsfragen formuliert werden.

Dabei sind grundlegende Überlegungen zum Lösungsansatz und das Konzept für die zu entwickelnde Methodik Gegenstand des **Kapitels 3**. Dazu erfolgt die Kombination etablierter und angepasster Methoden der Formalwissenschaften in einem neuen Konzept, um das multimethodische Verfahren entwickeln zu können. Damit werden problemrelevante Methoden erschlossen und entsprechend dem Bedarf angepasst, um eine anforderungsgerechte Modulbildung zu gewährleisten.

In **Kapitel 4** findet die Detaillierung, Beschreibung und Erklärung des multimethodischen Verfahrens zur Bildung von anforderungs- und damit bedarfsgerechten Modulen statt. Dabei werden die einzelnen Methodenbausteine der Erfassung, Vereinheitlichung, Wissensgenerierung sowie des Abgleichs gegensätzlicher und übereinstimmender Module erläutert. Hieraus ist es dann möglich, eine Validierung für den festgelegten Betrachtungsbereich der Fahrzeugkarosserie zu konzipieren.

In Bezug auf die Fahrzeugkarosserie wird diese Validierung in **Kapitel 5** in einem Automobilkonzern innerhalb einer vollelektrischen Fahrzeugarchitektur durchgeführt. Die Validierungsergebnisse in Form eines alternativen Planungsszenarios und die abgeleiteten Handlungsempfehlungen zur Modulbildung bestätigen dabei das erfolgreiche Erreichen der Zielsetzung des neuartigen multimethodischen Verfahrens.

Auf der Grundlage der praxisnahen Validierung wird in **Kapitel 6** die kritische Würdigung und Reflexion des entwickelten multimethodischen Verfahrens durchgeführt und ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

Abschließend werden in **Kapitel 7** die vorangegangenen Kapitel und Ergebnisse der Forschungsarbeit zusammengefasst.

2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft und Technik

Im folgenden Kapitel werden der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik in Bezug auf die vorliegende Problemstellung im Bereich der Karosserieentwicklung und Karosseriebauplanung in der variantenreichen Serienfertigung beschrieben. Um ein einheitliches Verständnis über Begrifflichkeiten und bestehende Konzepte zu schaffen, werden die Grundlagen zur Fahrzeugfertigung, zum Fahrzeugentstehungsprozess sowie zur Methode der Modularisierung erläutert. Damit wird die grundsätzliche methodische Anforderung an die Weiterentwicklung der bisherigen Ansätze zur Modularisierung zusätzlich begründet und präzisiert. Aufgrund bereits erkannter Defizite aus den bisherigen Lösungsansätzen der Wissenschaft und Praxis wird darüber hinaus die Relevanz zur Analyse der Methoden zur Modularisierung bestätigt.

Insbesondere der Begriff der "Anforderung" wird im Kontext der Fahrzeugstruktur, des Fahrzeugentstehungsprozesses und der Modularisierung über die Einteilung in technische sowie wirtschaftliche Anforderungen hinaus im Detail definiert. Damit ergibt sich eine Grundlage, um entsprechend der übergreifenden Makro-Umweltanalyse aus Kapitel 1.1 eine weitere und differenzierte Betrachtungsebene sowie eine Beschreibung der Anforderungen in Bezug auf das Problemumfeld der Karosserie abzuleiten (vgl. Abbildung 2-1).

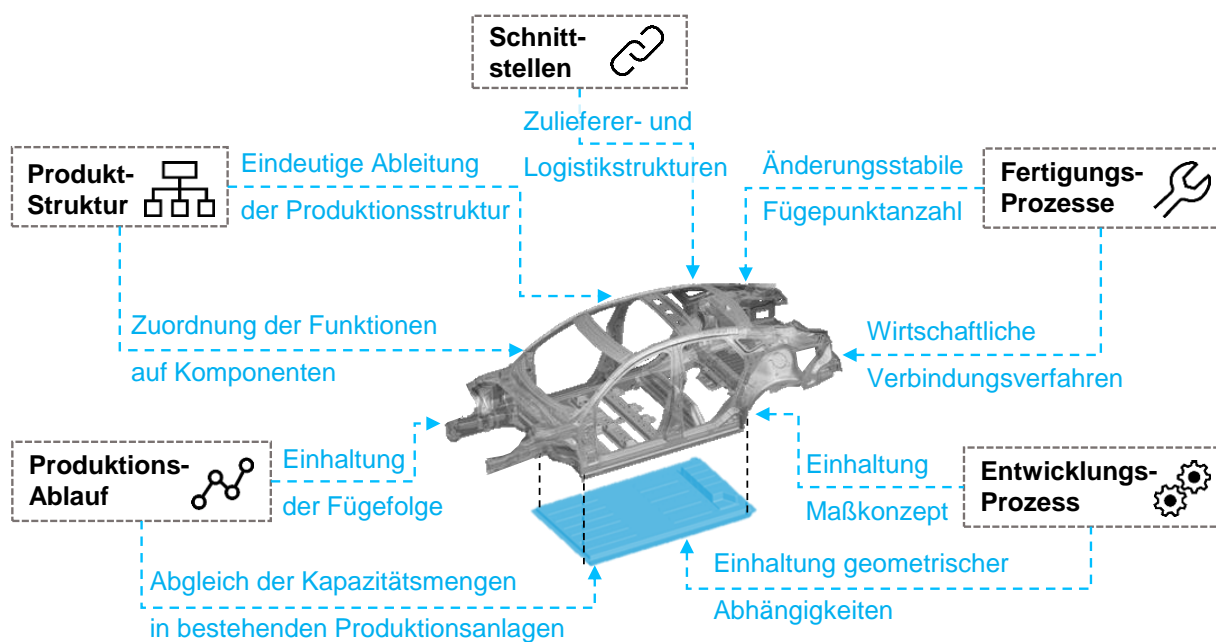


Abbildung 2-1: Beispiel zur Ableitung konkreter grundlegender, technischer und wirtschaftlicher Anforderungen an das Problemumfeld der Karosseriestruktur

2.1 Fahrzeugproduktion in der variantenreichen Serienfertigung

Die Fahrzeugproduktion innerhalb der variantenreichen Serienfertigung mit einer jährlichen Ausbringungsmenge von etwa 500.000 Einheiten [20] wird durch vier aufeinander aufbauende Gewerke bestimmt (vgl. Abbildung 2-2). Der dafür typisch eingesetzte selbsttragende Aufbau in Stahlschalenbauweise bedingt die Herstellung von Komponenten aus dem Presswerk. Hierzu werden aufgerollte Bleche (auch Coils genannt) gerade gewalzt und zu Platinen zugeschnitten, um durch mehrstufige Umformoperationen diese zu Fertigteilen und Halbzeugen zu formen [20]. Durch das Ineinanderrücken der entstandenen Blechschalen unterschiedlicher Stärke auf eine tragende Struktur entsteht im Karosseriebau die fertige Fahrzeugkarosse. Dieser Abschnitt der Fertigungskette stellt den produktionsseitigen Fokus der Arbeit dar und wird in Kapitel 2.1.2 näher erläutert.

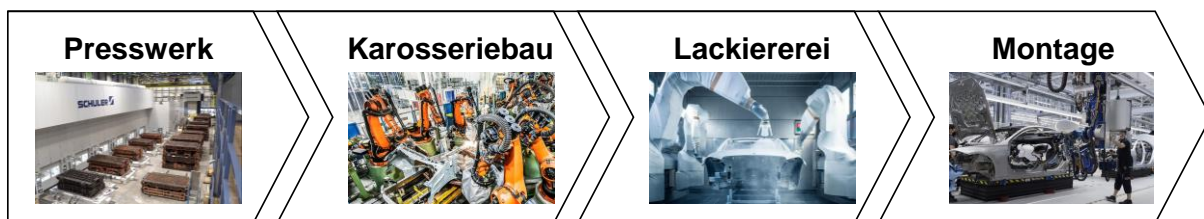


Abbildung 2-2: Übersicht der Gewerke für die Fahrzeugfertigung

Im nachfolgenden Prozessschritt der Lackiererei wird die Oberfläche der Fahrzeugkarosserie samt Türen und Klappen veredelt. Hierzu erhält die Karosserie durch Tauchbäder den Korrosionsschutz und durch hochautomatisierte Lackierstraßen die vom Endkunden gewählte Außenfarbe. In der Montage findet dann der letzte Fertigungsabschnitt statt. Vom Motoreinbau bis zum Interieur wird das Fahrzeug durch zahlreiche Vormontagen und der Endmontagelinie komplettiert und fertiggestellt. Abschließend erfolgt die Freigabe für den Verkauf oder die Auslieferung an den Endkunden durch die Fahrzeugendabnahme und -prüfung.

2.1.1 Grundlagen und Aufbau zur Karosseriestruktur

Für die Fahrzeugfertigung stellt die Karosseriestruktur das zentrale Kompetenzfeld dar und ist ein erfolgskritischer Prozessschritt in der Produktentwicklung und bei der Produktionsplanung [14, 21]. Die Karosseriestruktur besteht dabei aus den drei großen Baugruppen Vorbau, Hauptboden und Heckwagen (vgl. Abbildung 1-4). Der Karosserievorbau entsteht hierbei hauptsächlich aus dem Längsträgeraufbau in Verbindung

mit dem Radeinbau sowie der Stirnwand. Für den Fall einer Frontalkollision führen die aufgenommenen Kräfte zu einer kontrollierten Verformung und werden über die Längsträger in den Hauptboden abgeleitet. Der Hauptboden selbst bestimmt maßgeblich die Skalierung der Innenraummaße und trägt als tragendes Bauteil zur Sicherstellung der Steifigkeit in der Karosserie bei. Der hintere Teil der Fahrzeugkarosse ist als Heckwagen bekannt und sorgt neben der Sitzpositionierung im Fahrzeugfond für die eindeutige Charakterisierung des Fahrzeugs und die Derivatebestimmung. So unterscheiden sich die Karosseriebauformen Cabrio, Kombi, Limousine und Coupé einer Baureihe durch die fahrzeugspezifische Gestaltung des Heckwagens [14].

Die Karosseriestruktur bestimmt daher mit dem strukturgebenden Aufbau die maßkonzeptionellen Vorgaben und die Aufnahme der technischen Komponenten sowie strukturelevanten Anforderungen [20, 22]. Folglich besitzt die erste Aufbaustufe, wie bereits in Abbildung 1-4 verdeutlicht, die höchste Einflusswirkung aufgrund der Umsetzung funktionaler Anforderungen in den frühen Phasen der Produktentwicklung und der Planungsprozesse im Karosseriebau. Dabei erfüllt die Karosseriestruktur eine Vielzahl an grundlegenden technisch-organisatorischen Anforderungen:

- Aufnahme der statisch und dynamisch wirkenden Kräfte und Momente,
 - Auslegung der Karosserie nach geltenden Sicherheitsstandards,
 - Festlegung der Gewichts-, Material- und Fügetechnikziele,
 - Gestaltung des Platznutzungskonzepts (Package),
 - Aufnahme der Antriebsaggregate sowie Achsmodule und
 - Bildung einer Fahrzeugarchitektur für die Derivate- und Variantenbildung.
- [20–24].

Um diese Grundanforderungen an die Karosseriestruktur zu erfüllen, werden die technischen Anforderungen in Teilanforderungen sowie Funktionen gegliedert und den jeweiligen Komponenten und Baugruppen zugeordnet. Die entstandenen Baugruppen, auch Zusammenbauten (kurz: ZB) genannt, werden dabei in Module organisiert und strukturiert. Ein Modul, als Teil eines übergreifenden Systems, besteht aus einem Einzelteil oder ZB zur Erfüllung von (Teil-) Anforderungen und Funktionen (vgl. Abbildung 2-3). **Funktionen** legen hierzu eine zu erbringende Aufgabe an ein spezifisches Bauteil fest, während **Anforderungen** die Beschaffenheit, Fähigkeit oder Leistung an das gesamte Produkt oder vielmehr das Zusammenwirken der Baugruppen definieren. Um aus den Einzelteilen (kurz: ET) und ZB eine fertige Karosse zu bilden, durchlaufen

diese die in Abbildung 2-3 dargestellte Prozessfolge und Produkt-Ebenen [25]. Je nach Anforderung, Teilanforderung und Funktion bilden sich durch das stufenweise Fügen und Zusammenfassen in Aufbau-Richtung die Unter-, Haupt- und Groß-ZB.

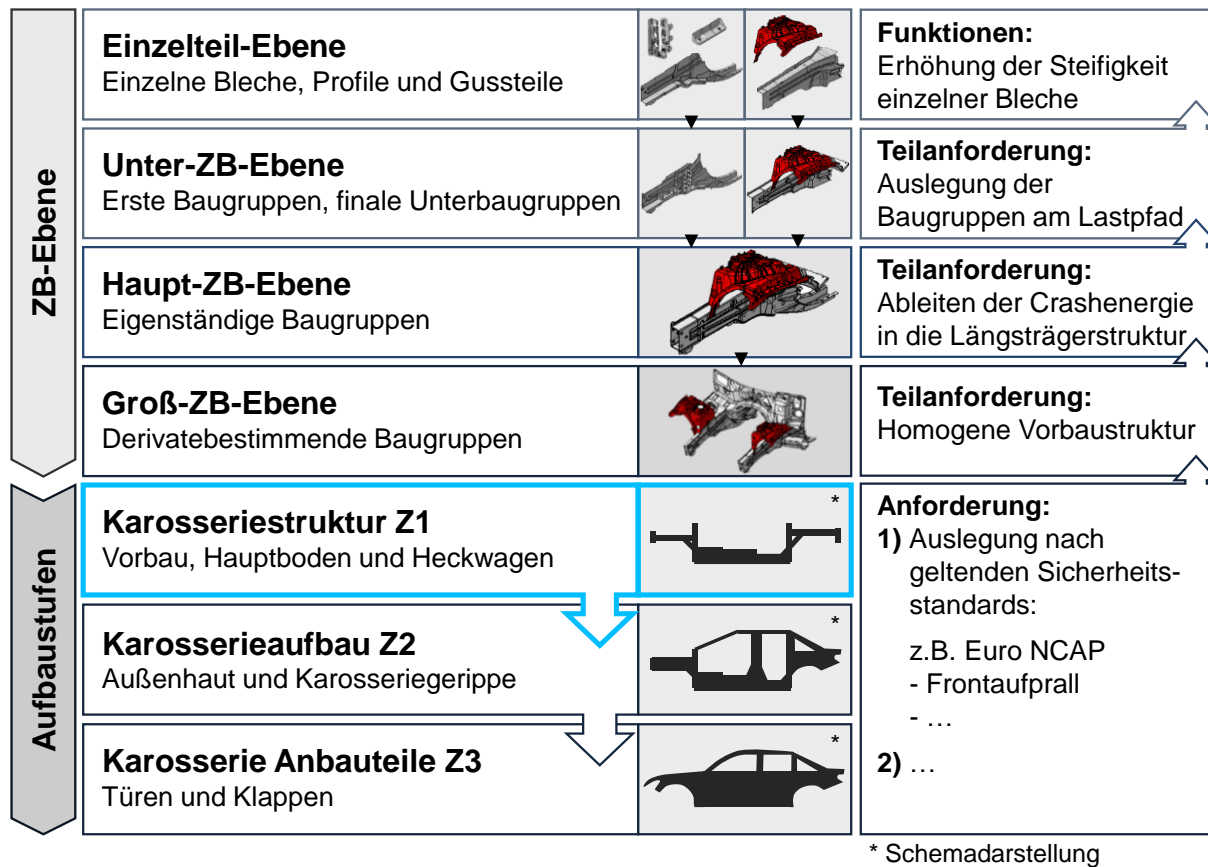


Abbildung 2-3: Zusammenbauten "ZB" und Aufbaustufen "Z" - Ebenen der ZB-Aufteilung in der Produktionssequenz

Durch die enge Verknüpfung der Anforderungen und Funktionen mit den ET und ZB im Produkt entsteht folglich eine starre und änderungssensible Produktstruktur. Neue, veränderliche oder geänderte Anforderungen betreffen somit nicht nur die auf der Grundstruktur basierenden Derivate und Varianten (vgl. Abbildung 1-5), sondern ebenfalls die ZB-Ebenen, Teilanforderungen und Funktionen der verbundenen Prozessfolge (vgl. Abbildung 2-3). Daher besitzen insbesondere Module der ersten Aufbaustufe der Karosseriestruktur eine hohe Einflusswirkung auf die produktionswirtschaftlichen Ziele der Zeit- und Kostenreduktion sowie Qualitätsverbesserung [10].

In diesem Zusammenhang gewinnt das Thema der Anpassbarkeit der Produktstruktur an künftige technische und wirtschaftliche Anforderungen zunehmend an Bedeutung. Durch eine frühe und vollständige Umsetzung der abgestimmten Grundanforderungen werden nicht nur die Projektkosten (z. B. Investitionskosten, Personalkosten indirekter Mitarbeiter etc.) reduziert, sondern ermöglichen auch für die Schnittstellenbereiche der

Produktion (z. B. bei der Lieferantenintegration) genauer planbare Produktmodule durch einen höheren Produktreifegrad.

2.1.2 Produktion der Fahrzeugkarosserie durch den Karosseriebau

Die Herstellung der Fahrzeugkarosserie durch den Karosseriebau wird als eine wesentliche Kernkompetenz der Automobilindustrie angesehen [11]. Nicht nur der hohe Anteil an Eigenleistung der Unternehmen von 80-100 %, sondern auch der fertigungsbedingte hohe Automatisierungsgrad führt zu der besonderen Stellung des Karosseriebaus im Gesamtprozess der Fahrzeugfertigung. Aus den ET und ZB werden die für den Karosseriebau erforderlichen Produktionsanlagen abgeleitet und in die Produktionslinie eingeordnet [14, 26]. Die entsprechende Hauptlinie wird analog den Aufbau-stufen in drei Linien unterteilt: Z1-, Z2- und Z3-Linie (vgl. Abbildung 2-4). Die genaue Aufbaureihenfolge der Karosserie und ZB kann hierzu je nach Unternehmen und Karosseriebauweise in einzelnen Punkten variieren [27].

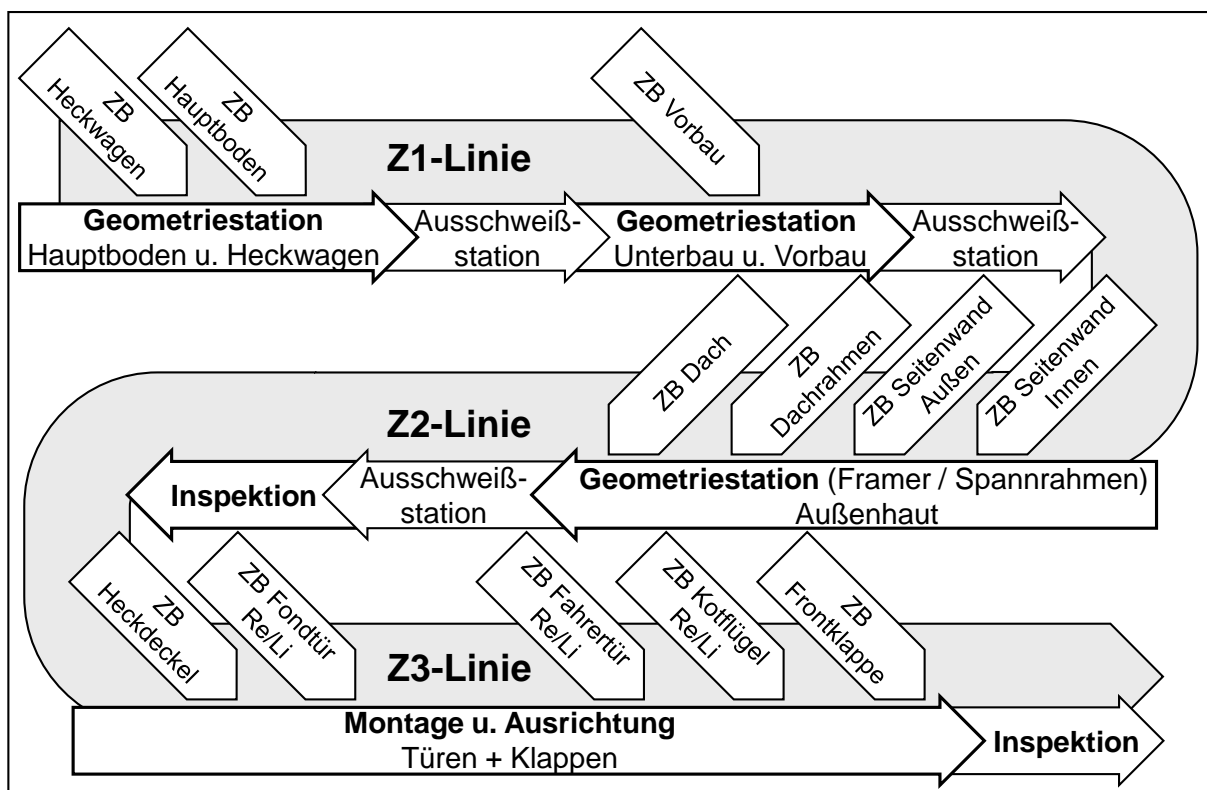


Abbildung 2-4: Prozessablauf im Karosseriebau in Anlehnung an [11, 27, 28]

Innerhalb einer Produktionsanlage befinden sich einzelne Stationen, die selbst wiederum in Teilsysteme (Verbindungstechnik, Handling, Spannsysteme) sowie Subsysteme (Schweißen, Kleben, Falzen) unterteilt werden können [29]. Damit wird jedes

Produktmodul in einem individuellen Verbund von Produktionsmodulen durch spezifische Fügeoperationen gefertigt [30–32]. Dadurch entstehen entlang der Hauptfertigungslinie (Z1-, Z2- und Z3-Linie) nach dem Fischgrätenprinzip aus Nebenlinien weitere Komponenten, Unterbaugruppen und ZB (vgl. Abbildung 2-4) [11].

In der ersten Aufbaustufe (Z1) werden neben den ersten Einzelteilen auch die drei Groß-ZB zur Karosseriestruktur verbunden. Über die durchgängige Längsträgerstruktur bilden der Vorbau, Unterboden und Heckwagen eine produkt- und kundenspezifische Einheit und damit den Startpunkt der Varianz sowie Form- und Lagetoleranzen für alle nachfolgenden Prozessschritte. Auf dieser Struktur erfolgt dann in der Z2-Linie der Karosserieaufbau durch das Anfügen der inneren und äußeren Seitenwände sowie der Dachstruktur. Über feste Spann- und Fixierrahmensysteme entsteht darauf die erste kundenwahrnehmbare Varianz durch die formgebende Erscheinung des Exterieurs. Im letzten Schritt vervollständigt die dritte Aufbaustufe (Z3) die Fahrzeugkarosserie durch die Montage aller Anbauteile (Türen und Klappen) sowie die Ausrichtung der Spaltmaße vom Heck an in Richtung der Fahrzeugfront.

Grundsätzlich wird im Karosseriebau zwischen Geometriestationen zur Erfüllung der geometrischen Maßhaltigkeit von Baugruppen sowie komplettierenden Ausschweiß-Stationen unterschieden [27]. Diese grenzen sich über die Anzahl an Fügepunkten im Prozess ab, wobei die geometrische Maßhaltigkeit weniger Schweißpunkte benötigt. In Abhängigkeit von Kriterien wie Wirtschaftlichkeit, Aufbauart und eingesetzte Werkstoffe entsteht die Zuordnung der Fügeverfahren, um die technischen Grundanforderungen an beispielsweise die Festigkeit, Dichtigkeit sowie Spannungsverteilung der gefügten Teile zu gewährleisten. Hierzu wird zwischen punktuellen, linienförmigen und flächenhaften Fügeverfahren differenziert [27]. Das in der Serienfertigung hauptsächlich eingesetzte Widerstandspunktschweißen [11] wird häufig durch weitere Fügeverfahren wie dem Laserschweißen, Durchsetzfügen oder Kleben ergänzt. Hieraus ergeben sich neben technologischen Anforderungen an varianten- und derivativespezifische Produktionsanlagen ebenfalls Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit der Verfahren durch karosseriebauspezifische Kennzahlen (z. B. Fügeäquivalente).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass neue Derivate und Änderungen am Produkt oder an die Produktion im Umfeld der Karosserie nur unter hohen technischen und wirtschaftlichen Aufwendungen oder durch die frühzeitige Einbindung in den Planungsprozess zu bewältigen sind. Grund dafür sind die eng verknüpften Prozessfolgen sowie

die starre Produktstruktur (vgl. Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4). Neue Anforderungen besitzen somit einen direkten Wirkungseinfluss über den verbundenen Aufbau der ZB-Stufen auf die gesamte Struktur und Zusammensetzung der Produktmodule sowie den generellen Produktreifegrad. Ebenfalls beeinflussen Unsicherheiten und Fehler bei der Auslegung des Karosseriebaus die vor- und nachgelagerten Prozessschritte der Fahrzeugfertigung sowie die sich dabei einstellenden, vielfältigen Kostenarten. Damit stellt die Planung dieser hochautomatisierten und investitionsintensiven Produktionsanlagen [11] und Produkte einen kritischen Erfolgsfaktor hinsichtlich der Auswirkungen durch kurzzyklische Änderungen dar [31].

2.2 Entwicklungs- und Planungsprozesse für Karosserien

Der Fahrzeugentstehungsprozess (FEP) bildet die Entwicklungs- und Planungsgröße für jede Neu- und Anpassungsentwicklung in der Automobilbranche. Dabei vereinigt der FEP gleichberechtigt die Entwicklungs- und Planungsprozesse innerhalb der produktseitigen Fahrzeugkarosserie sowie des produktionsseitigen Karosseriebaus.

2.2.1 Entwicklungs- und Planungsprozess in der Automobilindustrie

Generell basiert der FEP in der Automobilindustrie auf etablierten Ansätzen aus der Industrie und orientiert sich an bekannten Vorgehensweisen sowie branchenunabhängigen Richtlinien wie der VDI 2221 [33].

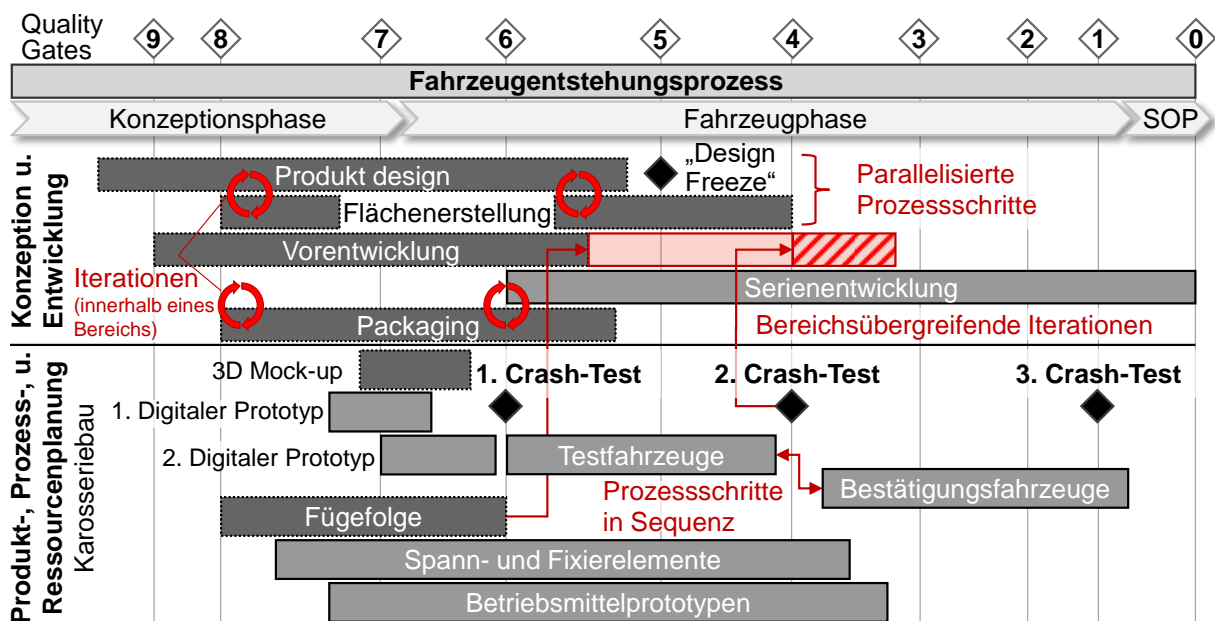


Abbildung 2-5: Vereinfachte Darstellung der Prozesse im FEP in Anlehnung an [34–38]

In Abhängigkeit zum entsprechenden Marktumfeld und dem Fahrzeugsegment werden diese Ansätze an die spezifischen Bedürfnisse der Unternehmen angepasst und durch zusätzliche Funktionsumfänge ergänzt. Die Organisation in der Automobilindustrie erfüllt dabei phasenweise die benötigten Arbeitsschritte. Grundsätzlich durchläuft die Planungs- und Entwicklungsleistung im FEP drei übergreifende Phasen: Konzeptionsphase, Fahrzeugphase und den Produktionsstart (SOP), dargestellt in Abbildung 2-5.

Die Erprobung und Entwicklung erster Fahrzeugkonzepte und Produktarchitekturen findet daher auf Grundlage strategischer Prämissen, Absatzplanungen und Kostenvorgaben statt. Zu Beginn des FEP werden in der Vorentwicklung und im Produktdesign die Gesamtfahrzeugkonzepte konstruiert und mit steigendem Reifegrad durch Beiträge weiterer Entwicklungs- und Planungsbereiche ergänzt [39]. Hierfür nutzen die Fachbereiche vorwiegend Grobdaten, Entwürfe sowie Anforderungen bestehender und vergangener Baureihen.

Die Konzeptionsphase legt zu einem frühen Zeitpunkt (58 - 48 Monate vor SOP) einen Großteil der technischen und wirtschaftlichen Anforderungen für das Produkt und die Produktionsprozesse fest, die im weiteren Verlauf nur unter hohen Aufwendungen geändert und angepasst werden können [40, 41]. Innerhalb der Fahrzeugphase finden die Schritte der Produkt-, Prozess- und Ressourcenplanung der Gewerke parallel zu den grundlegenden Konzeptions- und Entwicklungsprozessen statt (vgl. Abbildung 2-5) [35]. Die Überprüfung und der Vergleich der Konzepte und Planungsmodelle in der Produktions- und Prozessplanung erfolgt dabei in immer kürzeren Zyklen [42].

Während dieser Phasen bestimmen definierte Meilensteine in Form von Quality Gates (QG) den Anfang, das Ende sowie die verbindlichen Entscheidungspunkte der zu erfüllenden Teilprozessabschnitte [43]. Um die abgeschlossenen Prozessschritte vollständig zu dokumentieren, wird für jedes QG eine individuelle Nachweisführung erstellt. So bildet beispielsweise das Lastenheft den Abschluss der Vorentwicklungs- und Konzeptionsphase. Dabei erfolgt die Dokumentation aller zu erfüllenden Umfänge für die nachfolgenden digitalen Prototypen und parallelisierten Gewerkeplanungen sowie Serienentwicklungen. Feste Meilensteine im FEP, wie das "Design Freeze", legen somit zu einem definierten Zeitpunkt beispielsweise die Produktumfänge, Parameter und die formentscheidende Kontur der Fahrzeuge fest. Sie sind nach Abschluss der Entwicklung und Übergabe an den Lieferanten nicht mehr anpassbar [44]. Insbesondere

zeitkritische Änderungen führen zu technologisch sowie organisatorisch schwer umsetzbaren Anforderungen. Nicht zuletzt aufgrund stetiger Anpassungen und kürzeren Produktzyklen bilden sich eine Vielzahl an Parallelisierungen, Überlappungen und Iterationen zwischen den jeweiligen Arbeitsschritten sowie den Fachabteilungen (vgl. Abbildung 2-5). Es entstehen so durch alle Phasen des FEP parallelisierte Produkt- und Prozessentwicklungsprozesse und dadurch der Bedarf, die externen Anforderungen und internen strategischen Entscheidungen wechselseitig abzugleichen. Damit wächst der abzustimmende Datenbestand und Entwicklungsfortschritt mit jedem abgeschlossenen QG.

2.2.2 Entwicklungs- und Planungsprozesse für die Karosserie

Den Startpunkt für Neuentwicklungen (ca. 58 Monate vor SOP) bilden erste Designskizzen und 3D-Renderings. Diese werden auf Basis von zuvor durchgeführten Marktanalysen und den Prämissen der Produktstrategie erstellt. Im nächsten Schritt werden durch das physikalische Ausformen der Skizzen als Tonmodell die Flächen und die Gesamtform der Außenkarosserie beurteilt und entsprechend angepasst. Diese Tonmodelle dienen im weiteren Verlauf als 1:1 Anschauungsmodelle und damit auch als Entscheidungsgrundlage für den Unternehmensvorstand bei der Auswahl zwischen mehreren Konzepten. Das bestätigte und festgelegte Design wird dann durch die fotogrammetrische Vermessung mit Hilfe von 3D-Scannern digitalisiert und zu Oberflächen höchster Güte modelliert [45]. Auf Basis der abgeleiteten Fahrzeugkontur sowie der CAD-Datenmodelle entsteht somit die Grundlage für Vorentwicklungen der Karosserie sowie für die Einzelkomponenten. Das Fahrzeug bildet sich folglich durch die schrittweise Ergänzung der funktionsbezogenen ET und ZB von der Außenkontur nach innen heraus [46].

Parallel und konstruktionsbegleitend werden dazu die wirtschaftlichen und technischen Anforderungen (Materialkosten, Fügbarkeit der Komponenten etc.) zwischen dem Produkt und der Produktion abgeglichen, plausibilisiert und angepasst [35, 47]. Als Ergebnis entsteht dabei das Konzeptheft, das ein zielkonformes Produkt- und Produktionskonzept sowie einen Zielerreichungspfad über alle Einsatzfaktoren darstellt. Auf Basis des Konzepthefts wird das Lastenheft entwickelt, das die Gesamtheit der technisch-organisatorischen Grundanforderungen an das Produkt und Produktionssystem sowie an die externen Leistungen durch Lieferanten beschreibt [48]. Bereits

hier wird eine Wiederverwendbarkeit von Komponenten für weitere Fahrzeugvarianten und -derivate angestrebt und als spezifische Anforderung definiert.

In Bezug auf die Fahrzeugkarosserie ist damit die generelle Machbarkeit sicherzustellen. Dabei werden erste technische Lösungen, Beschreibungen und Bewertungen entwickelt, in Teillösungen zerlegt (vgl. Abbildung 2-3) und im FEP realisiert. Für die Fahrzeugkarosserie bedeutet das eine schrittweise Erarbeitung der Anforderungen zur Sicherstellung der Funktionalität, Optik sowie der technischen und wirtschaftlichen Herstellbarkeit [27]. Hierzu erfüllt das Karosserieblechteil, als einzelne Komponente im Gesamtsystem der Karosserie, eine Vielzahl an technisch-organisatorischen Grundanforderungen an die Beschaffenheit des Bauteils sowie an den Produktionsprozess selbst. Die Karosserie steht damit als Produkt in direkter Wechselwirkung zu den funktionalen Eigenschaften und besitzt Einfluss auf das Fahrzeugkonzept, Fahrzeugdesign sowie auf die übergreifende Produktionsstrategie [21].

Im Anschluss an das abgeleitete Maßkonzept aus der Außenkontur der CAD-Modelle wird das produktseitige Abmaß der Karosserie bestimmt und festgelegt. Anhand der Karosserieabmessungen resultieren daraus erste Anlagenspezifikationen und funktionsbestimmende Merkmale der Stationen, wie die Auslegung der Greifer- und Schweißzangengeometrie für Betriebsmittelprototypen. Parallel dazu erfolgen beispielsweise die Abstimmungen und Prüfungen der gesetzten Festigkeitsanforderungen eingesetzter Fügeverfahren. Die daraus entstandenen Informationen über den Füge- und Verbindungsprozess sowie die erforderlichen Bauteileigenschaften (z. B. biegesteife Strukturen und robustes Dämpfungsverhalten [49]) werden als technische Anforderungen dem jeweiligen Karosseriebauteil zugeordnet. Weitere Anforderungsklassen wie gleiche Toleranzen, ausreichende Werkstofffestigkeiten sowie die Einhaltung der Fügefolge werden sukzessive ergänzt und durch Betriebsmittel- und Produktprototypen, Crash-Tests sowie Fahrerprobungen abgesichert. Um die Planungs- und Entwicklungsaufwendungen möglichst gering zu halten, wird eine Vielzahl an geprüften und freigegebenen Karosseriebauteilen in weiteren Derivaten der Fahrzeugarchitektur standardisiert und wiederverwendet.

Die Einordnung der technologischen wie auch der wirtschaftlichen Anforderungen erfolgt damit in die drei Anforderungskategorien der Produkt-, Produktions- und Prozessanforderungen (vgl. Abbildung 2-6). Während Produkt- und Produktionsanforderungen einen Bezug zu einer Komponente oder einer spezifischen Produktionsanlage

aufweisen, beziehen sich Prozessanforderungen auf die zu erfüllenden Phasen im FEP. Da sich aus den Prozessen im FEP keine Produkt- und Produktionsmodule bilden lassen, entfällt die Betrachtung der Prozessanforderungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit.

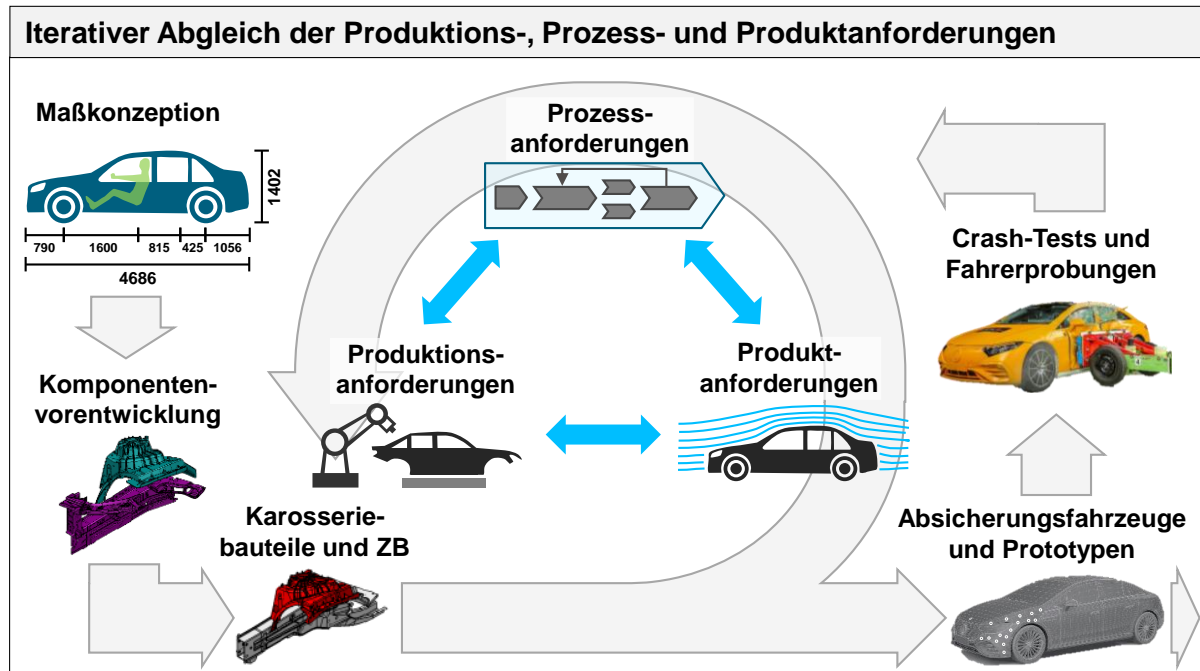


Abbildung 2-6: Prozessfolge und Abgleich von Anforderungskategorien

Einzelne Bauteile und Prototypen werden somit regelmäßig aufgrund neuer Erkenntnisse und sich ändernden Produkt-, Produktions- und Prozessanforderungen angepasst und weiterentwickelt (vgl. Abbildung 2-6). Konstruktionsbedingte Änderungen am Produkt oder fertigungsbedingte Anpassungen in der Produktion betreffen oftmals mehrere Bereiche und Prozessschritte im FEP [35]. Ebenfalls sind übergreifende Wechselwirkungen in vor- oder nachgelagerte Produktionsgewerke möglich. So können beispielsweise Änderungen der montageseitigen Anbindungspunkte für Aggregate oder für das Interieur einen gewerkeübergreifenden Einfluss auf die Anzahl und Lage der Schweißbolzen innerhalb der Produkt-, Produktions- und Prozessplanung zur Karosserie besitzen. Komponentenweise entsteht demnach für die Fahrzeugkarosserie, für die Derivate und Varianten eine vollständige Beschreibung der funktionsbestimmenden Produkt- und Produktionsmodule.

Nach Abschluss der Grobplanung durch die Absicherung zur Baubarkeit der Fahrzeugkarosserie beginnt die seriennahe Feinplanung. In der Feinplanung werden die grob

strukturierten und anforderungskonformen Karosseriekomponenten und Anlageneinrichtungen weiterentwickelt und seriennah geplant (Serienentwicklung). Dies ermöglicht eine anschließende Realisierung der Planungsergebnisse für die Serienproduktion. Dabei erhöht sich nicht nur die Anzahl der zu erfüllenden Bauteilanforderungen durch neue Produkt- und Produktionsinformationen, sondern es folgen hieraus auch kosten- und zeitkritische Abhängigkeiten, Defizite und Wirkungsinterdependenzen. Diese Bauteilanforderungen können beispielsweise Anforderungen an die Geometrie und Maßhaltigkeit, die Einhaltung der Fügefolge (Ablauf der Fügereihenfolge) sowie das Gesamtgewicht sein. Der Planungs- und Entwicklungsprozess endet schließlich mit dem schrittweisen An- und Hochlauf der Produktion (vgl. Abbildung 2-5) und somit durch den Produktionsstart der ersten Fahrzeuge. Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Prozesse wird durch die Serienbetreuung übernommen, um Störungen im laufenden Produktionsprozess abzustellen und Anpassungsentwicklungen durchzuführen.

Es ist festzuhalten, dass die Entwicklungs- und Planungsprozesse innerhalb der Automobilindustrie sowie im Karosseriebau eine entscheidende Rolle zur Erreichung der grundlegenden produktionswirtschaftlichen Unternehmensziele (Produktivität, Wirtschaftlichkeit, Rentabilität) darstellen. Insbesondere aufgrund der Erhöhung der Wiederverwendbarkeit von Karosseriekomponenten durch die Standardisierung kann eine Vielzahl an übereinstimmenden Anforderungen in weiteren Baureihen oder Fahrzeugvarianten umgesetzt werden. Es können somit mehrere Anpassungsvarianten (Kombi, Cabrio, Coupé, Fließheck etc.) auf der Grundlage der Entwicklungs- und Planungsprozesse für die Limousine als baureihenbestimmende Karosserieform abgeleitet werden.

2.3 Grundlagen und Methoden zur Modularisierung

Änderungsanforderungen aus dem internen und externen Umfeld, ungenutztes Potenzial sowie erfolgskritische und kurzfristige Anpassungen der Gesamtfahrzeugkonzepte führen zu einer weiteren Erhöhung der bestehenden Komplexität hinsichtlich der Produkt- und Produktionssysteme. Diese Komplexität wird wie bereits in Kapitel 1.2 als die Anzahl und Vielfalt der Verbindungen von anforderungsabhängigen Karosseriekomponenten unter Unsicherheit und zeitlicher Veränderlichkeit charakterisiert.

Nach BALDWIN UND CLARK ist die Bewältigung der Komplexität nur möglich, wenn das Gesamtsystem in kleinere und besser handhabbare Einheiten eingeteilt wird [50].

Durch isolierte Einzelemente und Subsysteme entsteht eine angepasste Bearbeitung, um schrittweise die Komplexität zu reduzieren. Die Entwicklungs- und Planungsbereiche der Automobilindustrie nutzen dazu die Methode der Modularisierung, um Produktstrukturen und Fertigungsbereiche in kleinere Module zu unterteilen und die Wiederverwendbarkeit definierter Baugruppen zu erhöhen. Im nachfolgenden Abschnitt werden hierzu grundlegende Begrifflichkeiten, bestehende Lösungsansätze und die für diese Arbeit zugrundeliegende Definition der Modularisierung erläutert.

2.3.1 Grundlagen zur Modularisierung von Produkten und Prozessen

Infolge der stetigen Anpassungen und des Abgleichs aller Grundanforderungen aus dem internen und externen Umfeld besteht im FEP die Herausforderung, die entstandene Komplexität beherrschbar zu gestalten. Im Fokus stehen hauptsächlich die Bestimmungsgrößen zur Anzahl an Einzelementen (Varianz) sowie die der bestehenden Beziehungen (Konnektivität) zwischen den Komponenten und Subsystemen [51].

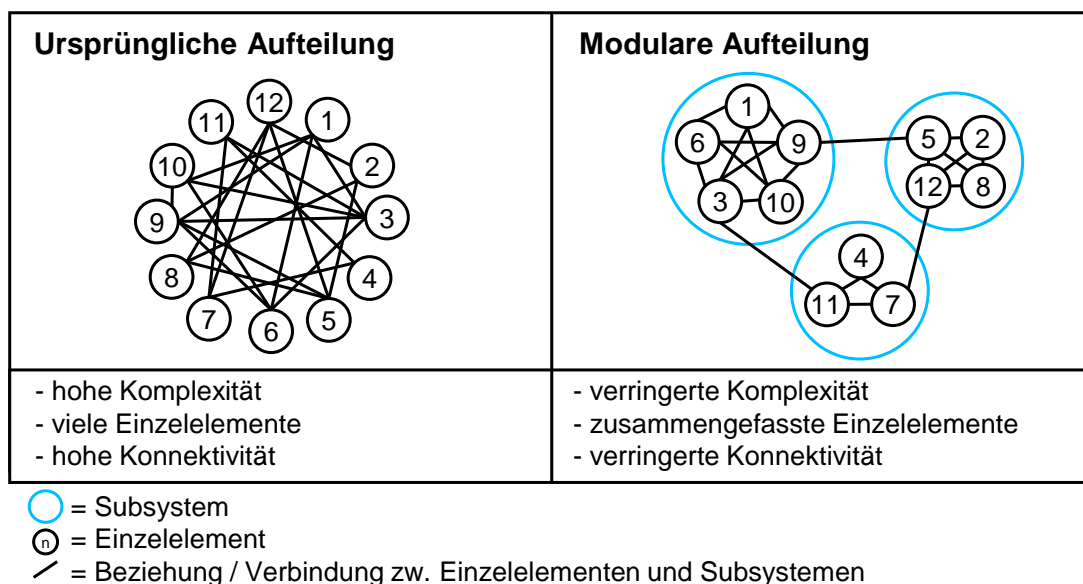


Abbildung 2-7: Systemvergleich mit gleicher Anzahl an Elementen in Anlehnung an [51]

Die Produkt- oder Prozessstruktur von Objekten (wie beispielsweise Fahrzeugen) in Verbindung mit den jeweiligen Funktionen wird Produktarchitektur genannt. Abbildung 2-7 zeigt einen Vergleich zweier Systeme mit gleicher Funktion sowie Anzahl an Elementen. Die Funktionalität der unterteilten Einzelemente wird durch die Trennung und Neuordnung nicht eingeschränkt oder negativ beeinflusst. Während die ursprüngliche Aufteilung einen unstrukturierten Aufbau der Elemente und Verbindungen darstellt, fasst hingegen die modulare und entkoppelte Anordnung die Einzelemente zu logischen Gruppierungen zusammen. Somit wird die Komplexität verringert.

Das zugrundeliegende methodische Konzept der Entkopplung und Auftrennung eines Systems in kleinere Bestandteile wurde erstmals im Jahr 1962 durch das Grundkonzept von "nahezu vollständig zerlegbaren Systemen" (engl.: nearly decomposable systems) beschrieben [52]. Dieser Ansatz wurde nachfolgend stetig angepasst und weiterentwickelt. Bei der Komplexitätsreduktion in der variantenreichen Serienfertigung ist dadurch die Methode der Modularisierung entstanden. Der Begriff der Modularisierung selbst ist nicht eindeutig definiert. Es finden sich in der Literatur eine Vielzahl an Definitionen und Schwerpunkten [17]. Die für diese Arbeit geltende Definition und das Verständnis zur Modularisierung stützt sich auf die Grundlagenliteratur sowie auf etablierte Ansätze aus der praktischen Nutzung [17, 53–58]. Für die weitere Anwendung in dieser Arbeit wird daher der Begriff der **Modularisierung**

als die Aufteilung und Entkopplung einer Produkt- oder Prozessstruktur in einzelne, unabhängige und damit vereinfachte Elemente nach festgelegten Anforderungen definiert. Diese Elemente besitzen somit eindeutig beschriebene funktionale und physikalische Eigenschaften sowie Fähigkeiten hinsichtlich der Zuordnung zu einer übergeordneten Struktur.

Relativ autonome Subsysteme bzw. Module können somit isoliert voneinander in Bezug auf grundlegende Anforderungen an die Produkt- und Prozessstruktur bearbeitet werden, um die Komplexität zunächst im Einzelelement und nachfolgend im Gesamtsystem zu reduzieren [59]. Innerhalb der Subsysteme bestehen unter den Elementen selbst starke Abhängigkeiten und Bindungen. Zwischen den Subsystemen und den Elementen anderer Subsysteme existieren nur vereinzelte Interdependenzen und notwendige Bedingungen sowie definierte Schnittstellen. Das Verhältnis der Beziehungen unabhängiger Module überwiegt somit die Anzahl an Schnittstellen zu weiteren Elementen, Subsystemen und Modulen (vgl. modulare Aufteilung in Abbildung 2-7).

Eine modulare Aufteilung und die Neuordnung der Module ermöglicht weiterhin, einzelne Subsysteme und Elemente vom Gesamtsystem entkoppelt zu entwickeln und planbar an mehreren Stellen in dieses System einzusetzen. Durch die verringerte Bindung zwischen den Schnittstellen entstehen folglich rekombinierbare Elemente und Module. Hieraus können neue Varianten gebildet und bestehende Kombinationen zwischen den Architekturen in ihrer Komplexität reduziert werden [60]. Die extern wahrnehmbare Varianz durch zusätzliche Varianten wird erhöht, während die interne Kom-

plexität und Varianz des Gesamtsystems selbst verringert wird. Dabei ist es unerheblich, ob konzeptionelle, logische, physische oder organisatorische Einheiten zur Bildung von Modulen genutzt werden [61]. Vor dem Hintergrund, Produktmodule in unterschiedlichen Architekturen einsetzen zu wollen, erfolgt die Ableitung einer Modularisierungsstrategie, die sich sowohl in der Produktentwicklung als auch in der Produktionsplanung durchführen lässt.

2.3.2 Modulbildung in der variantenreichen Serienfertigung

Neben der Zusammenfassung von Einzelteilen bezüglich der Komplexitätsreduktion ist die Modulbildung abhängig von den grundlegenden technischen und wirtschaftlichen Anforderungen, die das Element bzw. Modul zu erfüllen hat. Um dabei aus der unstrukturierten Anordnung der Elemente eines Systems eine modulare Architektur abzuleiten, werden Einzelelemente nach ihren Merkmalen und Eigenschaften in Bezug auf kohärente (meist technische) Anforderungen zusammengefasst. Dazu definiert PINE in Abbildung 2-8 sechs grundsätzliche Arten zur Modulbildung [62].

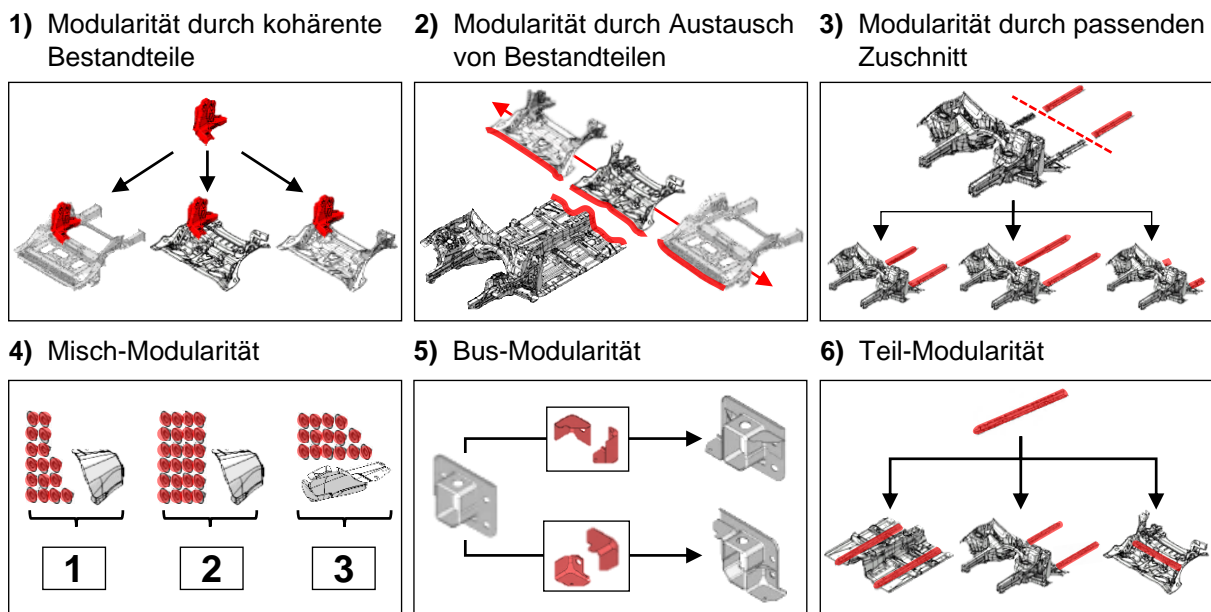


Abbildung 2-8: Sechs Arten der Modularität in Anlehnung an PINE [62]

Diese technischen Anforderungen an das Produkt, den Prozess und die Produktion bestimmen maßgeblich die Art und Weise, wie Module gebildet, eingeteilt und strukturiert werden. Um die Elemente, Module und Verbindungen im System zu kombinieren, wird jeweils die entsprechende Modularität genutzt. Dabei beeinflusst die Art der Modulbildung grundlegend den Umgang mit unterschiedlichen Elementen im System und

die Abhängigkeiten zwischen den Einzelementen und Modulen. Während einige Arten der Modulbildung die Austausch- und Kombinierbarkeit der Elemente eines Moduls fokussieren, nutzen andere Ansätze zur Modularisierung lose Schnittstellen zur Erweiterung durch zusätzliche eigenständige Module. Die Art der Modularität spiegelt sich somit in den zu erfüllenden Anforderungen an die Wiederverwendbarkeit der Module und Einzelemente wider. Weiterhin können neben technischen Anforderungen ebenfalls wirtschaftliche Zielgrößen erfüllt und beispielsweise Material- und Logistikkosten in der jeweiligen Art der Modularität wirksamer berücksichtigt werden.

2.3.3 Modulbildung in der Karosserie und im Karosseriebau

Für die Fahrzeugkarosserie bilden sich in den frühen Design- und Fahrzeugphasen erste Moduleinteilungen in Bezug auf zu erfüllende technisch-organisatorische Anforderungen wie das Maßkonzept, Designvorgaben und die eingesetzte Antriebstechnologie [57]. Modulzusammensetzungen vergangener Baureihen unterstützen die Entwicklungs- und Planungsbereiche durch übertragbare und bestehende Lösungsansätze zum Aufbau ähnlicher Komponenten mit weitestgehend vergleichbaren Fahrzeugmerkmalen (Fahrzeugart, Grundmaße, Antriebskonzept etc.).

Um gleichzeitig die Entwicklungskosten möglichst gering zu halten und bereits in der frühen Phase verlässliche Konzeptfahrzeuge entwickeln zu können, werden Maßnahmen zur Standardisierung von Modulen eingesetzt [63]. Bisherige Vorgehensweisen isolieren die individuellen Fahrzeugvarianten voneinander und bilden dabei entweder Produkt- oder Produktionsmodule. Über eine gemeinsame Struktur wird ein gültiger Standard für alle weiteren Derivate festgelegt. Varianten- und derivativespezifische Module ergänzen kohärente Gleichteile der Grundplattform und der ersten Aufbaustufe (Z1) [25]. Designbestimmende Elemente und Anbauteile (Z2 und Z3) finden hingegen für die Strukturierung der Module kaum Verwendung, um die kundenwahrnehmbare Varianz durch variantenreiche Außenhautteile weiterhin aufrechterhalten zu können.

Als konzeptbestimmende Bauform stellt die Limousine in der Regel eine Neukonstruktion und -planung mit einem hohen Innovationsgrad dar. Sie legt die Grundplattform für weitere Anpassungs- und Karosseriederivate wie Coupé-, Kombi- sowie Cabrio-Bauformen fest [53]. Unter Beibehaltung von Baugruppen der Boden- und Frontstruktur erfolgt die Entwicklung der unterschiedlichen und austauschbaren Heckwagenderivate (vgl. Modul 2 in Abbildung 2-9). Einzelemente dieser Module werden daher

nach Funktion, Zuordnung und Relevanz gegenüber der Anforderung zur Wiederverwendbarkeit als Gleichteil zusammengefasst oder als varianten- und derivativespezifische Produktumfänge isoliert. Neben substituier- und austauschbaren Hauptmodulen bedarf es vereinzelt zusätzlicher prozess- und konstruktionsbedingter Mehrumfänge wie Verstärkungen, Verbindungs- oder Zwischenelemente, um länder- und produktspezifische Derivate zu realisieren. Ein Beispiel hierzu stellt die Schwächung der gesamten Karosseriestruktur der Cabrio-Variante aufgrund des fehlenden Daches dar (vgl. Modul 3 in Abbildung 2-9). Fehlende Steifigkeiten der Karosserie im Vergleich zu Voldach-Varianten werden über zusätzliche Versteifungen des Hauptbodens ersetzt.

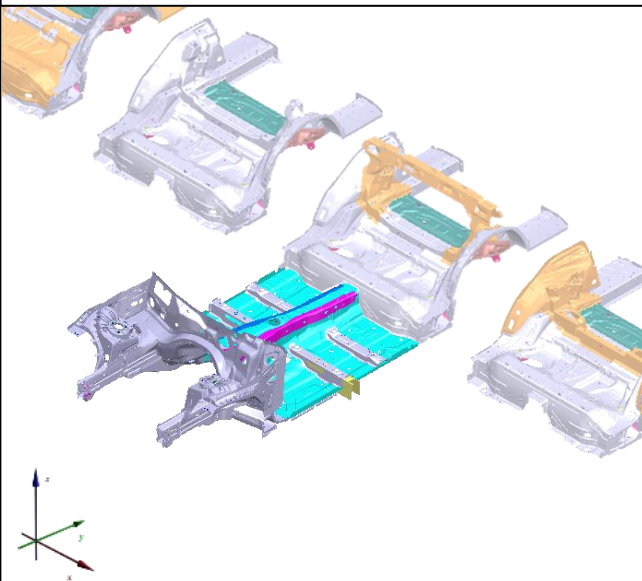
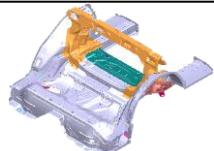
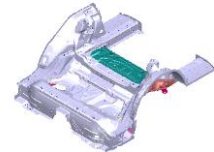
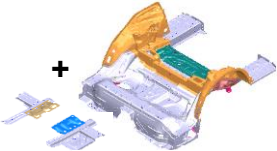
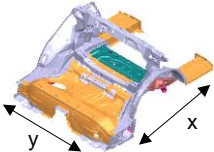
Grundplattform der Karosserie - Limousine als Neukonstruktion - Vorbau u. Hauptboden als wiederverwendbare Gleichteile	Wiederverwendbare u. austauschbare Module	
	Modul 1 - Limousine mit Querträger	
	Modul 2 - Kombi mit durchgängigen Heckwagen ohne Querträger	
	Modul 3 - Cabriolet - Heckwagen- struktur + Verstärkung	
	Modul 4 - Marktspezifische Langversion - Skalierbare Elemente	

Abbildung 2-9: Heckwagenderivate auf Basis der Grundplattform der Limousine

Neben der Anforderung an nahezu vollständig substituierbare Hauptmodule ist es ebenso möglich, relevante Parameter der Maßkonzeption und Fahrzeugstruktur wie Spur- und Fahrzeugbreite, zulässige Böschungswinkel sowie Gesamtlänge skalierbar und an das jeweilige Fahrzeugderivat anpassbar zu gestalten [25, 35]. Bestehende Module werden folglich über horizontale und vertikale Schnittebenen sowie variable und fixe Maßpunkte (in x- und y-Richtung) angepasst. Die Automobilhersteller realisieren auf diese Weise insbesondere die markt- und derivativespezifischen Langversionen, Verbreiterungen der Karosserie und Änderungen der Fahrspur angepasster Sportwagenvarianten (vgl. Modul 4 in Abbildung 2-9).

Neben der Ableitung zusätzlicher Varianten und Karosserieformen innerhalb eines Fahrzeugmodells werden über stärker differenzierte und skalierbare Hauptmodule auch markenübergreifende Plattformkonzepte durch unterschiedliche Fahrzeugklassen (A00, A0, A, B, C etc.) ermöglicht [3]. Durch die bestehenden Konzepte und Lösungsansätze zur Modularisierung findet lediglich eine weitere Erhöhung der Gleichteileumfänge und derivativespezifischer Module in einem Fahrzeugsegment oder in mehreren Sub-Marken statt. Tabelle 2-1 zeigt hierzu die strategische Ausrichtung vier etablierter Plattformkonzepte bekannter Automobilkonzerne hinsichtlich der Anzahl an bereitgestellten Fahrzeugmodellen und die fokussierte Modularisierungsstrategie. Die unternehmensinterne Varianz wird somit unter Beibehaltung der kundenwahrnehmbaren externen Produktvielfalt reduziert.

Tabelle 2-1: Ausschnitt bestehender Karosserieplattformen [64]

Konzern	Plattform	Modelle	Marken	Werke
VW	MQB (Modularer Quer Baukasten)	24 (VW Golf, Audi A3, Seat Leon etc.)	4	22
BMW	UKL (Untere Klasse)	12 (Mini Clubman, BMW X1, 1er, 2er etc.)	2	5
Mercedes-Benz	MRA (Mercedes Rear Architecture)	8 (C-, E-, GLC-, CLS- Klasse, GT 4-Türer etc.)	1	5
Groupe PSA	EM2 (Efficient Modular Platform)	13 (Citroën C5, Opel Astra, Peugeot 308 etc.)	3	13

Für Plattformkonzepte mit einem hohen Gleichteile- und Standardisierungsanteil sind zudem Kostenvorteile und Skaleneffekte durch größere Produktions- und Liefermengen möglich [62, 65]. Dabei kommt es jedoch zwischen den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen aufgrund des hohen Gleichteileanteils zu gegenläufigen Abhängigkeiten und Zielkonflikten. Während durch einen hohen Anteil genutzter Gleichteile die Fixkosten durch beispielsweise die Vereinheitlichung der Beschaffungsquellen (Lieferanten) reduziert werden, steigen die technischen Anforderungen an die Kompatibilität der Bauteile und führen damit zu konstruktiven Anpassungen. Weiterhin sind durch Bündelung der Modulzusammensetzungen über Länder, Werke und Fahrzeugsegmente kurzfristige Anpassungen und Änderungen in hoch standardisierten

Modulen nur bedingt oder unter hohen technischen wie auch wirtschaftlichen Aufwendungen möglich. Demnach fehlt es an einer vollständigen Betrachtung und einem Abgleich der technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Anforderungen.

Die Modulgröße (Anzahl ET im Modul) sowie die betrachtete Ebene (Groß-, Haupt-, Unter-ZB und ET) beeinflussen dabei maßgeblich die Effektivität der Modularisierungsstrategie und die benötigten Gesamtaufwendungen (vgl. Abbildung 2-10). Die Gesamtheit an wirtschaftlichen, technischen und organisationalen Umfängen wird in interne oder externe Aufwendungen aufgeteilt. Werden auf der höchsten Modulebene der Fahrzeugkarosserie ganze Modulgruppen wie der ZB Vorbau, ZB Hauptboden oder ZB Heckwagen je Karosseriederivat standardisiert, entstehen vollständig austauschbare Module. Interne Planungs- und Entwicklungsaufwendungen (Investitionskosten, indirekter Personalbedarf etc.) werden gebündelt, der Austausch von Einzelementen erleichtert und die Produktvarianz für den Kunden erweitert [18]. Gleichzeitig steigen die externen Aufwendungen zur Koordination, Bereitstellung notwendiger Schnittstellen sowie der Abstimmungsbedarf mit Lieferanten und Partnerwerken im Produktionsnetzwerk. Durch eine Modulbildung auf Einzelteil-Ebene hingegen erfolgen geringe externe, aber größere interne Aufwendungen.

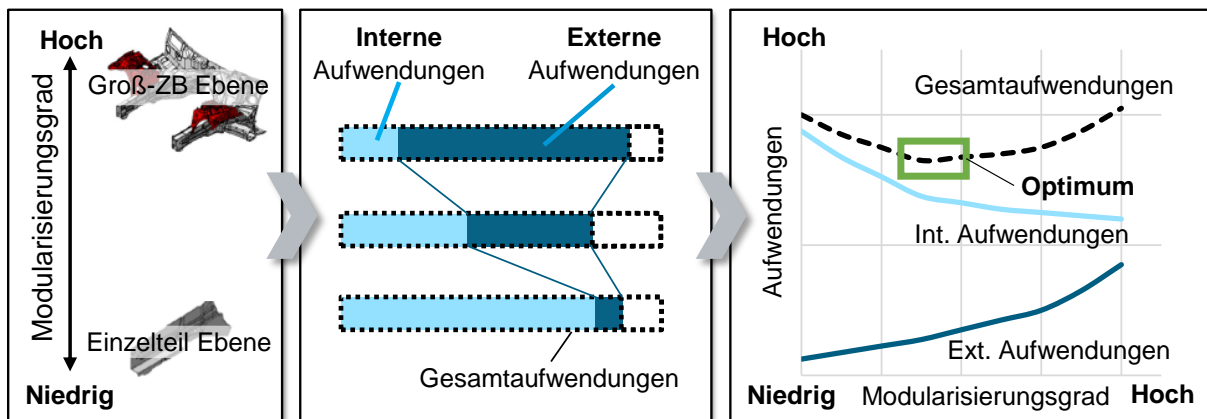


Abbildung 2-10: Wirkung des Modularisierungsgrads auf interne und externe Aufwendungen
Damit erhöht sich der Anteil an standardisierten Grundelementen in der Karosserie, während notwendige Einzelteile und variantenbestimmende Module reduziert werden. Die Umsetzung einzelner Grundanforderungen an die Flexibilität, Stückkosten sowie Standardisierung findet somit in vielen Modellen einer Grundplattform isoliert statt. Der Grad an Standardisierung der Produktplattform ist daher stetig mit dem Bedarf an erweiterbaren Individualmodulen zur Derivatebildung abzustimmen [66]. Das Optimum

der Gesamtaufwendungen besteht folglich nicht zwangsläufig in einem möglichst hohen oder niedrigen Modularisierungsgrad (vgl. Abbildung 2-10). Vielmehr bedarf es eines Abgleichs der unterschiedlichen Modulzusammensetzungen.

Das komplementäre und wechselwirksame Verständnis zwischen Produkt und Produktion sieht darüber hinaus eine Ableitung der Anlagen- und Fabrikmodule aus den Produktmodulen vor [26]. Die Zuordnung der Produktmodule in die entsprechende Fertigungsstation erfolgt daher in Modulgruppen konzeptähnlicher Varianten. Je höher hierzu der Anteil an Gleichteilen und übereinstimmenden Produktionsumfängen der Modulgruppen ist, desto weniger erforderte Flexibilität wird in den Prozesstechnologien (Handling, Spann- und Verbindungssystemen) benötigt. Zudem werden durch den Entfall derivativespezifischer Produktionsanlagen ebenfalls zykluszeitrelevante Mehrumfänge und Rüstvorgänge reduziert. Weiterhin besteht für die Hersteller die Möglichkeit der Vergabe von nicht kerneigenleistungsrelevanten Produktionsinhalten an Systemlieferanten und spezialisierte Kompetenzträger [55]. Es entstehen anpassbare und komplexitätsreduzierte Produktionsprozesse innerhalb der Produktionswerke sowie der Fertigung im globalen Produktionsverbund mehrerer Standorte.

Festzuhalten ist, dass der resultierenden Komplexität aus dem Abgleich der Grundanforderungen durch die Methode der Modularisierung zur Anordnung der Elemente in logische Gruppierungen (Module) begegnet werden kann. Die Zusammenfassung und Bearbeitung der technischen Anforderungen findet dabei in der variantenreichen Serienfertigung hauptsächlich über einzelne und bereits definierte Arten der Modulbildung statt. Auch in der Entwicklung von Karosseriemodulen werden die Wiederverwendbarkeit von Gleichteilen und die Substitutionsfähigkeit auf der Grundlage einzelner und bestehender Modulzuordnungen sichergestellt. Die Modulzuordnungen beeinflussen daher maßgeblich die technischen und wirtschaftlichen Größen bezüglich der Effektivität, Flexibilität sowie der Stückkosten.

Im klassischen Ansatz zum Vorgehen des methodischen Entwickelns und Konstruierens nach VDI 2221 werden ebenfalls die Entwicklungsleistung und -aufgabe über das zu realisierende Produkt in komplexitätsreduzierte Module gegliedert und hinsichtlich der Erfüllung von Anforderungen geprüft [33, 67]. Die Anforderungsliste beinhaltet hierzu als zentrales Dokument im Konstruktionsprozess sowohl qualitative als auch quantitative Solleigenschaften und allgemeingültige Anforderungen (z. B. zulässige Bauräume, Gewicht etc.) an das zu entwickelnde Produkt [67].

Durch das Zerlegen eingangs definierter Anforderungen in einzelne Funktionsstrukturen und Teilanforderungen können hieraus Einzellösungen unabhängig voneinander entwickelt werden. Bereits genutzte Lösungselemente und erprobte Baugruppen ähnlicher Produkte können somit durch den Konstrukteur wiederverwendet werden [68]. Über bestehende Konstruktionskataloge, Regelwerke oder auch beispielsweise bau-reihenspezifische Lösungssammlungen entsteht daraus eine Festlegung darüber, welche Module neu entwickelt, konstruktiv abgeändert oder aus vorhandenen Produkten vollständig übernommen werden können [69]. Konkurrierende (Teil-) Lösungen werden dabei durch erfahrene Konstrukteure bewertet, abgestimmt und nach präferierten Modulen und dringlichen Anforderungen priorisiert. Diese Strukturierung des Produkts in abgegrenzte Gestaltungselemente und Gliederung in realisierbare Module unterstützt folglich den Konstrukteur im Prozess zur Entwicklung von Lösungsmodellen

2.4 Stand der Wissenschaft und Technik zur Produkt- und Produktionsmodularisierung

Um die mit dem **Anforderungsfokus** verknüpften **Bewertungskriterien** zur Modularisierung erfassen und methodische Defizite herausarbeiten zu können, wird im Folgenden der Stand der Wissenschaft und Technik zusammengefasst. Für die Eingrenzung der Analyseergebnisse wird die variantenreiche Serienfertigung zur Bildung von **Produkt- und Produktionsmodulen** näher betrachtet. Zusätzlich ergänzen Ansätze aus der Fahrzeugentwicklung den Betrachtungsraum.

Um eine aktuelle Übersicht über die bestehenden Methoden der Modularisierung erhalten zu können, wird eine systematische Literaturanalyse in Verbindung mit der Zitationsanalyse nach WEBSTER UND WATSON genutzt [70]. Auf Basis der ausgewählten Datenbanken werden mithilfe von booleschen Operatoren für die zu untersuchenden Instanzen (Anforderungskategorie, Bewertungsgrößen und die Verknüpfung der Produkt- und Produktionsmodule) geeignete Suchmasken mit passenden Schlagwörtern entwickelt. Nach der qualitativen Sichtung der Datenbankergebnisse über die Überschrift und den Abstract konnten 82 Titel mit Blick auf die hier relevante wissenschaftliche Problemstellung selektiert werden. Diese wurden eingesetzt, um verbundene Literatur und die am häufigsten genutzten Literaturquellen durch die Zitationsanalyse zu finden. Dabei werden weitere 33 Literaturstellen häufig angeführter Quellen, die die selektierten Titel zitieren, ergänzt (vgl. Abbildung 2-11).

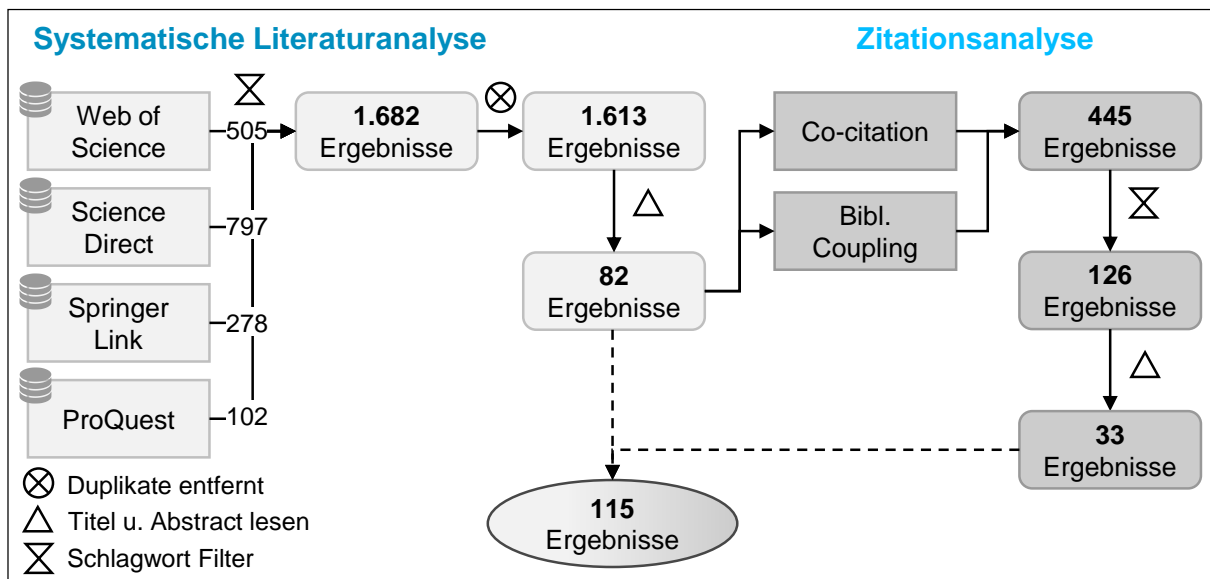


Abbildung 2-11: Vorgehensweise der systematischen Literaturanalyse in Verbindung mit der Zitationsanalyse auf Basis ausgewählter Literaturquellen

Als Ergebnis der Literaturanalyse lässt sich festhalten, dass zahlreiche unterschiedliche Ansätze zur Bildung von Produkt- oder Produktionsmodulen vorliegen. Bestehende Methoden werden hierzu an einzelne und übergeordnete Anforderungskategorien zur Modulbildung angepasst und getrennt behandelt.

Die vier häufigsten Anforderungskategorien betreffen:

- Die Beherrschung sowie das Anbieten von **Varianz** bei gleichzeitiger Reduktion und Vereinheitlichung der Produktmodule hinsichtlich der (unternehmens-) internen Varianten [21, 25, 44, 53, 55, 63, 71–77].
- Umsetzungsunterstützung zur **Designanpassung** in der frühen Entwicklungs- und Planungsphase der Produkte [10, 22, 58, 65, 78–81].
- Produktionsgetriebene Gleichteile- und Wiederverwendungsstrategie zwischen den Marken und Produkten auf einer **Produktplattform** [14, 23, 64, 82–89].
- **Prozessuale Rekonfiguration** im Sinne einer Universalität seitens der Produktion für unterschiedliche Produkte [4, 88, 90–93].

Dabei wird deutlich, dass existierende Methoden nur einzelne Strategielinien (Varianz, Gleichteilestrategie etc.) einbeziehen und damit keine Verknüpfung und kein Abgleich übereinstimmender oder gegensätzlicher Anforderungen erfolgt. Auch die qualitativen und quantitativen Bewertungskriterien, nach denen die Umsetzung der jeweiligen Modularisierungsstrategie beurteilt wird, sind als nicht anpassbare Größe fest mit einer Anforderungskategorie verbunden. Folglich liegen zur Reduktion der Komplexität

durch die bestehenden Methoden der Modularisierung nur einzelne Anforderungskategorien sowie Merkmale zur Bewertung vor. Dabei werden vier Bewertungskriterien in der untersuchten Literatur besonders häufig und wiederholt genannt:

Fixkostendegression: Hierzu werden Skaleneffekte durch einheitliche Produktionsmengen priorisiert, um bestehende Fixkosten der Produktion auf eine möglichst hohe Anzahl an einzelnen Einheiten bzw. Komponenten zu verteilen [64, 85, 86, 91, 94–96].

Skalierbarkeit Produkt: Implementierung einer durchgängig standardisierten Produktplattform mit erweiterbaren und wiederverwendbaren Einzelementen für mehrere Marken und Sub-Typen [14, 23, 63, 82, 83, 85, 92, 97]. Häufig finden sich diese Ansätze in Konzernen und Unternehmen mit hohen Absatzmengen.

Standardisierung: Beeinflussung der Kostenstruktur und Reduktion der Komplexität durch den Einsatz möglichst vieler Gleichteile [18, 35, 44, 51, 51, 53, 74, 98]. Konsequente Trennung und Zusammenfassung von Grundelementen in gleiche Module.

Mehrfachverwendbarkeit Produktion: Analog zur Wiederverwendbarkeit innerhalb der Produktstruktur erscheint ebenfalls das Bewertungskriterium der prozessualen Rekonfigurationsfähigkeit der Produktionsmittel und Fertigungsanlagen über mehrere Änderungs- und Produktlebenszyklen hinweg [41, 66, 88, 90, 93, 99–101].

In Bezug auf die Problemstellung hier und den möglichen Lösungsansätzen aus der Literatur zeigt sich dennoch, dass eine Vielzahl an Anforderungen für sich alleinstehen und kein Abgleich der Anforderungen stattfindet. Es entsteht folglich nur eine eingeschränkte Anzahl an Möglichkeiten, die die produktionswirtschaftlich relevanten und erfolgskritischen Anforderungen der Produkte und Produktionen vollständig erfüllen. Hierzu stellt Tabelle 2-2 eine Übersicht der bestehenden Methoden zur Modularisierung mit Blick auf die erfassten Anforderungskategorien und die definierten Bewertungskriterien dar.

So erfolgt nach ROSSI ET AL. [90] über einen strukturierten Ansatz die Einbindung der Modularisierung in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses, um insbesondere Skaleneffekte durch eine einheitliche Produktplattform zu ermöglichen. Dadurch können zwar vereinzelt identifizierte Anforderungen zur Modulbildung genutzt werden, aber ohne den vorherigen Abgleich und die Bewertung nach der Einflusswirkung oder Umsetzungsrelevanz. Auch GÖPFERT [102] sowie BAYLIS ET AL. [85] betrachten mit ihren Methoden zur modularen Produktentwicklung bereits sowohl technische als auch

organisatorische Wechselwirkungen von Anforderungen innerhalb der Produktstruktur. Jedoch fehlt, neben der Verknüpfung der Produkte mit der Produktion, eine ganzheitliche Analyse und ein Abgleich gegensätzlicher Anforderungen.

Auch weitere Lösungsansätze und Methoden nach HÖLTTÄ-OTTO [89], ELMARAGHY UND ALGEDDAWY [84] oder auch PONN UND LINDEMANN [103] verfolgen mit ihrer Methode zur Modularisierung hauptsächlich den Aufbau einer einheitlichen Produktplattform bzw. Produktarchitektur, um den Bedarf an Varianz durch die kundenindividuelle Massenerzeugung zu befriedigen. Ebenso erfüllen KRAUSE UND GEBHARDT [18] durch ihren integrierten Ansatz zur Standardisierung von Produktmodulen insbesondere das Ziel der Varianzbildung. Über beispielsweise eine einheitliche Produktstruktur oder Kennzahlen zur Modularität werden anschließend skalierbare Produkte und Gleichteile abgeleitet, jedoch ohne Berücksichtigung der Anforderungen an die Produktion.

Ebenfalls fokussieren PIMMLER UND EPPINGER [104] hinsichtlich der Reduzierung der Komplexität bei ihrer Methode lediglich die Design- und Konstruktionsphasen im Produktentstehungsprozess, um funktionsabhängige Produktstandards zu entwickeln. BALDWIN UND CLARK [58] beschreiben und differenzieren in ihrem Ansatz beispielsweise die Modulbildung im Design und der Produktion. Dennoch werden die generierten Produktionsmodule dem Produkt untergeordnet und nicht über Wirkungsabhängigkeiten miteinander verknüpft. Auf diesem Wege kann das formulierte Ziel dieser Arbeit über anforderungsgerechte Produkt- und Produktionsmodule nicht erreicht werden.

SCHUH [105] stützt sich bei der Modulbildung auf die Gestaltung eines angepassten Baukastens als eine mögliche Ausprägung der Produktarchitektur, um innerhalb der Produktentwicklung die interne Varianz zu reduzieren und gleichzeitig die externe und kundenwahrnehmbare Produktvarianten beizubehalten. Dabei fokussiert er für die Produktstruktur neben den funktionalen Abhängigkeiten der Komponenten auch übergreifende Modultreiber nach ERIXON [106] für die Optimierung der Modulstruktur. Diese Modultreiber charakterisieren in der Methode des Modular Function Deployment nach ERIXON [106] insbesondere strategische Einflussgrößen, technische Spezifikationen sowie Anforderungen an das Produkt. Jedoch wird in beiden Ansätzen kein methodisches Vorgehen beschrieben, um Anforderungen miteinander abzugleichen und abgestimmte Module zu bilden. Es finden sich lediglich Hinweise zur Optimierung der Modulstruktur durch das Verschieben von Modulgrenzen und die Minimierung der funktionalen wie auch physischen Wechselwirkungen im Produkt.

Tabelle 2-2: Vergleich bestehender Methoden zur Modulbildung nach Anforderungskategorie, Bewertungskriterien und der Verknüpfung von Produkt und Produktion

	Produkt		Produktion		Produkt u. Produktion	Bewertungskriterien
	Anforderungskategorien					
	Varianz	Design-anpassung	Produkt-plattformen	Prozessuale Rekonfiguration	Verknüpfung variabler tech. und wirtsch. Anforderungen	
Rossi et al. 2019 [90]	◐	◑	◐	◑	◑	Fixkosten-degression
Göpfert 1998 [102]	○	◐	◑	○	◑	Skalierbarkeit Produkt
Baylis et al. 2018 [85]	◐	◑	◑	○	◑	Skalierbarkeit Produkt
Hölttä-Otto 2005 [89]	◐	◑	◑	○	○	Standardisierung
ElMaraghy u. AlGeddawy 2013 [84]	◑	◑	◑	○	○	Skalierbarkeit Produkt
Ponn u. Lindemann 2008 [103]	◐	○	◐	○	○	Standardisierung
Krause u. Gebhardt 2018 [18]	◐	○	◑	○	○	Standardisierung
Pimpler u. Eppinger 1994 [104]	◑	◐	○	○	○	Standardisierung
Baldwin u. Clark 2007 [58]	◑	◑	◑	○	○	Standardisierung
Schuh 2015 [105]	◐	◐	◑	○	○	Skalierbarkeit Produkt
Erixon 1998 [106]	○	◐	◐	◑	○	Skalierbarkeit Produkt
Queudeville 2015 [66]	○	◐	◑	◑	○	Mehrfachverwendbarkeit Produktion
Kampker et al. 2019 [93]	◐	◑	○	◐	○	Mehrfachverwendbarkeit Produktion
Brüggemann et al. 2006 [86]	◑	○	◐	○	○	Fixkosten-degression
Krusche et al. 2004 [63]	◑	◑	◑	○	○	Standardisierung
Martin u. Ishii 2002 [74]	◐	◑	◑	○	○	Skalierbarkeit Produkt

◐ = Stärke und Fokus bestehender Methoden je Anforderungskategorie

Dagegen beschreibt QUEUDEVILLE [66] in seinem Vorgehen zur Modularisierung von Druckgusswerkzeugen eine produktionsfokussierte Methode, um über festgelegte Merkmale (z. B. Größenabstufungen der Werkzeug-Komponenten) standardisierte Produktionsmodule zu generieren. Auch das Konzept von KAMPKER ET AL. [93] basiert auf der Standardisierung und Universalität von Produktionsmodulen durch angepasste Vorrichtungsfunktionen für den Karosseriebau. Beide Verfahren nutzen allerdings wenige Produktmerkmale sowie -anforderungen, sodass ein einseitiger Fokus auf die Rekonfigurationsfähigkeit und Universalität der Produktionsanlagen entsteht.

Mit besonderem Bezug auf die Modulbildung innerhalb der Fahrzeugkarosserie verfolgen BRÜGGEMANN ET AL. [86] über den Ansatz nach KROKER [107] hinausgehend, die Auftrennung standardisierter und skalierbarer Produktmodule durch eine vertikale Trenn- bzw. Schnittstellenebene. KRUSCHE ET AL. [63] nutzen ein ähnliches Vorgehen zur Produktskalierung und zum Aufbau einer Plattformstrategie. Zudem werden weitere Karosseriederivate und -varianten unter Einbindung von erweiterbaren und wiederverwendbaren Standardkomponenten ermöglicht. Der Einsatz von längenangepassten und skalierbaren Modulen über festgelegte Schnittstellen wird auch außerhalb der Karosserie in Systemen mit weniger Elementen durch die Methode nach MARTIN UND ISHII [74] beschrieben. Dabei steigt zwar über Schnittstellen und universelle Fügestellen die Skalierbarkeit auf der Produktebene, aber ebenso die Anforderungen an die Produktionsumgebung. Keine der erwähnten Methoden deckt somit den zuvor behandelten Begriff "Komplexität" und die beschriebenen Anforderungen vollständig ab.

2.5 Gesamtfazit und Defizit

Die Karosseriestruktur und der Karosseriebau besitzen die stärksten Wechselwirkungen mit den funktionsbestimmenden Konzeptionsphasen im FEP. Eine frühzeitige Einflussnahme und Ausrichtung auf erfolgsrelevante Anforderungen beeinflusst daher die Komplexität innerhalb der Produktstruktur sowie der Produktion. Um diese Komplexität zu reduzieren und beherrschbar zu gestalten, werden unterschiedliche Methoden der Modularisierung genutzt. Dabei gibt es in der untersuchten Literatur keine eindeutige Beschreibung technisch-organisatorischer und wirtschaftlicher Anforderungen, weder in der variantenreichen Serienproduktion im allgemeinen Maschinenbau noch im Karosseriebau oder im Kontext der Fahrzeugkarosserie. Vielmehr werden Methoden an einzelne Grundanforderungen zur Modulbildung angepasst und getrennt behandelt.

Weiterhin findet kein Abgleich existierender Wechselwirkungen zwischen den Abhängigkeiten und den veränderlichen Anforderungsgrößen statt, obgleich der Bedarf zur Verknüpfung erkannt wird. Vorliegenden Ansätzen zur Modularisierung fehlt es folglich an einer Vorgehensweise zur Erfüllung mehrerer veränderlicher Anforderungen wie etwa marktspezifische Vergabeumfänge. Das methodische Defizit besteht somit darin, dass mit Bezug zum Forschungsschwerpunkt "Karosseriestruktur" sowie "Karosseriebau" kein bestehendes Verfahren im Problemfeld uneingeschränkt übertragen werden kann. Damit wird nicht nur die vorliegende Problemstellung in der Automobilindustrie, sondern hierzu auch die wissenschaftliche Forschungslücke bestätigt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die industrielle und die wissenschaftliche Forschungslücke den definierten Forschungsbedarf begründet und damit die Notwendigkeit der Problemlösung in der Fahrzeugstruktur bestätigt. Ziel dieser Arbeit ist es somit, ein Verfahren zu entwickeln, um technisch-organisatorische und wirtschaftliche Anforderungen abzustimmen und daraus Produkt- und Produktionsmodule mit reduzierter Komplexität zu bilden. Verfügbare Methoden zur Modulbildung beschränken sich lediglich auf eine solitäre Betrachtung und Erfüllung einzelner Grundanforderungen der Anforderungskategorien hinsichtlich der variantenreichen Serienfertigung – auch in Bezug auf das Problemumfeld innerhalb der Karosserie und des Karosseriebaus.

2.6 Herleitung des Forschungsbedarfs und der Forschungsfragen

Für die Weiterentwicklung der derzeitigen Methode zur Modularisierung ist eine schnelle und anpassungsfähige Reaktion auf Veränderungen vorzusehen. Dabei ist es nicht zwingend, die Maximierung der Anzahl an Modulen innerhalb der Produktstruktur als Ziel zu verstehen [18]. Vielmehr gilt es, bisherige Modularisierungskonzepte und Methoden weiterzuentwickeln oder zu ergänzen, um bestehende und neue technische sowie wirtschaftliche Anforderungen im FEP begegnen zu können [17]. Es wird ein umfassendes und nachvollziehbares Verständnis aller Teilsysteme und Wechselwirkungen zum Produkt und Produktionsprozess benötigt [88, 108].

Folglich besteht der Forschungsbedarf konkret darin, ein geeignetes Verfahren zu entwickeln, um die angedeutete Forschungslücke zu schließen, vgl. Abbildung 2-12. Diese Forschungslücke, die durch die fehlende fachlich-methodische Unterstützung unter Einbeziehung mehrerer Anforderungen zur Bildung von anpassungsfähigen und abgestimmten Modulen in der Karosseriestruktur zu charakterisieren ist, bekommt so

eine konturierte Gestalt. Mit der Schließung dieser Wissenslücke sollen künftig anforderungsgerechte Module in der variantenreichen Serienfertigung effektiv und effizient gebildet werden können. Wie bereits in der Zielsetzung der Arbeit (vgl. Kapitel 1.3) beschrieben, stellt der Begriff der anforderungsgerechten Modulbildung hierzu die vollständige Orientierung der Modulbildung und Anordnung der Elemente sowohl an ausgewählten technologischen als auch an wirtschaftlichen Anforderungen dar.

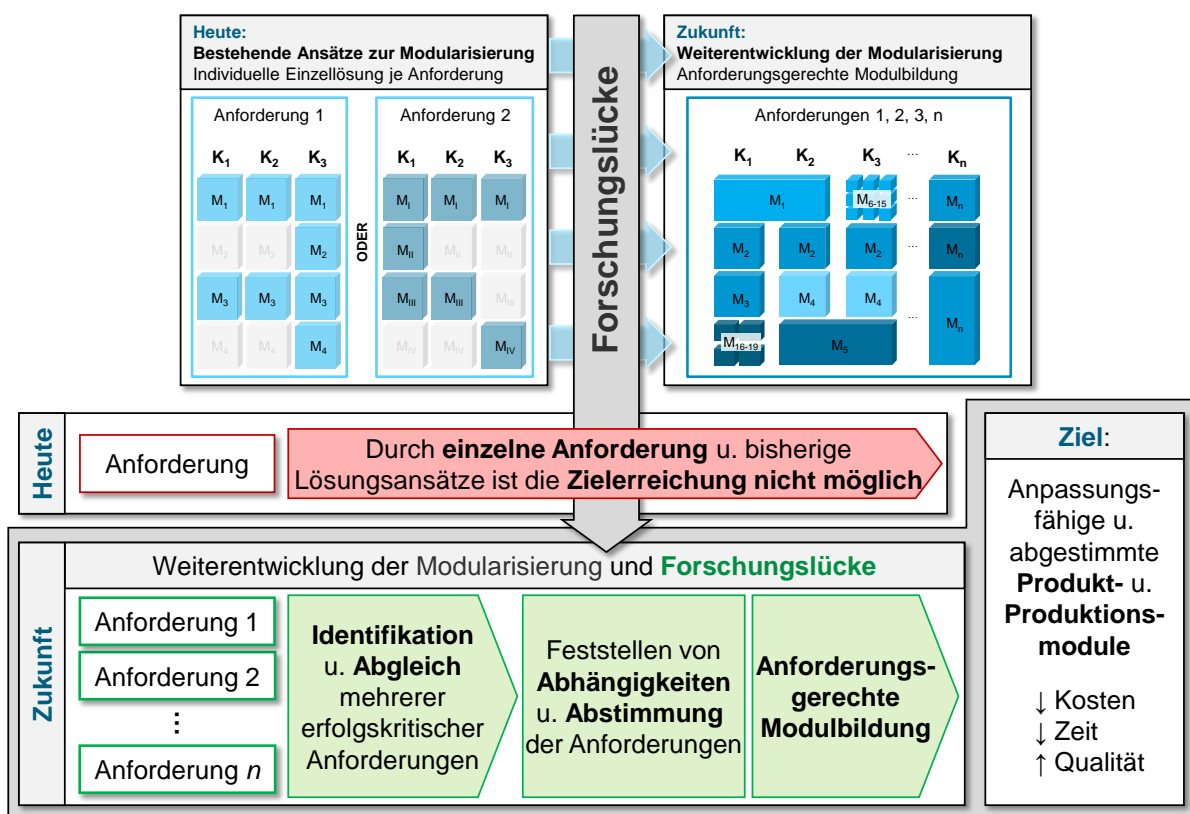


Abbildung 2-12: Forschungslücke in Bezug auf die Weiterentwicklung der Modularisierung
 Aus wissenschaftlicher Sicht lässt sich aus der Forschungslücke und dem Forschungsbedarf die Forschungsleitfrage wie folgt formulieren:

„Wie lassen sich produktabhängige und produktunabhängige Karosseriestrukturen und Produktionseinheiten als Module bilden und untereinander abgleichen, um angepasster gegenüber den bisherigen Ansätzen zur Modularisierung auf volatile und erfolgskritische Anforderungen aus dem internen und externen Umfeld des Karosseriebaus reagieren zu können?“

Die Forschungsleitfrage gibt den Rahmen für die Ableitung von drei Forschungsfragen vor. Diese sollen in der vorliegenden Arbeit beantwortet werden:

Forschungsfrage 1: *Welche produkt- (Karosseriestruktur) und produktionsseitigen (Karosseriebau) Einflussgrößen sind als (erfolgs-) kritische Anforderungen zu definieren?*

Für eine Analyse der Anforderungen aus dem Produktbereich der Karosseriestruktur und aus dem Produktionsumfeld des Karosseriebaus sind diese strukturiert zu erfassen. Hierzu werden die Anforderungen der frühen Phase anhand bestehender Prozessabschnitte im FEP sowie einer Anforderungserfassung und -analyse untersucht. Um im Entwicklungsverlauf nach den Faktoren "Priorisierung" und "kritischem Einfluss auf das Gesamtsystem" gewichten zu können, erfolgt eine Klassifikation der identifizierten Anforderungen. Dadurch sollen unterschiedlich kritische Einflusswirkungen verdeutlicht und konkurrierende Zielgrößen bewertbar gemacht werden.

Forschungsfrage 2: *Wie können mehrere identifizierte Anforderungen und die daraus entstehende Modulzuordnung vergleichend und bewertbar dargestellt werden?*

Jede Anforderung ergibt aufgrund ihrer individuellen Funktionsmerkmale und Wirkungsabhängigkeiten für sich genommen eine ideale Modulaufteilung. Ein vollständiger Abgleich aller Module auf der Grundlage von Erfahrung und durch dokumentenbasierte Planungsmethoden ist aufgrund der Teilevielfalt und daraus abgeleiteten Komplexität, die sich mit der Anforderungsanzahl multipliziert, nicht möglich. Um dennoch einen Abgleich zwischen unterschiedlichen Modulbildungen und Abhängigkeiten herzustellen, wird eine einheitliche und übertragbare Darstellungsweise definiert.

Forschungsfrage 3: *Wie lassen sich gemeinsame sowie konkurrierende Modulzuordnungen in Bezug auf variable Zielgrößen anforderungsgerecht abgleichen?*

Die erfassten, strukturierten und einheitlich dargestellten Modulbildungen sind miteinander auf ein gesamtheitliches Ideal abzugleichen. Alle gebildeten Modulaufteilungen je Anforderung werden dann untereinander auf Übereinstimmung und Gegensätzlichkeit verglichen. Der Abgleich dieser Anforderungen soll einen nach Gewichtung priorisierten Konsens ermöglichen. Dadurch soll es möglich sein, konsensindizierte, produktunabhängige Modulstandards zu etablieren sowie die wesentlichen Abweichungen herauszustellen und diese als produktabhängige Anpassungsmodule zu kennzeichnen. Hieraus lässt sich wiederum ein anforderungsgerechter Zerlegungsgrad ableiten, der hinsichtlich des abgefragten Bedarfs einer optimalen Aufteilung entspricht.

Im Fokus dieser Arbeit steht somit die Beantwortung der Forschungsfragen in Bezug auf die aufgezeigten aktuellen Mängel im Karosseriebau. Der hier neu entwickelte, multimethodische Ansatz wird entgegen den bestehenden Methoden nicht nur einzelne Teilbereiche der Zielsetzung erfüllen, sondern bietet eine vergleichende Analyse zu mehreren variablen und übergreifenden Anforderungen. Durch die zu realisierende, frühe Beeinflussung des FEP unter Berücksichtigung kritischer Anforderungen ist eine zweckmäßige Bildung der Module möglich. Die entwickelte Methodik soll durch eine nachvollziehbare und validierte Vorgehensweise eine allgemeine Gültigkeit besitzen und den Übertrag auf weitere Bereiche der variantenreichen Serienfertigung ermöglichen.

3 Konzept eines multimethodischen Verfahrens

Um die herausgearbeitete Zielsetzung zu erreichen, die damit einhergehenden Forschungsfragen zu beantworten und Lücken in bestehenden Individuallösungen einzelner Methoden zu schließen, bedarf es einer strukturierten Methodik. Als eine Methodik wird dabei die festgelegte Art und Verfahrensweise von Einzelmethoden verstanden [109]. Hierzu wird zunächst ein übergreifender Ansatz entwickelt und vorgestellt.

3.1 Zielbild und Lösungsansatz

Infolge wechselnder technischer und wirtschaftlicher Anforderungen an das Produkt und an die Produktion im Umfeld der Automobilindustrie muss die Methodik ein in sich abgestimmtes und gleichzeitig anpassbares Rahmenwerk abbilden. Arbeitsziel ist es hier, mithilfe der Methodik die aus der Zielsetzung abgeleiteten Forschungsfragen beantworten zu können und sowohl Entwicklungs- als auch Planungsumfänge innerhalb des FEP in Bezug auf den Schwerpunkt der "Fahrzeugkarosserie" zu reduzieren.

Dabei orientiert sich die grundsätzliche Idee des Ansatzes am iterativen Lösungsprozess zur Vereinigung von Einzellösungen und unterschiedlichen Strategien im Leichtbau nach ELLENRIEDER ET AL. [47]. Durch die Verknüpfung mehrerer Leichtbaustrategien werden dort Einzellösungen zur Gewichtsreduktion so lange miteinander abgeglichen, bis das angestrebte Gewichtsziel des Gesamtfahrzeugs erreicht und die festgelegten Zielgrößen (Funktion, Kosten und Gewicht) vollständig aufeinander abgestimmt sind. Diese Vorgehensweise zeichnet sich besonders durch das kritische Hinterfragen von Einzellösungen und die Kenntnis über Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Leichtbaustrategien aus [47]. Insbesondere im Bereich des Bedingungsleichtbaus, als wesentlicher Bestandteil der Leichtbaustrategien, werden äußere Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen (z. B. auch ökologische Gesichtspunkte wie der Energiebedarf zur Herstellung [110]) früh im Entwicklungsprozess hinsichtlich der notwendigen Anforderungen hinterfragt [111]. Mithilfe neu gewonnener Erkenntnisse über Wirkungszusammenhänge, Gegensätzlichkeiten sowie gegenläufige Abhängigkeiten können vielfältige Rückschlüsse und entscheidende Hinweise für eine veränderte Leichtbauweise generiert werden. So entsteht eine durchgängig abgestimmte und ganzheitliche Betrachtung mit ableitbaren Potenzialen (vgl. Abbildung 3-1).

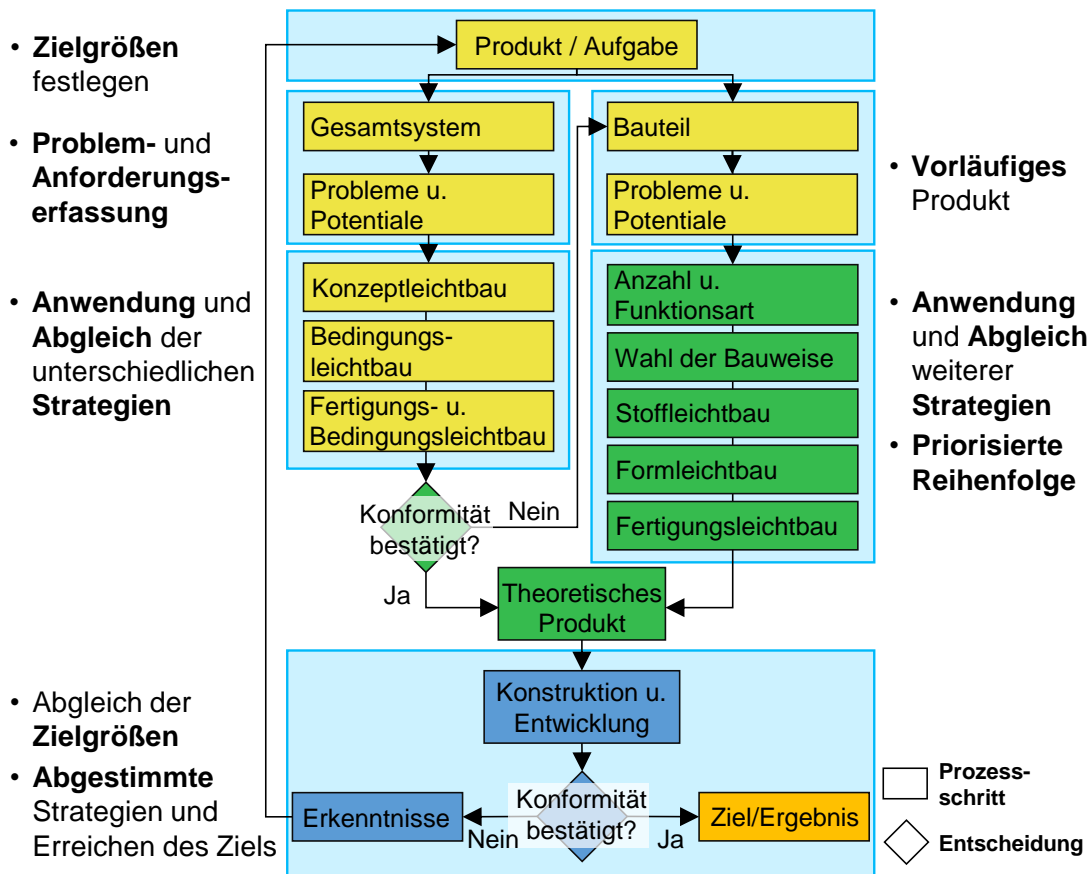


Abbildung 3-1: Ablauf zur Umsetzung von Leichtbaustrategien in Anlehnung an [47]

Die grundsätzliche Idee eines iterativen Problemlösungszyklus zur Vereinigung unterschiedlicher Konzepte zu einer abgestimmten Strategie wird für die hier identifizierte Problemstellung adaptiert. Entsprechend der ganzheitlichen Anwendungsstrategie aus Abbildung 3-1 gilt es im ersten Baustein der Methodik ((1) in Abbildung 3-2), relevante Zielgrößen festzulegen und diese mit der strategischen Unternehmensausrichtung abzugleichen. Weiterhin sind Anforderungen aus dem Produkt (Karosserie) und der Produktion (Karosseriebau) über einen strukturierten Ansatz zu erfassen und einzuordnen. Damit lässt sich die erste Forschungsfrage beantworten. Es besteht darüber hinaus der Anspruch an die Methode zur iterativen Anpassbarkeit an neue Erkenntnisse oder sich ändernden sowie hinzukommenden Anforderungen. Im Zuge dessen wird im Entwicklungsverlauf der kritische Einfluss auf das Gesamtsystem erfasst, um unter Einbeziehung der spezifischen Gewichtungen ebendiese Anforderungen zusätzlich nach Funktionsbezug zu klassifizieren.

Mit Bezug zur zweiten Forschungsfrage - *Wie können mehrere identifizierte Anforderungen und die daraus entstehende Modulzuordnung vergleichend und bewertbar dargestellt werden?* - gilt es, im Methodenbaustein der Vereinheitlichung die erkannten

Anforderungen und Wirkungsinterdependenzen über eine standardisierte Darstellungsart zu verbinden. Damit ist durch **(2)** in Abbildung 3-2 sicherzustellen, dass trotz unterschiedlicher Anforderungen eine einheitliche Darstellungsweise besteht. Erfasste Abhängigkeiten, die auf verschiedene Module und Elemente wirken, sind folglich vergleichbar aufzuarbeiten und hinsichtlich der Zielgrößen zu beurteilen. Um in Bezug auf die erste und zweite Forschungsfrage nicht nur externe Anforderungen und Wissen von außerhalb zu nutzen, sind Erkenntnisse aus vergangenen Projekten wie auch explizites Domänenwissen durch den Methodenbaustein **(3)** mit einzubinden.

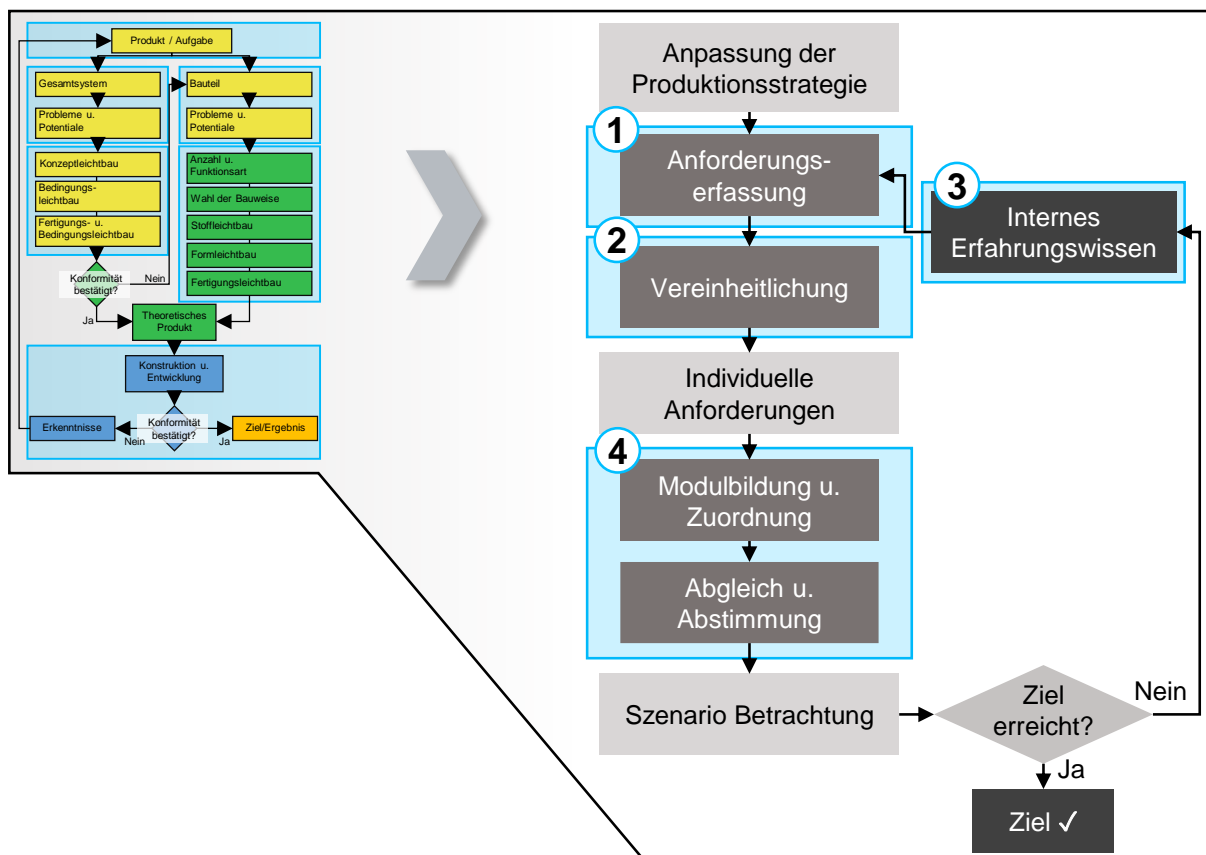


Abbildung 3-2: Entwicklung der Methodenbausteine für die Methodik

Im letzten Methodenbaustein **(4)** sind die erfassten und strukturierten Anforderungen aus dem internen und externen Umfeld zu individuellen Modulen zusammenzufassen und abzugleichen. Über Bewertungsgrößen zur Relevanz und Priorisierung der jeweiligen Anforderung werden gegensätzliche und übereinstimmende Modulbildungen zu einer übergreifenden Kombinationslösung zusammengefasst. Als Ergebnis entstehen damit mögliche Szenarien zur Modulbildung in Abhängigkeit von der Produkt- und Produktionsstrategie. Das Ergebnis der individuellen Szenario-Betrachtung kann dann wiederum bewertet und umgesetzt oder bei weiterem Anpassungsbedarf, wie einer Iterationsschleife, als bestehendes Erfahrungswissen genutzt werden. Damit kann

schließlich auch die dritte Forschungsfrage beantwortet werden. Der Mangel an Wissen über Zusammenhänge unbekannter, unstrukturierter und nicht abgestimmter Grundanforderungen wird durch dieses multimethodische Verfahren ausgeräumt und die vorliegende Problemstellung gelöst. Es entsteht durch die Gesamtheit aller Methodenbausteine ein objektives Planungswerkzeug, um während der frühen Phasen des FEP alle beteiligten Projektpartner zu unterstützen. Durch den Lösungsansatz und das Konzept eines multimethodischen Verfahrens ist es möglich, die Forschungslücke zu schließen und anpassungsfähige Produkt- und Produktionsmodule zu bilden. Damit können nicht nur technologisch und konstruktiv konfliktfreie Produktmodule, sondern auch gleichermaßen wirtschaftlich und kosteneffiziente Produktionsmodule mit hoher Qualität generiert werden. Neben der Reduktion der Entwicklungs- und Planungszeiträume durch die Vermeidung von Änderungs- und Nacharbeitszyklen lassen sich durch abgestimmte und anforderungsgerechte Module markt- und variantenspezifisch abgeleitete Karosseriederivate durch den verringerten Anpassungsbedarf entwickeln.

3.2 Entwicklungen zum multimethodischen Verfahren

Für das vierstufige multimethodische Verfahren und den kombinierten Lösungsansatz gilt es, passende Verfahrensweisen für jeden Methodenbaustein zu ergänzen. Es erfolgt hierzu die Aufbereitung und Erläuterung der fachlich-methodischen Anforderungen an die ausgewählten Methoden und Ansätze.

3.2.1 Anforderungserfassung und -analyse

Im ersten Schritt wird ein methodengeführter Prozess zur Identifikation, Erfassung und Analyse von internen wie auch externen Produkt- und Prozessanforderungen benötigt. Neben den Grundanforderungen an die Karosseriestruktur (Maßhaltigkeit, Gewichtsreduktion etc.), finden sich ebenfalls Prozessanforderungen aus dem Karosseriebau mit Einfluss auf die Modulbildung. Diese Anforderungen bilden somit die Ausgangslage für den weiteren Verlauf des multimethodischen Verfahrens.

Daher besteht der Bedarf,

- technische und wirtschaftliche Anforderungen strukturiert entlang bestehender Zielgrößen zu erfassen,
- diese nachvollzieh- und wiederholbar sowie transparent darzustellen wie auch
- Bewertungsgrößen einzubringen und entsprechende Partner einzubinden.

Das "Requirements Elicitation" (kurz: RE) stellt hierzu einen geeigneten Prozess dar, um Funktionsanforderungen an das Produkt und die Produktion aus den einflussnehmenden Bereichen strukturiert zu erfassen und zu analysieren. Die grundlegende Methodik hinter RE stammt aus der Datenverarbeitung und computergestützter Systeme, um notwendige Voraussetzungen an die Systemfunktion identifizieren, dokumentieren und weiter ausarbeiten zu können [112].

Bislang erfolgt die Ergänzung von bestehenden Grundanforderungen an die Karosseriemodule lediglich mithilfe von domänengeführtem Wissen. Durch einen neuen, strukturierten Ansatz sollen somit zufällige und von Einzeldomänen abhängige Suchprozesse vermieden und durch einen methodengeführten Prozess der Anforderungserfassung im Methodenbaustein **(1)** ersetzt werden. Weiterhin besteht der Bedarf, erfolgs- und änderungskritische Anforderungen zu selektieren und nach der Einflusswirkung bewertbar zu gestalten. Durch die Auswahl geeigneter Methoden aus dem RE entsteht demzufolge ein nachvollziehbarer Prozess zur Analyse von Anforderungen an die Karosseriestruktur und den Karosseriebau.

3.2.2 Einheitliche Darstellung und Transformation

Nach dem ersten Prozessschritt liegen die erfassten technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an die Produkt- und Produktionsmodule als unstrukturierte Datensätze und in unterschiedlichen Datenformaten vor. Für die Darstellungsart gilt als Voraussetzung, dass komplexe Abhängigkeiten, Iterationen, logische Folgen sowie Gewichtung übersichtlich zu erfassen sind und ergänzende Anforderungen ebenfalls abgedeckt und ohne Informationsverlust vollständig abgebildet werden können.

Hierzu wird eine übertragbare und robuste Darstellungsweise entlang definierter Kriterien ausgewählt, um gleichermaßen technische wie auch wirtschaftliche Anforderungen an das Produkt und die Produktion zu modellieren. In der Literatur sowie in der Praxis zur Modularisierung von Produkten und Prozessen finden sich verschiedene Verfahren zur einheitlichen Darstellung von Komponenten in Module und Modulgruppen [113]. Um diese unterschiedlichen Anforderungen (technisch, wirtschaftlich etc.) in einer durchgängigen Darstellungsart aufzubereiten, werden aus den Anforderungen resultierende Wirkungsabhängigkeiten in die Matrizenform modelliert und durch den Methodenbaustein **(2)** in Abbildung 3-2 vereinheitlicht.

3.2.3 Prozesswissen und deskriptive Analyseverfahren

Für eine ganzheitliche Vorgehensweise zur Bildung von anforderungsgerechten Modulen bedarf es ebenfalls der Berücksichtigung von Erfahrungs- und Prozesswissen **(3)** (vgl. Abbildung 3-2) aus abgeschlossenen Projekten. Die Erfahrung von Domänenexperten nimmt hierbei eine entscheidende Stellung ein, um kritische Tragweiten abzuschätzen, abschließend angepasst reagieren oder vorausschauend agieren zu können. Bislang ungenutzte Produkt-, Prozess und Produktionsinformationen und damit auch explizites Wissen, unterstützen die Anpassung bestehender Produkte wie auch die Auslegung neuer Baureihen und Fahrzeugarchitekturen. Das Prozesswissen und die Wissensgenerierung aus internen Prozessdaten werden somit als vordefinierte Anforderung innerhalb des multimethodischen Verfahrens verankert. Insbesondere in der Fahrzeugstruktur beeinträchtigen kurzfristige Anpassungen die Produktions- und Kapazitätsplanung und lösen neben hohen Änderungskosten meist auch zeitkritische Veränderungen mit Einfluss auf den Produktionsstart aus [10]. Die abgeleiteten Änderungskosten können bis zu 40 % der Gesamtinvestitionskosten betragen [114].

Trotz des umfassenden Einsatzes computergestützter Anwendungen und des Risikos nachträglicher Investitionskosten, findet die Planungs- und Entwicklungsleistung sowie Koordination kritischer Anforderungen und Änderungen vorwiegend erfahrungs- sowie dokumentenbasiert und auf Basis von Domänenwissen statt [115]. Dabei entsteht durch die Dokumentation aller Entwicklungsschritte je Quality Gate sowie Anpassungen im FEP eine Vielzahl an Informationen, die es als explizites Prozesswissen zu integrieren gilt. Die Analyse und Integration bislang ungenutzter Prozessdaten und digitaler Anwendungen im Umfeld der industriellen Fertigung stellt daher ein neues und vielversprechendes Forschungsfeld zur Optimierung komplexer Produktionssysteme dar [116]. Über deskriptive Analysen zur Wissensgenerierung aus dem Knowledge-Discovery-in-Databases (KDD)-Prozess werden somit historische Daten genutzt, um

- unbekannte Zusammenhänge festzustellen,
- änderungskritische ET, ZB und Fügetechniken zu identifizieren sowie
- zeit- und kapazitätskritische Änderungen am Produkt oder Prozess darzustellen [117, 118].

Damit ist es möglich, sich wiederholende Muster sowie konkrete Handlungsempfehlungen als internes Prozesswissen für die jeweilige Betrachtungsebene abzuleiten. Folglich entstehen eine neue Einflussgröße und Entscheidungsunterstützung bei der

Auswahl und Bildung produktabhängiger und produktunabhängiger Module. Damit können nicht nur konstruktive und wirtschaftliche Modulentscheidungen auf Grundlage von quantifizierbarem und nachvollziehbarem Wissen über Änderungszyklen schneller erfolgen, sondern auch sich wiederholende Planungsfehler und hohe Änderungskosten vermieden werden. Hierfür stellen insbesondere seither unbekannt technologische Korrelationen der Produkte und Prozessparameter eine wiederholbare Datengrundlage für neue Lösungsansätze dar [116].

3.2.4 Modulbildung und Abgleich der Anforderungen

Um die Vielzahl an identifizierten Anforderungen, das erfasste interne Prozesswissen sowie die einheitlich aufbereiteten Zwischenergebnisse untereinander abgleichen zu können, wird im letzten Methodenbaustein **(4)** (vgl. Abbildung 3-2) eine individuelle Moduleinteilung je Anforderung abgeleitet. Entsprechend der Beschreibung zur Modulbildung in Kapitel 2.3.1 erfolgt dazu die Zusammenfassung und Einordnung der Einzelteile und Komponenten in Module durch den größtmöglichen Grad an interner Verbindung bei gleichzeitig hoher externer Unabhängigkeit. Es entsteht für jede Anforderung eine individuelle Modulzusammensetzung sowie eine angepasste Anzahl an Modulen im Gesamtsystem. Die Gegenüberstellung mehrerer Modulbildungen und Anforderungen ermöglicht daher den Vergleich übereinstimmender und abweichender Module. Um hierfür messbare Größen zu erfassen und damit die Relevanz und Einflusswirkung auf die Karosseriestruktur oder den Produktionsprozess bewerten zu können, werden die Gewichtungen und Priorisierungen je Anforderung nach quantitativen wie auch qualitativen Kriterien (z. B. Modulanzahl oder Machbarkeit) entwickelt.

Als Ergebnis bilden sich folglich eine vollständig abgestimmte und priorisierte Verteilung sowie Zuordnungen der Komponenten in Module unter Einbeziehung erfolgskritischer und funktionsbezogener Anforderungen heraus. Darüber hinaus ermöglicht die Modulaufteilung die Ausarbeitung von alternativen Szenarien und Handlungsempfehlungen. Im Rahmen der Validierung und Bewertung der hier erarbeiteten Gesamtmethodik wird darüber hinaus eine Prüfung der Szenarien bzgl. deren generelle Umsetzbarkeit und Abweichungen in Bezug auf die vorherige Modulanordnung durchgeführt. Der daraus folgende Anpassungsbedarf kann wiederum als Erfahrungswissen im Methodenbaustein **(3)** in Abbildung 3-2 rückgeführt werden. So entsteht durch den zyklischen und iterativen Aufbau des multimethodischen Verfahrens eine an ausgewählte Zielgrößen angepasste Modulzuordnung.

3.3 Das multimethodische Konzept zur anforderungsgerechten Modulbildung

Die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Methodenbausteine **(1)** bis **(4)** stellen das Konzept des multimethodischen Verfahrens zur Erfassung, Vereinheitlichung und des Abgleiches von internen wie auch externen Anforderungen an die Karosseriestruktur dar. Durch die Kombination, Bewertung, Vereinheitlichung sowie die Abstimmung zwischen internen und externen Anforderungen entsteht ein ganzheitlicher und iterativer Lösungsprozess hinsichtlich der Problemstellung sowie der Erreichung des Forschungsziels (vgl. Abbildung 3-3).

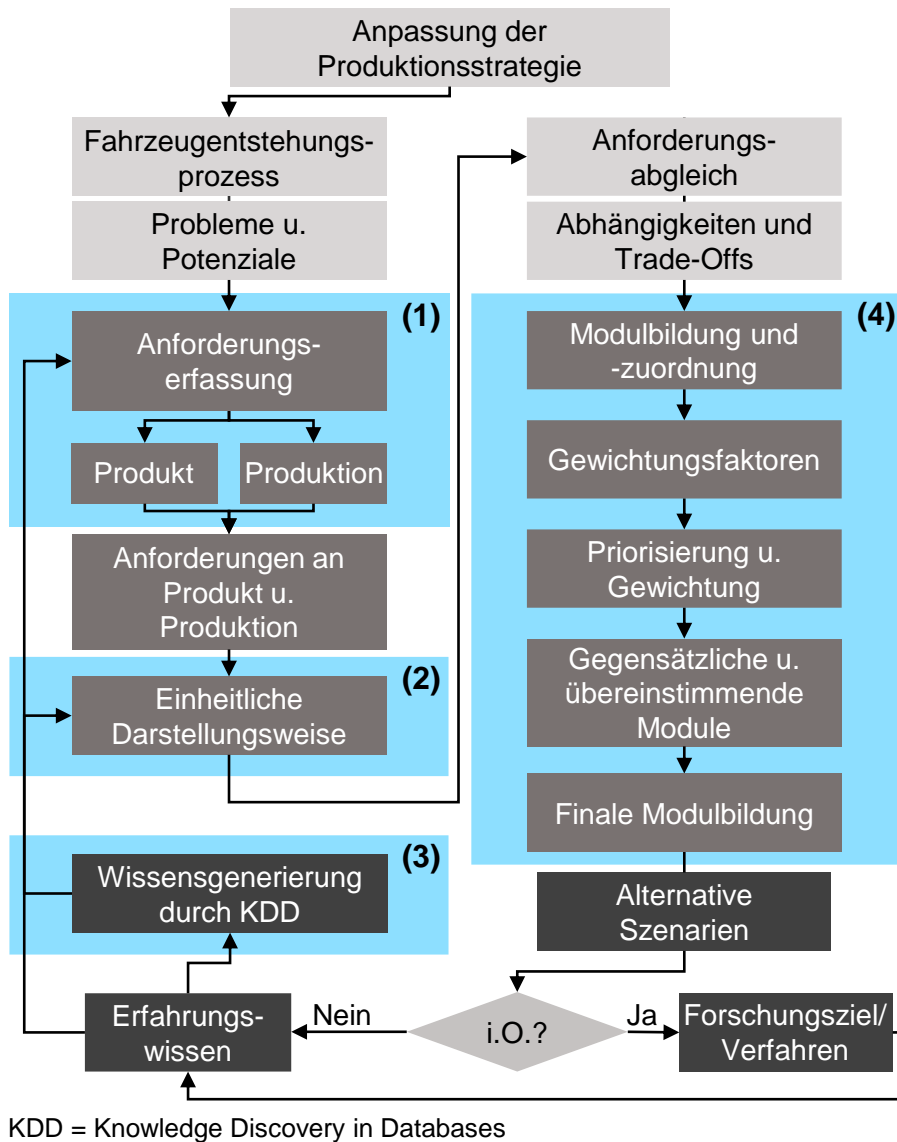


Abbildung 3-3: Konzept zum multimethodischen Verfahren nach [119]

Insbesondere der Einbezug von Prozesswissen und Erfahrung aus früheren Projekten als eigenständige Anforderungsgröße grenzt das neue multimethodische Verfahren

von bestehenden und nicht anpassbaren Vorgehensweisen der Wissenschaft sowie eingefahrener Praxis ab. Der Methodenbaustein **(4)** als Prozessschritt zum Abgleich abgestimmter Modulzuordnungen nimmt eine gesonderte Stellung ein. Neben konventionellen Vorgehensweisen können hierbei zusätzlich rechnergestützte IT-Methoden eingesetzt werden. Folglich entwickeln sich eine quantifizierbare sowie iterative Aufbereitung der Ergebnisse und gleichzeitig eine Reduktion der Abhängigkeit von einzelnen Domänenexperten. Daraus ergibt sich erstmals die Möglichkeit, alternative Produkt- und Produktionsstrategien zu generieren und durch kurzzyklische Anpassungen unterschiedliche Szenarien auf Konformität zur festgelegten Zielgröße zu prüfen.

Mit dem Konzept einer multimethodischen Vorgehensweise entsteht folglich ein Instrument, um von der strukturierten Anforderungserfassung über eine einheitliche Darstellungsform bis hin zur Integration von Prozesswissen eine abgestimmte Modulaufteilung abzuleiten. Die dafür entwickelten Methodenbausteine aus Abbildung 3-3 werden in Kapitel 4 detailliert beschrieben. Die Validierung zur Machbarkeit und Praxistauglichkeit des multimethodischen Verfahrens wird später in Kapitel 5 anhand einer alternativen Fahrzeugstruktur durchgeführt und durch die Darstellung alternativer Produktszenarien bewertet.

3.4 Positionierung im Fahrzeugentstehungsprozess

Das multimethodische Vorgehen zur anforderungsgerechten Bildung neuer Produkt- und Produktionsmodule wird in den ersten Phasen der Vorentwicklung innerhalb der Produktkonzeption im FEP positioniert. Auch aus Prozesssicht bestehen die Notwendigkeit und der Bedarf, früh Produktionsmodule an die Produktkonzeption anzupassen [26]. Die strukturierte Beschreibung beeinflussender Produkt- und Produktionsanforderungen unterstützt dabei die Entwicklung der ersten Konzepte und Prototypen. Insbesondere in den frühen Entwurfsphasen können die hieraus abgeleiteten Maßnahmen ohne erhebliche Kostenwirkungen umgesetzt und berücksichtigt werden. So ist es beispielsweise zu einem frühen Zeitpunkt im FEP noch möglich, eingesetzte Fertigungsverfahren zu ändern oder auch zugelieferte Komponenten und Baugruppen zu modifizieren, um weitere Einzelteile zu erweitern oder zu reduzieren. Für die Entwicklung und Planung neuer Baureihen, Derivate oder Varianten entstehen demzufolge zu einem frühen Zeitpunkt innerhalb des FEP bedarfsgerechte Module, die die Erfüllung der ausgewählten Anforderungen an die Karosseriestruktur sicherstellen.

4 Multimethodisches Verfahren zur anforderungsgerechten Modulbildung

Das in Kapitel 3 beschriebene Konzept zum multimethodischen Verfahren zur Modulbildung wird in den nachfolgenden Kapiteln weiter detailliert und ein Lösungsansatz mit Demonstrator in Bezug auf den Karosserieunterbau entwickelt. Der iterative Aufbau ermöglicht auch die Adaption des Verfahrens an zukünftige Fahrzeug-, Entwicklungs- und Produktionskonzepte sowie an variable interne und externe Anforderungen.

4.1 Anforderungserfassung und -analyse

Die Erfassung und Analyse von Einflüssen auf das zu betrachtende System der Fahrzeugstruktur durch die Methoden des "Requirements Elicitation" dient als erster Schritt des multimethodischen Verfahrens zur strukturierten Identifikation und Zusammenfassung bestehender Grundanforderungen sowie neuer technisch-organisatorischer und wirtschaftlicher Anforderungen an die Karosseriestruktur und den Karosseriebau.

Das übergreifende Ziel der Erfassung und -Analyse besteht darin, die Defizite und Nachteile unstrukturierter Vorgehensweisen durch einen methodengeführten Prozess zu reduzieren [112]. Die Reduktion von Informationsverlusten, Redundanzen und Ineffizienzen sowie die Steigerung der Informationsqualität und Transparenz stehen dabei im Fokus. Daher ist ein Prozess zu entwickeln, durch den relevante Anforderungen an die Bildung von Produkt- und Produktionsmodulen analog der verknüpften Domänenfolge (Kunden-, Funktionsdomäne, physikalische Domäne und Prozessdomäne) nach SUH (*Axiomatic Design*) vollständig in den Betrachtungsumfang einbezogen werden können [120]. Folglich werden im Rahmen des Zuordnungs- und Dekompositionsprozesses die Verknüpfungen und Wirkungsfolgen zwischen den Anforderungen hinterfragt, miteinander abgeglichen und verfeinert [120].

Neben der methodisch geführten Erfassung technischer Anforderungen aus unterschiedlichen Bereichen im Umfeld der Fahrzeugkarosserie sind diese hinsichtlich der Einflusswirkung auf Teilaspekte zur Komplexität (z. B. Anzahl an Teilen, Verbindungen und Kreisläufe) zu bewerten und zu priorisieren. Als Ergebnis entsteht somit eine auf Zielgrößen (z. B. Anteil standardisierter Module) angepasste und analysierte Aufzählung von Grund- und Zusatzanforderungen an die Karosseriestruktur unter Einbezug teileabhängiger Wechselwirkungen und strategischer Komponenten.

4.1.1 Methodenauswahl zur Anforderungserfassung

Um strukturiert technische als auch wirtschaftliche Anforderungen an die Fahrzeugkarosserie und den Karosseriebau zu erfassen und in einen reproduzierbaren Prozess zu überführen, werden etablierte Methoden und Werkzeuge aus dem "Requirements Engineering" der Softwareentwicklung auf die vorliegende Problemstellung ausgerichtet. Diese berücksichtigen gleichermaßen funktionale (mit Produkt- und Zweckorientierung) als auch nicht funktionale Anforderungen (Umgebungs- und Randbedingungen) an die Karosseriemodule. Um nahezu alle Einflussfaktoren vollständig abzudecken, erfolgt noch vor der Methodenauswahl die Festlegung des Anwendungsumfelds und -systems der Domänenfolge [120, 121]. In Bezug auf die Zielgrößen können alle relevanten Anforderungen und Teilbereiche aus dem Umfeld durch die eindeutige Abbildung und Erfassung der Einflussgrößen nachvollziehbar erfasst werden.

Im Anschluss an die Definition des Umfeldes im FEP sowie der relevanten Zielgrößen für die Produkt- und Produktionsmodule findet der Auswahlprozess der eingesetzten Methoden und Werkzeugen statt. Dabei gilt die Festlegung der Methoden zur Erfassung von Grundanforderungen als kritischer und ergebnisrelevanter Erfolgsfaktor [122]. Ausgewählte Methoden müssen hierzu eine Vielzahl an Informationsquellen abdecken und neben relevanten Dokumenten, Systemen und Berichtsformaten ebenfalls implizites Wissen der Domänenexperten einbinden können [112]. Auch Unsicherheiten, weniger bekannte Wirkungszusammenhänge sowie strategische Anpassungen sind zu identifizieren und vollständig in den Erfassungsprozess mit einzubeziehen [90].

Für die produktseitige Karosseriestruktur sowie den produktionsseitigen Karosseriebau wurden daher aus 23 Ansätzen der Anforderungserfassung des RE eine Auswahl an 11 Methoden selektiert [112, 121–123]. Hierfür erfolgte die Übernahme bereits etablierter Methoden der Anforderungserfassung aus dem FEP. Weitere und ergänzende Methoden sowie Vorgehensweisen zur Lösung des vorliegenden Problems wurden in Zusammenarbeit mit erfahrenen Karosserieplanern und -entwicklern unter Berücksichtigung der Zielgrößen zur strategischen Ausrichtung in die Methodensammlung aufgenommen. So entsteht in Abhängigkeit zum Umfeld und den relevanten Zielgrößen die Bündelung der Vorgehensweisen in drei übergreifenden Methodenzusammenfassungen (vgl. Abbildung 4-1). Diese Vorgehensweisen ergänzen und detaillieren durch logisch kombinierte Methoden, erweiterte Analysen sowie durch die Einbindung unterschiedlicher Projektbeteiligter die bestehende Methodenauswahl [124].

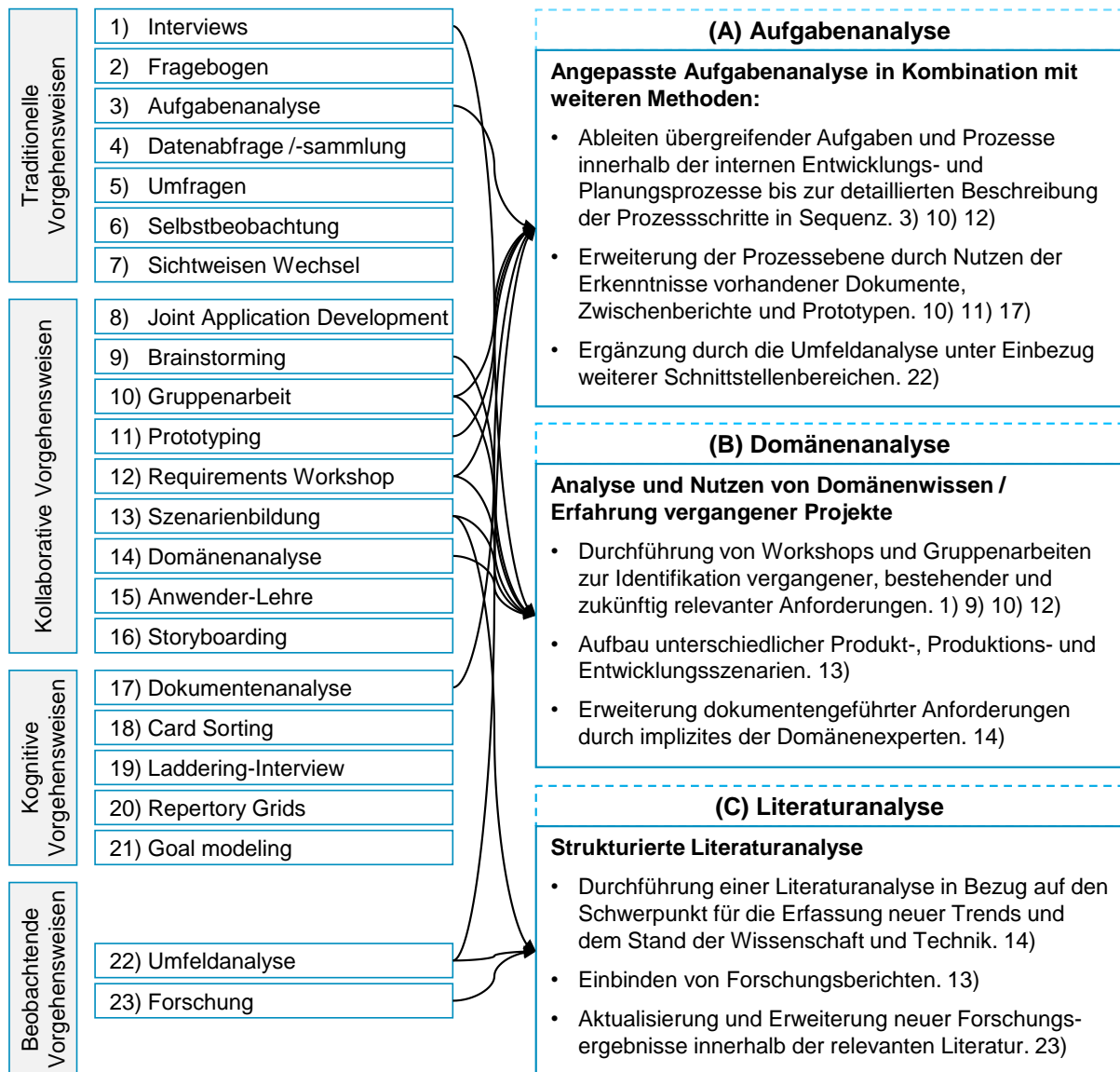


Abbildung 4-1: Auswahl und Kombination der Methoden zur Anforderungserfassung

Die Aufgabenanalyse **(A)** beinhaltet neben der Auswertung der Phasen aus dem FEP und der Ableitung der technisch-organisatorischen Anforderungen für jeden Prozessschritt ebenfalls kollaborative Vorgehensweisen (vgl. Abbildung 4-1). Jede Phase und jeder Prozessschritt innerhalb des FEP stellt daher eine zu erfüllende Aufgabe an die Projektorganisation dar, die es durch die Projektbeteiligten zu erfüllen gilt. Damit können aus den Phasen und Aufgaben der Planungs- und Entwicklungsprozesse sowohl technische als auch wirtschaftliche (Grund-) Anforderungen übertragen werden. Beispielsweise dienen Dokumente der Projektorganisation wie Lasten- oder Pflichtenhefte dazu, bereits bestehende Grundanforderungen an das Produkt und den Prozess abzuleiten und zu vereinigen [112, 125]. Auch Meilensteinberichte aus den Quality Gates können hierfür genutzt werden. Neben Grundanforderungen können ebenfalls nicht funktionale Anforderungen (z. B. Rahmenbedingungen der Produktstruktur) mit in die

Betrachtung aufgenommen werden. Der Fokus der Aufgabenanalyse liegt folglich auf der strukturierten Erfassung und Ableitung von Grundanforderungen aus bestehenden Dokumenten unter Einbindung der relevanten Prozessbeteiligten.

In der Domänenanalyse **(B)** wird durch die Kombination der kollaborativen Vorgehensweisen das Domänenwissen und die Projekterfahrung genutzt, um bevorstehende technologische und globalwirtschaftliche Veränderungen einzuschätzen, bestehendes implizites Wissen miteinzubinden und zu Produkt- und Produktionsszenarien zu entwickeln. Durch diese bereichsübergreifende Arbeitsweise ist es folglich möglich, neue Perspektiven einzunehmen und derzeitige technische und wirtschaftliche Anforderungen zu hinterfragen, zu selektieren und beispielsweise neue Technologien (Produkt und Produktion) zu identifizieren. Durch die Verbindung schnell generierter Informationen durch Interviews oder Brainstorming-Methoden mit anschließenden vertiefenden Gruppenarbeiten werden individuelle Vorteile der Methoden zur Anforderungserfassung zweckmäßig kombiniert [112].

Über die vorwiegend prozessgetriebenen und erfahrungsbasierten Veränderungen hinaus, dient die erweiterte Literaturanalyse **(C)** zur Identifikation neuer Handlungsfelder. Beobachtende Verfahren wie die Umfeldanalyse definieren hierzu den inhaltlichen Schwerpunkt für die Durchführung einer detaillierten Analyse zum derzeitigen Stand der Wissenschaft. Neuere Forschungsergebnisse, aktuelle Trends sowie Zukunftsszenarien ergänzen damit die Ergebnisse aus **(A)** und **(B)** durch weitere Ansätze für extern induzierte technische und wirtschaftliche Anforderungen. Diese können im Verlauf der Analyse angepasst und durch Abstimmungen der Prozessbeteiligten auf Nutzen und Praxistauglichkeit diskutiert und untersucht werden.

Zusammenfassend lässt sich somit aus den drei kombinierten Methoden ein einheitlich strukturierter und methodengeführter Prozess zur Erfassung neuartiger sowie bestehender Anforderungen in Bezug auf das gesamte Umfeld der Fahrzeugstruktur (technologisch und wirtschaftlich) abbilden. Weiterhin entstehen definierte Freiheitsgrade, die in Abhängigkeit zur strategischen Ausrichtung, dem Betrachtungsumfang und dem Komplexitätsgrad angepasst werden können [123].

4.1.2 Einflüsse in Bezug auf die Karosseriestruktur

Für eine vollständige und vollumfängliche Betrachtung aller technisch-organisatorischen und wirtschaftlichen Anforderungen sind beispielsweise neben technologischen

Weiterentwicklungen ebenfalls allgemeine (Grund-) Anforderungen an die Karosseriestruktur zu erfassen. Die definierten Grundanforderungen an die Karosserie und den Karosseriebau stellen somit einen allgemeingültigen Grundbedarf dar. Durch neue Erkenntnisse und Weiterentwicklungen kann dieser Bedarf an zu erfüllenden Fähigkeiten und Bedingungen des Systems (Produkt und Produktion) erweitert und ergänzt werden. Diese Grundanforderungen bilden somit den derzeitigen Stand der Wissenschaft und Technik mit Bezug auf die Problemstellung aus Kapitel 1.2 ab. Beispielsweise können in der Architekturphase durch die Konzeptübernahme in der Bauteilentwicklung oder bei der Fixkostendegression durch die Einhaltung des Materialkonzepts eine Vielzahl an technischen und wirtschaftlichen Grundanforderungen abgeleitet werden (vgl. Abbildung 4-2).

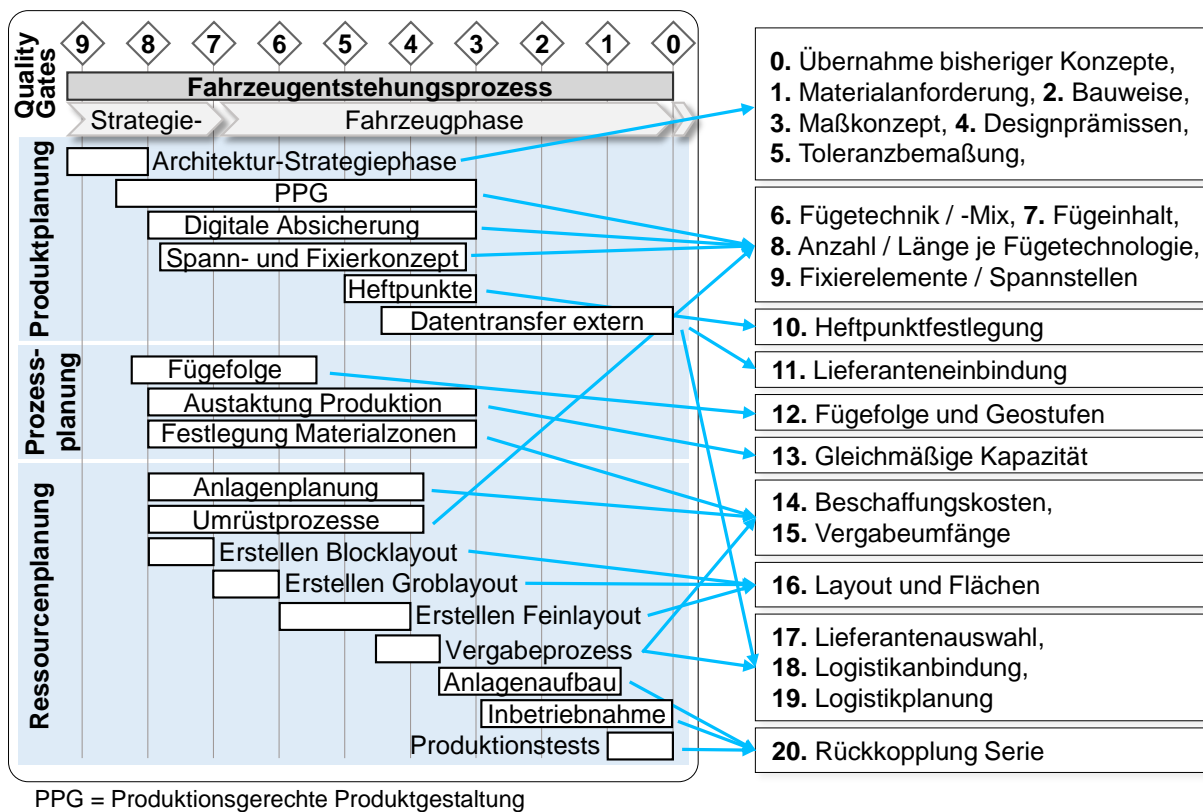


Abbildung 4-2: Auszug der technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Anforderungen als Ergebnis der Aufgabenanalyse in Anlehnung an [34, 35]

Entsprechend der Vorgehensweise im FEP (vgl. Abbildung 2-5) und der weiteren Detaillierung der Einzelprozesse nach BURR [34] und WALLA [35] erfolgt die Identifikation mehrerer Grundanforderungen durch die Aufgabenanalyse **(A)**.

In der frühen Fahrzeugarchitekturphase des FEP werden folglich grundlegende Prämissen festgelegt, wie zum Beispiel das baureihenübergreifende Material- und Maßkonzept. Damit bestimmen die erfassten Grundanforderungen an das Design, Material

und die geometrischen Toleranzen maßgeblich die Hauptstellgrößen zur Produktkomplexität [126]. Mit der Planung und Umsetzung der Produkt-Prototypen, der Anpassung von Betriebsmitteln sowie der Einplanung der Fertigungsanlagen in den Fabrikaufbau und -ablauf werden im weiteren Verlauf des FEP weitere produktionsseitige und meist technische Anforderungen definiert. Aus Inhalten der Produkt- und Fabriklastenhefte sowie der ersten Beschreibungen zur Heftpunkt- oder Fixierbelegung lassen sich sowohl technische als auch wirtschaftliche Anforderungen an das Produkt und die Produktion ableiten. Vordefinierte Kontrollpunkte und Dokumentenfreigaben (z. B. QG- und Audit-Freigaben) ermöglichen eine stetige Überarbeitung und zeitlich planbare Erfassung neuer Rahmenbedingungen. Auch die Produktionsflächenentwicklungen (Fabriklayout-Planung) sowie die Festlegung der Fügetechnikinhalte (Art, Anzahl und Länge) können zur Ableitung grundlegender technologisch-organisatorischer Anforderungen übertragen und aufgenommen werden.

Neben technischen können ebenfalls wirtschaftliche Anforderungen durch eine weitere Spezifizierung der Lasten- und Pflichtenhefte gemeinsam mit dem Lieferanten identifiziert und beschrieben werden. Zusammenfassend legt die Produkt- und Prozessdokumentation die Grundlage zur strukturierten Aufgaben- und Dokumentenanalyse und ermöglicht im Rahmen der Digitalisierung von Prozessketten vielfältige Möglichkeiten einer kurzzyklischen Erfassung von Produkt- und Prozessänderungen.

Ergänzend zu den Ergebnissen der Aufgabenanalyse (siehe Abbildung 4-2) wird das nicht dokumentierte und damit implizite Prozesswissen der Domänenexperten als eine feste Grundanforderung mit in die Methode zur Anforderungserfassung mitaufgenommen. Durch kollaborative Methoden und die logische Verknüpfung von gemeinsam genutzten IT-Systemen können Entwicklungs- und Planungsexperten sowie Schnittstellenpartner ihr Erfahrungswissen über beispielsweise wiederkehrende Prozessanpassungen als umsetzbare Handlungsempfehlung übertragen. Ziel ist es, sich wiederholende und erfolgskritische Problemstellungen innerhalb des Entwicklungsprozesses zu isolieren und als bereits bekannte und umzusetzende Entwicklungs- und Planungsaufgaben in zukünftigen Projekten aufzunehmen [112]. Das Ergebnis der Domänenanalyse und Gruppenarbeit **(B)** stellt folglich eine Zusammenstellung impliziter Prozessanforderungen dar, die in den frühen Phasen des FEP erfahrungsbasierte Entwicklungs-, Planungs- und Umsetzungsprobleme sowie wiederkehrende Prozessanpassungen berücksichtigt werden können. Im Vergleich zur aufgabenbasierten Vorge-

hensweise werden zudem weniger direkt und konstruktiv ableitbare Produkt- und Produktionsinhalte beschrieben, sondern unterstützende organisatorische Anforderungen mit Bezug auf eine effiziente Umsetzung der Prozessphasen im FEP generiert (vgl. Tabelle 4-1). Analog zur Methode des Requirements Elicitation der Softwareentwicklung werden die erfassten Prozessanforderungen als nicht funktional definiert und besitzen keinen direkten Produktbezug [124]. So stellt beispielsweise die Verringerung des Gesamtfahrzeuggewichts zwar zunächst eine produktseitige Grundanforderung dar, diese steht aber in starker Abhängigkeit zu grundlegenden Rahmenbedingungen wie der Entwicklungsleistung, Qualifikation und Erfahrung zur Umsetzung dieser technischen Anforderung.

Tabelle 4-1: Auszug der Ergebnisse zur Domänenanalyse und Gruppenarbeit

Fragestellungen:	Nr.	Ergebnis der Domänenanalyse und Gruppenarbeit
<ol style="list-style-type: none"> 1. Mit welchen Produktkennzahlen arbeiten Sie heute schon? 2. Welche technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an ein Produkt sehen Sie in der Zukunft? 3. Welche produktionsseitigen Anforderungen müssen erfüllt werden? 4. Welche Eigenschaften der Produkte sind zu analysieren? 	1)	Anzahl an Einzelteilen (ET)
	1)	Anzahl an Zusammenbauten (ZB)
	1)	Anzahl an Varianten je Derivat und Modell
	2)	Erkenntnisse vergangener Fahrzeugprojekte
	1) 4)	Produktreifegrad und Planungssicherheit (Seriennähe)
	3)	Zugänglichkeit Applikatoren, Schweißzangen und Greifer
	2) 4)	Aktualität der Planungs- und Entwicklungsdaten
	3)	Reduktion der Investitionskosten pro Anlage
	1)	Übernahmegrad an standardisierte Teile je ZB
	1) 3)	Reduktion Gesamtgewicht der Karosseriemodule
	2)	Möglichst später Entkopplungspunkt der Fahrzeugkarosse
		...

Mit der dritten Methode zur systematischen Literaturanalyse **(C)** wird der Stand der Wissenschaft und Technik in Bezug auf zu ergänzende technische, organisatorische und wirtschaftliche Anforderungen analysiert. Aufgrund der unternehmens- oder produktspezifischen Rahmenbedingungen (z. B. Fertigungsart, Produktumfänge etc.) werden die erfassten technischen Anforderungen an die problembezogene variantenreiche Serienfertigung angepasst. Beispiele produkt- und produktionsseitiger Anforderungen aus der Literaturanalyse sind dabei Referenzpunkte, Basismaße, Gewichtsdimensionen, Biege- und Torsionssteifigkeiten oder auch die Auslastung der Produktionsanlagen, die Abhängigkeit der festgelegten Taktzeiten und der Automatisierungsgrad der Anlagen [21–23, 27, 35, 87, 88, 97, 99, 127–131]. Grundsätzlich lassen sich

aus der Literaturanalyse eine Vielzahl an überschneidenden technischen und wirtschaftlichen Anforderungen von den Ergebnissen der Aufgaben- **(A)** und Domänenanalyse **(B)** feststellen. Daher ist die Methode der Literaturanalyse **(C)** als Ergänzung zu sehen, um zusätzliche und extern induzierte Anforderungen in Form von neuen Forschungsergebnissen oder technologischen Weiterentwicklungen zu erfassen.

Zusammenfassend konnten mithilfe der kombinierten Methoden 34 technische, organisatorische wie auch wirtschaftliche Anforderungen mit Bezug zum Problemumfeld identifiziert werden. Durch deren Aufteilung in Produkt- und Produktionsanforderungen findet eine eindeutige Zuordnung zu den Grundanforderungen statt. Über den aufgabenbasierten FEP und das implizite Expertenwissen sowie ergänzende Forschungsergebnisse entsteht eine vollumfängliche Aufstellung möglicher Grundanforderungen an das Produkt wie auch die Produktion. Tabelle 4-2 zeigt dazu auszugsweise den ermittelten produkt- und produktionsseitigen Bedarf an möglichen Anforderungen. Die ausführlichen Beschreibungen und Klassifizierungen der identifizierten Grundanforderungen sind hierzu im Anhang A1 zu finden.

Tabelle 4-2: Auszug aus den Analyseergebnissen zur Anforderungserfassung in Bezug auf die Karosseriestruktur und den Karosseriebau

Nr.	Anforderung	Beschreibung
A00	Konzeptübernahme ähnlicher Modulgruppen	Erhaltung des übergreifenden Konzeptaufbaus der Karosserie durch Einteilung der Elemente in Modulgruppen gleicher oder ähnlicher Funktion.
A01	Vereinheitlichung der Materialeigenschaften	Normierung der Blecheigenschaften in Bezug auf relevante Füge-, Handlings-, Materialparameter: Gewicht, Oberfläche, Blechdicken, Leitfähigkeit, Metallmatrix etc.
A02	Fertigungskonforme Karosseriebauweise	Die Karosseriebauweise entspricht den fertigungsbedingten Bedarfen zur Realisierung der Produktionskennzahlen (Einheiten pro Stunde, Geradeauslaufquoten etc.).
A03	Geometrische Umsetzung der Maßkonzeption	Einhaltung der design- und entwicklungsseitig gesetzten Referenzpunkte, Basismaße und Außenkonturen der Komponenten nach Package-Plan.
A04	Vereinbarkeit der Designprämissen	Bereitstellung der Anbindungspunkte der Karosseriestruktur zur Aufnahme der Außenhautflächen und Designelemente.
A05	Hohe Güte der Gesamttoleranzen	Einhaltung der qualitätsbestimmenden Geometriepunkte, Toleranzgrenzen und engen Toleranzwerte.
A06	Einheitlicher Einsatz der Verbindungstechnik	Vereinheitlichung der Füge- und Klebeverfahren und Reduzierung variantenspezifischer Sonderverbindungsverfahren und Hilfselemente.
...		

Dennoch stellt ein solches Analyseergebnis lediglich eine spezifische Momentaufnahme zum derzeitigen Stand der automobilen Entwicklung in einem temporären Problemumfeld dar. Neue Erkenntnisse aus der laufenden Entwicklung und Planung, den äußeren Rahmenbedingungen sowie Veränderungen der Ist-Situation führen zu neuen und bislang unbekanntem technischen, organisatorischen wie auch wirtschaftlichen Anforderungen. Um beispielsweise weitere problembezogene Anforderungen infolge des zunehmenden Wandels der Antriebskonzepte hin zur Elektromobilität vollständig identifizieren zu können, ist der methodengeführte Prozess zur Anforderungserfassung und -analyse (vgl. Abbildung 4-1) iterativ und regelmäßig durchzuführen.

Damit sind die Grundanforderungen aus Tabelle 4-2 durch strategische Anpassungen, technologische Weiterentwicklungen und sich verändernde betriebswirtschaftliche Ziele hinsichtlich der volatilen Ausgangssituation aktuell zu halten und an die Problemstellung anzupassen. Neue und bislang unbekannte technisch-organisatorische und wirtschaftliche Anforderungen können so strukturiert erfasst und nachvollziehbar beschrieben werden.

4.1.3 Klassifikation und Bewertung erfasster Anforderungen

Aus den unstrukturierten Einzelbedarfen entsteht im nächsten Schritt eine Auswahl an erfolgskritischen und strategisch relevanten technisch-organisatorischen sowie wirtschaftlichen Anforderungen. Neue problembezogene Anforderungen werden damit von unkritischen Grundanforderungen getrennt und gesondert hervorgehoben. Neben der qualitativen Bewertungsmöglichkeit sowie der Einordnung durch die Fachbereiche werden zusätzliche quantitative Kenngrößen genutzt. Hierzu erfolgt die Klassifikation und Bewertung der Komplexität nach KRAUSE UND GEBHARDT [18] (vgl. Abbildung 4-3).

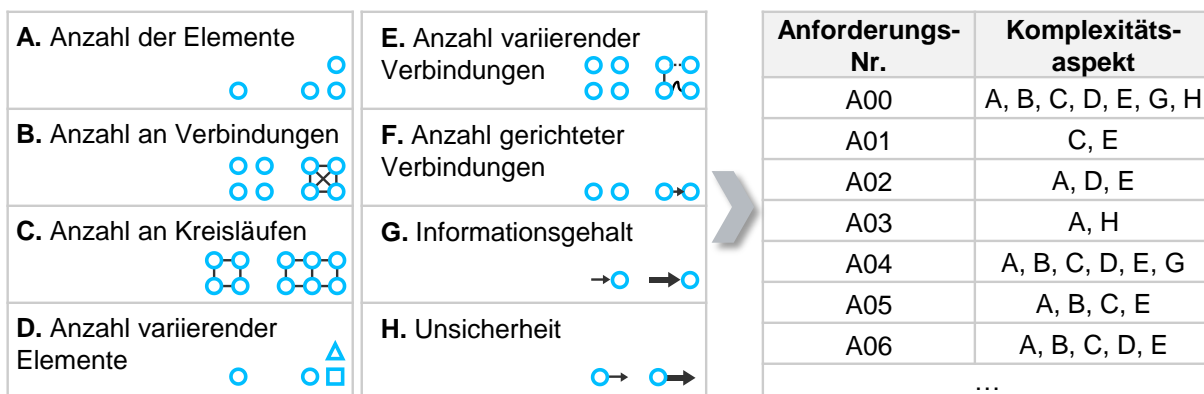


Abbildung 4-3: Klassifikation der acht Teilaspekte zur Komplexität nach [18, 132], siehe auch Tabelle 4-2

Durch die Zerlegung der Anforderungen aus Tabelle 4-2 in objektive Teilaspekte der Komplexität (z. B. Anzahl an Elementen, Verbindungen und Kreisläufe) entstehen somit definierte und bewertbare Messgrößen [132]. So beeinflusst beispielsweise die Umsetzung der geometrischen Maßkonzeption (A03, Tabelle 4-2) maßgeblich die Komplexität durch zusätzliche Elemente (z. B. Verstärkungen im Crash-Fall) wie auch die Unsicherheit über zukünftige Änderungen (z. B. gesetzliche Regularien). Je mehr Teilaspekte erfüllt werden, desto höher ist die Einflussnahme auf die Gesamtkomplexität im Produkt und in der Produktion. Die stärkere Einflussnahme und gestiegene Sensitivität komplexer Anforderungen gegenüber beispielsweise kurzfristigen Anpassungen resultiert wiederum in einer verringerten Planungsgenauigkeit und kurzzyklischeren Abstimmungsbedarfen zwischen den Prozessschritten und Fachbereichen. Um diese Defizite zu vermeiden, erfolgt zunächst die Zuordnung der erfassten Analyseergebnisse entlang der Teilaspekte und Eigenschaften zur Komplexität (A-H in Abbildung 4-3). Technische wie auch wirtschaftliche Anforderungen werden daher anhand einer oder mehrerer konstruktiver und gestalterischer Kenngrößen der Komplexität bewertet. Die Bewertung und Erfassung des jeweiligen Komplexitätsaspekts erfolgt dabei über eine qualitative- und quantitative Bewertung des Gesamtkonzepts zur ausgewählten Anforderung durch die Domänenexperten. Die Bewertung und Klassifikation erlaubt somit Rückschlüsse auf die Einordnung und Abgrenzung in erfolgskritische und relevante (Grund-) Anforderungen.

Zudem entsteht durch die qualitative Sichtung eine nachvollziehbare Bewertungsform, um erfolgskritische Anforderungen möglichst früh zu erkennen und in den Prozess der Modulbildung einzubinden. Dabei wird ebenfalls der Einfluss unvorhergesehener und dynamischer Änderungen durch den höheren Erfüllungsgrad der erfolgskritischen Anforderungen reduziert. Damit verringert sich auch das Risiko zeitkritischer Anpassungen oder fehlender Anforderungen in der frühen Phase. Die vermiedenen Änderungskosten (z. B. Investitionskosten für angepasste Produktionsanlagen) und reduzierten Entwicklungszeiten (durch weniger zeitintensive Änderungszyklen) können so zu einer positiven produktionswirtschaftlichen Wirkung auf das Unternehmen führen. Innerhalb des multimethodischen Verfahrens finden folglich eine Klassifikation und Bewertung der erfassten technischen, organisatorischen wie auch wirtschaftlichen Anforderungen hinsichtlich des Einflusses auf die Komplexität statt. Die daraus abgeleiteten erfolgsrelevanten Anforderungen können demnach genutzt werden, um in den nächsten Schritten eine reduzierte und zielgrößenfokussierte Modulzuordnung zu entwickeln.

4.1.4 Auswahl erfolgskritischer Anforderungen an die Karosseriestruktur

Im letzten Prozessschritt des Methodenbausteins erfolgt die Priorisierung der klassifizierten Teilaspekte der Komplexität (vgl. Abbildung 4-3), um gezielt erfolgskritische Anforderungen zu bestimmen. Je mehr Teilaspekte der Komplexität erfüllt werden, desto stärker ist folglich der kritische Einfluss auf die spätere anforderungsabhängige Modulbildung und damit auf den Erfolg des Verfahrens. Die Auswahl strategisch bedeutsamer Besonderheiten innerhalb der Produkt- und Produktionsmodule bewirkt somit eine eindeutige Abgrenzung zu weniger problembezogenen Anforderungen. Die daraus resultierende strategische Orientierung an zukünftig relevanten technischen, organisatorischen wie auch wirtschaftlichen Anforderungen ermöglicht darüber hinaus eine langfristig ausgelegte Modulzuordnung. In Bezug auf das Problemumfeld der Karosseriestruktur sowie durch die Priorisierung nach der kritischen Einflusswirkung können so nach WAGNER ET AL. [119] und den identifizierten Grundanforderungen aus Tabelle 4-2, sieben erfolgskritische Anforderungen definiert werden:

1) Konzeptübernahme ähnlicher Modulgruppen (A00):

Beibehaltung grundsätzlicher Prämissen der Fahrzeugklasse und Aufbauweisen der Karosseriestruktur und bestehenden Fabrikelementen.

2) Vereinbarkeit der Designprämissen (A04):

Beibehaltung der designrelevanten Referenz-, Maß- und Anbindungspunkte.

3) Einheitlicher Einsatz der Verbindungstechnik (A06):

Festlegung der produktionsseitigen Anlagenvarianz über benötigte Fügetechnik, Produkt- und Prozesseigenschaften.

4) Integration fahrzeugflexibler Spann- und Fixierelemente (A09):

Variantenabhängige Festlegung der produktionsseitigen Fixieranlagen sowie benötigten Spannstellen am Produkt.

5) Anordnung nach der werks- oder baureihenspezifischen Fügefolge (A12):

Auslegung der Produktionsanlagen an der Aufbaureihenfolge der Produkte.

6) Einbindung der Logistik- und Zulieferumfänge (A16):

Organisatorische Festlegung und Integration der Logistik-, Wertschöpfungs- und Produktumfänge im Produktionsprozess.

7) Absicherung der Projekt- und Prozesskenntnisse (A23):

Integration und Weiterentwicklung des internen Projekt- und Prozesswissens zum Aufbau langfristig nutzbarer Wissensdatenbanken.

Der methodengeführte Prozess lässt ausreichend Freiheitsgrade zu, um die Methode weiter an das Umfeld und den spezifischen Anwendungsfokus anzupassen und durch neue problembezogene Anforderungen beliebig zu erweitern oder zu reduzieren. Für die erste Forschungsfrage wird daher ein geführter Prozess entwickelt, um Einflussgrößen zu erfassen, zu selektieren und ggf. als erfolgskritisch zu kennzeichnen. Somit erfolgen bereits in der frühen Phase die Erfassung, Bewertung, Klassifikation und Priorisierung der erfolgskritischen Anforderungen. Konkurrierende und zunächst gegensätzliche Zielgrößen (z. B. Gewichtsziele und Kostenziele) können damit auf die strategische Einflusswirkung und Relevanz für den weiteren Verlauf des Verfahrens analysiert und geprüft werden. Das methodische Verfahren zu Anforderungserfassung und -analyse wird damit in Abbildung 4-4 als Ablaufmodell zur Auswahl strategischer Anforderungen zusammengefasst.

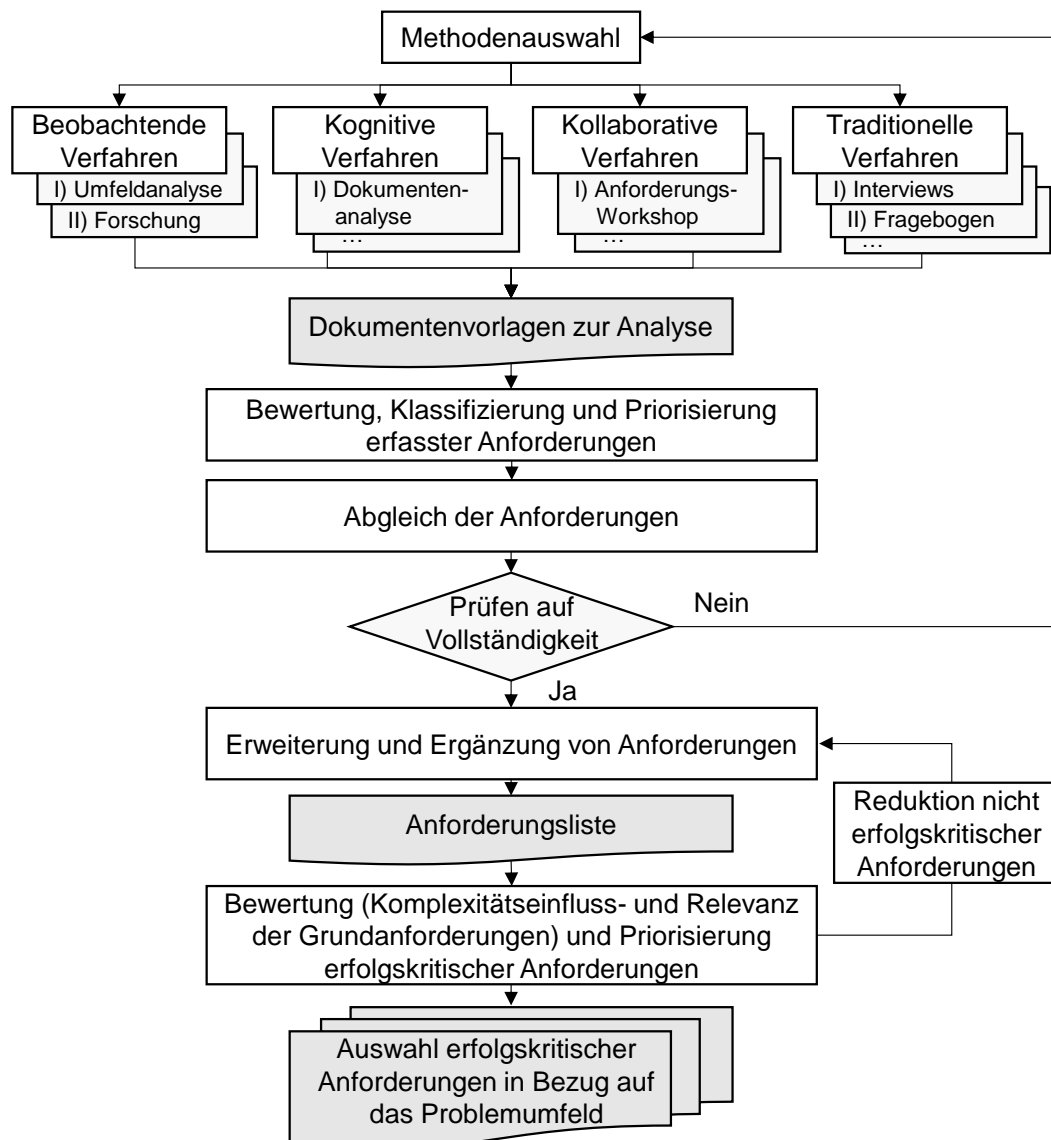


Abbildung 4-4: Methodisches Vorgehen zur Auswahl strategischer Anforderungen

4.2 Einheitliche Modellierung von Wirkungszusammenhängen

Um aus den ausgewählten erfolgskritischen Anforderungen nachvollziehbare Wirkungszusammenhänge abzuleiten, besteht die Notwendigkeit, eine geeignete Darstellungsweise zu wählen und diese mit Bezug auf die Karosseriestruktur anzupassen. Dabei liegen beispielsweise Informationen über technische Anforderungen meist in Form von geometrischen Modellen vor, während wirtschaftliche Anforderungen durch Textbausteine unstrukturierter Dokumente dargestellt werden. Um gleichermaßen die unterschiedlichen Anforderungen ohne Informationsverlust in eine nachvollziehbare Grundstruktur zu übertragen, wird eine Methode zur einheitlichen Modellierung benötigt. Auch die resultierenden Wirkungszusammenhänge und unterschiedlich starken Verbindungen zwischen den (Teil-) Systemen sind vollständig und bewertbar darzustellen. Insbesondere Abhängigkeiten der ausgewählten erfolgskritischen Anforderungen sind in einer durchgängigen und übersichtlichen Darstellungsart für denselben Betrachtungsumfang (Module bzw. Modulgruppen) zu konsolidieren [102].

4.2.1 Methodenauswahl und Darstellungsweise

Bei den bekannten Ansätzen zur Modularisierung variantenreicher Systeme eignen sich für die Darstellung und Modellierung von Wirkungsabhängigkeiten vorrangig drei etablierte Methoden:

- Heuristische Methoden (Funktionsstruktur)
- Modular Function Deployment (MFD)
- Design Structure Matrix (DSM) [89].

Dabei unterscheiden sich die Ansätze in Bezug auf die Aufbaustruktur (Produkt- oder Funktionsfokus, Materialfluss etc.) sowie die generelle Darstellungsweise durch Verzweigungen, Kennzahlensysteme oder Matrizen. Im Vergleich und der Gegenüberstellung der drei Verfahren (vgl. Tabelle 4-3) zeigt sich, dass die Transformation und Modellierung der Wirkungszusammenhänge und Abhängigkeiten durch die Design Structure Matrix sämtliche Kriterien (abgeleitet aus den methodischen Anforderungen) an das Verfahren selbst erfüllt. Die matrix-basierte Darstellungsweise der DSM bietet zudem die Vorteile einer nachvollziehbaren, intuitiven, skalierbaren und kompakten Visualisierung zur Analyse mehrerer Matrizen über rechnergestützte Auswertungsmethoden [133]. Auch die gleichermaßen anwendbaren Alternativen zur Darstellung als

kantengewichteter Graph oder in tabellarischer Form führen zu einer einfachen Kommunikation und einem ersten Überblick über die identifizierten Abhängigkeiten. Folglich wird für den weiteren Verlauf des multimethodischen Verfahrens die Darstellungsform in Matrizen über die Methode der Design Structure Matrix verwendet.

Tabelle 4-3: Vergleich bestehender Verfahren anhand festgelegter Kriterien zur einheitlichen Darstellung und Transformation der Anforderungen

		Kriterien							
		Anpassbarkeit	Wechselwirkungen	Logische Folgen	Wiederholbarkeit	Funktionale Struktur	Gewichtung	Komplexe Strukturen	Darstellungsweise
Verfahren	Funktionsstruktur (Heuristisch)	(✓)	✓	✓	(✓)	✓	×	(✓)	Komplex
	Modular function deployment (MFD)	×	(✓)	×	×	✓	✓	✓	Komplex
	Design Structure Matrix (DSM)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Einfach

Die erweiterten Grundlagen zur Methode, die Anwendung sowie Überführung in die Matrizenform wird in den nachfolgenden Kapiteln näher betrachtet, weiterentwickelt und an die vorliegende Problemstellung angepasst.

4.2.2 Modellierung der Karosseriestrukturen in DSM

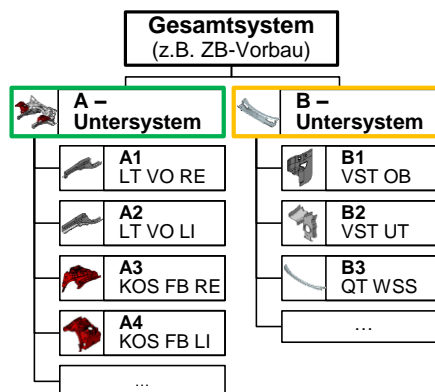
Die Methode der Design Structure Matrix wird in der Produkt- und Prozessentwicklung genutzt, um in der frühen Konzeptionsphase etablierte Strukturen der Produktarchitektur in funktionale oder physische Bestandteile aufzuteilen und auf gegenseitige Abhängigkeiten zu untersuchen [60]. Dabei werden Einzelelemente und Komponenten auf bestehende Interdependenzen, neue Wirkungszusammenhänge und wechselseitige Einflussnahmen analysiert und in Matrizen dokumentiert. Eine nachvollziehbare Darstellungs- und Analyseverfahren unterstützt damit die Komponentenentwicklung, die Verknüpfung der Produktionsprozesse sowie die Ableitung der zugehörigen Organisationsstruktur [134]. Anstelle einer komplexen Modellierung des gesamten Systems konzentriert sich die Darstellungsweise der DSM auf relevante Untersysteme, einzelne Bestandteile und Abhängigkeiten [135].

Durch die tabellarische Form der DSM in quadratischen $n \times n$ -Matrizen werden unterschiedliche Systeme und Beziehungsarten über angepasste Darstellungsarten abgebildet. Die DSM kann den jeweiligen Systemumfang (Groß- bis zur Unter-ZB-Ebene) vollständig darstellen und auf die Problem- und Aufgabenstellung sowie neue Eingangsgrößen angepasst werden, ohne von der grundsätzlichen Matrizenform abzuweichen. Über horizontal sowie vertikal identische Kennzeichnungen der Komponenten erfolgt der Aufbau der Zeilen und Spalten für jedes System (hier: technische und wirtschaftliche Anforderungen) [113]. In vertikaler Leserichtung (Spalten) der Matrize wird die Abhängigkeit zu weiteren Elementen dargestellt, während die horizontale Ebene (Zeilen) die Einflussnahme auf andere Elemente abbildet [134].

a) Anforderungs- und Funktionsableitung

		Geo-Funktion		
ID	Name	X	Y	Z
A1	LT VO RE	37,1	-46,4	-53,5
A2	LT VO LI	37,1	-60,7	-53,5
A3	KOS FB RE	37,1	-56,8	-53,5
A..	...			
B1	VST OB	58,2	-48,9	-12,3
B2	VST UT	58,2	-45,3	-12,3
B3	QT WSS	87,7	-45,3	-12,3
B..	...			

b) Produktstruktur



c) Design Structure Matrix

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3
A1		X	X				
A2	X		X	X	X		
A3		X		X			
A4			X				
B1				X		X	
B2					X		X
B3				X		X	

Abbildung 4-5: Übertrag der a) Anforderungs- und Funktionsableitungen und b) Produktstrukturen in die Matrizenform der c) binären DSM in Anlehnung an [133]

Wie in Abbildung 4-5 dargestellt, wird jedes Element gleichermaßen auf Abhängigkeiten zu anderen Elementen sowie auf die eigene Einflussnahme untersucht. Für die Beschreibung vorbenannter Betrachtungen können beispielsweise Funktionsableitungen aus dem Lastenheft in der frühen Konzeptionsphase oder der hierarchischen Produktstruktur genutzt werden. Die Übertragung der bereits definierten Funktionen und Komponenten geschieht damit unverändert über die Matrix-Struktur. Dabei erfolgt keine Modellierung der reflexiven und damit auf sich selbst bezogenen Beziehungen [136]. Daher entsteht innerhalb der Matrize eine Diagonale ohne Werte, die im Falle von wechselseitigen Interdependenzen als Spiegelachse dient. Mithilfe der Anordnung der Wirkungszusammenhänge in Zeilen und Spalten werden Elemente durch bestehende Abhängigkeiten vollständig beschrieben und einheitlich modelliert. Damit können gleichermaßen einfache wie auch iterative Abhängigkeiten auf den unterschiedlichen Ebenen (Einzelteil- oder Baugruppen-Ebene) in einer durchgängigen Übersicht

dargestellt und bewertet werden (vgl. Abbildung 4-5). Neben technisch-funktionalen Abhängigkeiten ermöglicht die Darstellung ebenfalls die Abbildung und Analyse geometrischer und mechanischer Beziehungen [51]. Darüber hinaus besteht der Bedarf, zusätzlich die erfassten Iterationen, logische Folgen, Gewichtungen sowie Priorisierungen abzubilden. Diese können ebenfalls vollständig durch die Methode der DSM dargestellt und in die einheitliche Matrizenform übertragen werden (vgl. Abbildung 4-6). Sie werden im nachfolgenden Kapitel 4.2.3 in Abbildung 4-7 auf die dargestellte Produkt- bzw. Karosseriestruktur sowie Prozessfolge im Karosseriebau angewendet.

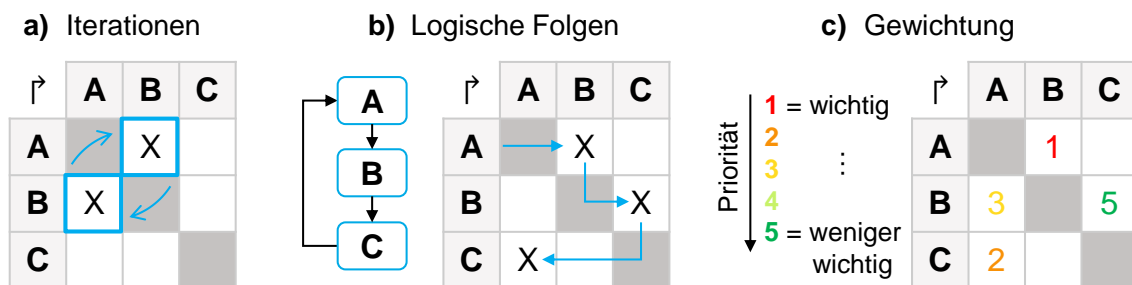


Abbildung 4-6: Übertragbarkeit von Iterationen, logischen Folgen und Gewichtungen in die Matrizenform der DSM.

Zu der Information über generelle Wechselwirkungen sowie über die Anzahl an Abhängigkeiten ist es weiterhin möglich, richtungsbezogene Werte und Stärken darzustellen. Für die Modellierung unterschiedlich starker Interdependenzen werden statische Matrizen mit festen Eigenschaften eingesetzt:

- **Binäre DSM:** Feststellung sowie Kennzeichnung bestehender Abhängigkeiten ohne Wertungsmöglichkeit über ein "X" oder eine "1" innerhalb der Matrize.
- **Numerische DSM:** Erweiterung der Abhängigkeiten zwischen Elementen durch Gewichtungen (1, 2, ...) oder zusätzliche Merkmale (0-100 %).
- **Aufgabenbasierte DSM:** Darstellung technisch-organisatorischer Abläufe oder Prozesse durch eine sequenzielle, parallele oder iterative Anordnung.

Diese Methode erlaubt es somit, komplexe Produkt- oder Prozessstrukturen in übersichtliche Abhängigkeitsmatrizen zu überführen und diese im weiteren Verlauf auf überschneidende Module und damit bestehende Wechselwirkungen zu prüfen. Dabei werden über eine einfache und nachvollziehbare Darstellungsweise unterschiedliche technologische Funktionen, Komponenten oder auch bereits gebildete Module der Fahrzeugarchitektur analysiert. Die Darstellung in quadratischen Matrizen ermöglicht zudem im weiteren Verlauf eine mathematische und rechnergestützte Auswertung über algorithmische Verfahren [134].

4.2.3 Überführung von Anforderungen in Matrizen

Um die ausgewählten Anforderungen in jeweils eigenständige Matrizen zu überführen und Abhängigkeiten zu modellieren, wird zunächst das zu untersuchende Gesamtsystem in Einzelelemente gegliedert. Für die Karosseriestruktur werden somit, entsprechend der Aufteilung in ZB-Ebenen (vgl. Abbildung 2-3), eindeutige Untersysteme und Produktebenen definiert. Hieraus lassen sich neben der Produktstruktur auch zusammenhängende Ebenen und Elemente darstellen. Dadurch werden nicht nur direkte Schnittstellen sichtbar, sondern auch fachbereichsübergreifende Verknüpfungen erkannt und zusätzliche Elemente in die Betrachtung miteinbezogen [133]. Um dennoch Komplexitätssteigerungen infolge zusätzlicher Produktumfänge zu vermeiden, sind bestehende Systemgrenzen der Produktstruktur einzuhalten und Erweiterungen des Komponentenumfangs kritisch zu prüfen.

Nach der Generierung einer einheitlichen Matrix sowie der Einordnung aller relevanten Komponenten werden Abhängigkeiten und ergänzende Angaben über Zusammenhänge für jede Anforderung erfasst und dokumentiert. Dabei können Informationen über verbundene und abhängige Elemente in unterschiedlichen Ausprägungen vorliegen. Bereits **bekannt**e **Wirkungszusammenhänge** sind daher meist ohne Anpassung und nahezu vollständig durch die Methode der DSM darstellbar. Modulgruppenumfänge sowie Abhängigkeiten im Rahmen der Modularisierung, z. B. durch eine vorgängerbasierte Konzeptübernahme, liegen als übertragbare Matrix oder ableitbare Modulzuordnung vor.

Eine weitere Ausprägung der Informationsübertragung in Matrizen stellt die **Transformation bestehender Ergebnisse und Analysen** dar. Bereits vorhandene Datensätze und Auswertungen innerhalb der Prozessabschnitte im FEP werden in eine symmetrische Matrix transformiert und ausgewertet (vgl. Abbildung 4-5). Funktions- und Komponentenanalysen erfolgen deshalb unter Anpassung auf das Ausgabe- und Ergebnisformat, um neue und bislang unbekannte Wirkungszusammenhänge festzustellen. Die Transformation geschieht dabei häufig ohne zusätzliche Analyseschritte und nur durch die Adaption der Zielausgabe. Ein Beispiel der Karosseriestruktur stellt hierzu die Transformation der Fügereihenfolge im Karosseriebau dar. Aus einer netzplanähnlichen und gerichteten Darstellung lässt sich durch definierte Gestaltungsregeln eine Matrix zur Feststellung von Abhängigkeiten in der Anordnung der Fügeelemente und -technik ableiten.

Existieren in Bezug auf die Anforderungen keine übertragbaren Zusammenhänge, wie etwa im Falle von Neuentwicklungen oder fehlenden Transformationsmöglichkeiten bestehender Daten, werden **Domänenexperten** zur erfahrungsbasierten Analyse eingesetzt. Hierzu werden sowohl das zu betrachtende System als auch die jeweilige Matrix hinsichtlich der fokussierten Anforderungen untersucht. Die Aufnahme von Wirkungsabhängigkeiten erfolgt beispielsweise durch Workshops interdisziplinärer Teams [137]. So können gewonnene Erkenntnisse und Erfahrungen aus vergangenen Projekten genutzt werden, um Wiederholungsfehler zu vermeiden oder planungsgerechte Modulgruppen für zukünftige Baureihen zu bilden.

Für die Auswahl der sieben ermittelten strategischen Anforderungen (vgl. Kapitel 4.1.4) wird folglich für jede Anforderung eine individuelle und spezifisch angepasste Abhängigkeitsanalyse innerhalb der Karosseriestruktur und der ersten Aufbaustufe durchgeführt. Exemplarisch werden für die Modellierung der Anforderungen des ZB Längsträgers 19 Einzelelemente genutzt (vgl. Abbildung 4-7) und anhand von vier bauteilspezifischen Anforderungen in das Format der DSM übertragen:

- **Anforderung A00 – Konzeptübernahme ähnlicher Modulgruppen:** Hierzu wird die Anordnung der Elemente in Module aus der Vorgängerbaureihe übernommen und in die binäre DSM des ZB Längsträgers übertragen. So werden beispielsweise die Elemente 1-4 im Modul 1 zusammengefasst.
- **Anforderung A06 – Einheitlicher Einsatz der Verbindungstechnik:** Aus den paarweisen Zuordnungen der gefügten Elemente (z. B. "LT VO RE" und "KOS FB VO RE") können somit wechselseitige Abhängigkeiten über die Fügepunkte und -längen erfasst werden.
- **Anforderung A23 – Absicherung der Projekt- und Prozesskenntnisse:** Aus den dokumentierten Geometriedaten zwischen den Quality Gates QG 1 und QG 5 lassen sich die Änderungszyklen der Spann- und Fixierpunkte (in x-, y- und z-Richtung) für alle Einzelelemente darstellen. Dadurch ist es über eine numerische DSM möglich, einzelne Bauteile nach ihrer Änderungshäufigkeit zu priorisieren (z. B. "LT VO RE" mit einer 62%igen Änderungsquote) und zu gewichten.
- **Anforderung A12 – Anordnung nach der werkspezifischen Fügefolge:** Durch den richtungsgeführten Vorranggraph zur Gliederung der Ablaufschritte der korrekten Aufbaureihenfolge können durch die aufgabenbasierte DSM logische Folgen und Abläufe der Fügestufen dargestellt werden.

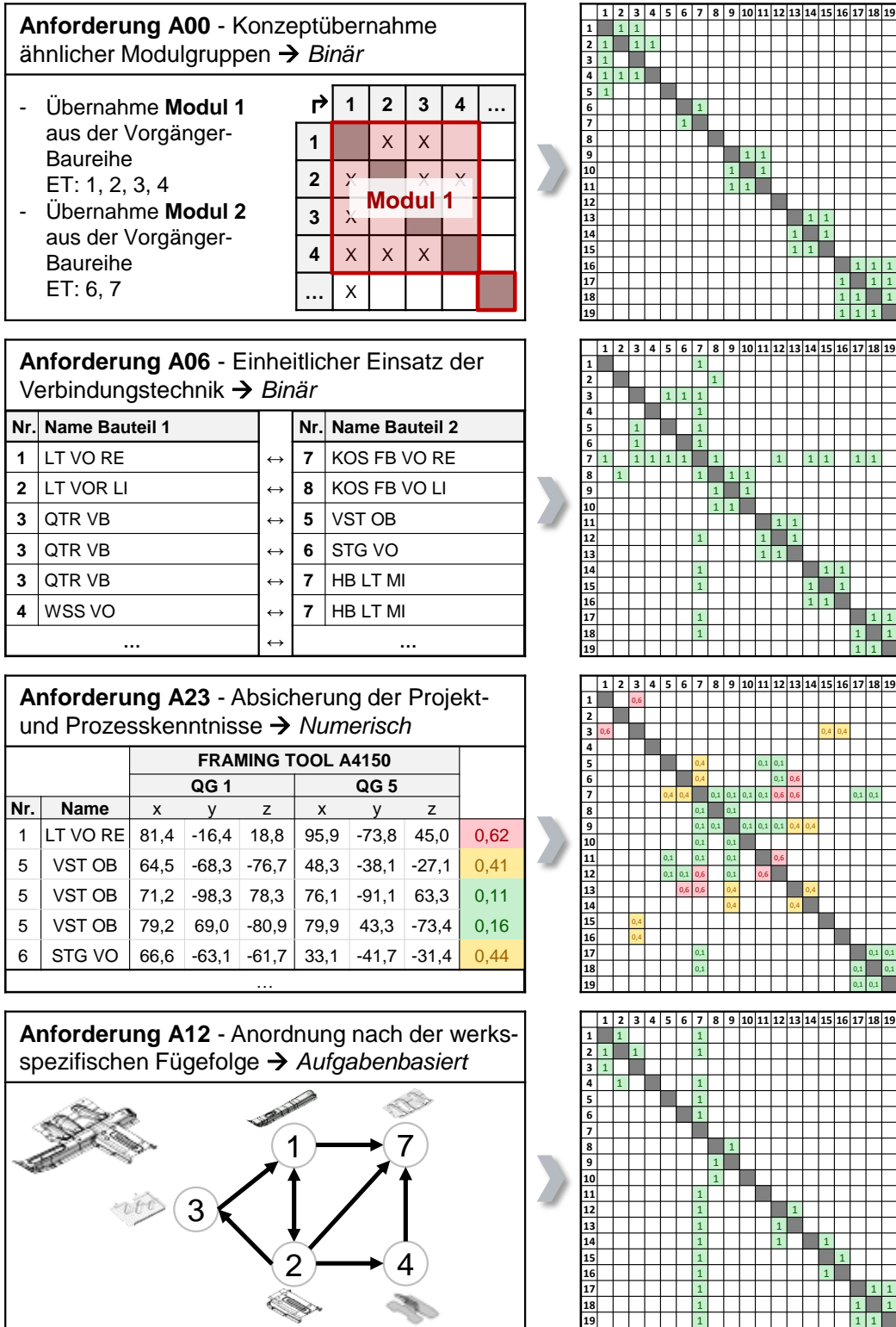


Abbildung 4-7: Auszug der Überführung von Anforderungen für den "ZB LT LI" in Matrizen
 Der dargestellte Auszug zur Umsetzung zeigt sowohl die Ableitung von unstrukturierteren Dokumenten in Matrizen als auch die hohe Anpassungsfähigkeit der Methode an die unterschiedlichen technologisch-organisatorischen oder wirtschaftlichen Anforderungen. So ist es beispielsweise möglich, gleichermaßen feste und bereits vorgegebene Module aus konzeptähnlichen Baureihen darzustellen und Abhängigkeiten als

binäre DSM zu modellieren (siehe Anforderung A00 und A06 in Abbildung 4-7). Auch Wechselwirkungen der Verbindungstechnik, bestehende Interdependenzen volatiler Änderungsraten sowie gerichtete Prozessabläufe können vollständig durch die einheitliche Grundstruktur der DSM modelliert werden (siehe Anforderung A12 und A23 in Abbildung 4-7).

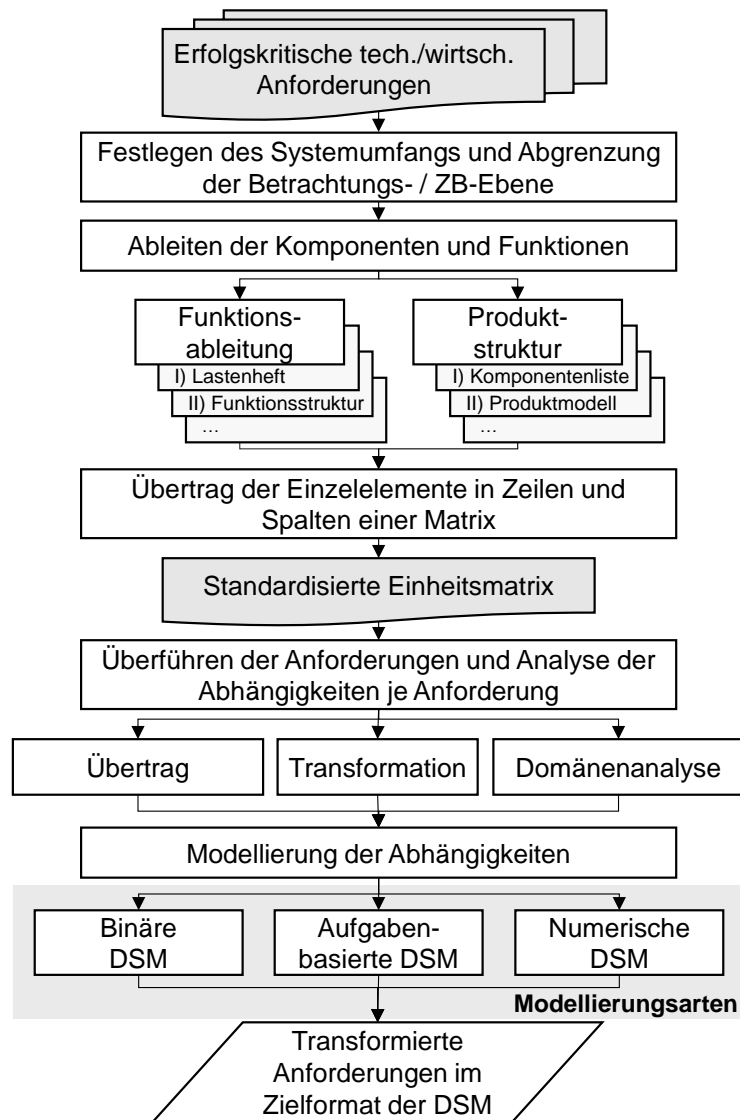


Abbildung 4-8: Vorgehen zur Anforderungsmodellierung in Abhängigkeitsmatrizen (DSM)

Es bestätigt sich, dass unterschiedliche Anforderungen und Quellen auf Basis einer einheitlichen Struktur (DSM) sowie festgelegten Systemgrenzen vollständig, bewertbar und nachvollziehbar dargestellt werden können. Die visuelle Gestaltung der Anforderungen über binäre, numerische oder auch aufgabenbasierte Merkmale (vgl. Abbildung 4-7) ergänzt zudem die Beschreibung bestehender Interdependenzen. Damit wird für den Methodenbaustein 1 (vgl. Abbildung 4-27) ein strukturierter Prozess und ein nachvollziehbares Vorgehen beschrieben (vgl. Abbildung 4-8).

4.3 Wissensgenerierung durch deskriptive Analysemethoden

Insbesondere in den frühen Phasen der Produktdefinition, Produktentwicklung und Überführung in die Produktionsplanung liegt eine Vielzahl an ungenutzten Daten und bislang unbekanntes sowie ungenutztes Wissen über Anpassungen, funktionale Bedingungen und Wirkungszusammenhänge vor. Um dieses explizite Wissen strukturiert erfassen und vorhandene Daten des Unternehmens einsetzen zu können, werden Vorgehensweisen aus dem "Industrial Analytics" genutzt. Der Begriff und der gewählte Teilbereich des "Industrial Analytics" beziehen sich dabei auf den Einsatz etablierter Verfahren zur systematischen Datenanalyse, um generierte Daten aus dem industriellen Umfeld innerhalb der wertschöpfenden Prozesse anzuwenden [138]. Deskriptive Datenanalysen zur Wissensgenerierung werden unter Einbezug empirischer Daten der Karosseriestruktur eingesetzt. Über die Verknüpfung mehrerer Methoden entsteht folglich ein domänenspezifischer Ansatz für die Lösung der vorliegenden Problemstellung der Karosseriestruktur und des Karosseriebaus.

4.3.1 Problembeschreibung und Grundlagen der Datenanalyse

In den frühen Phasen der Konzeptentwicklung zur Karosseriestruktur und damit dem Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit kommt es durch extern induzierte Anforderungen zu kurzfristigen Änderungen im Planungs- und Entwicklungsprozess. Hieraus sind nicht nur Korrekturen am Produkt, sondern auch an den nachgelagerten und verketteten Bereichen der Produktionsplanung möglich [4]. So können beispielsweise Änderungen an der Fügepunktanzahl, der konstruktiven Ausführung von Komponentenvarianten oder der Auslegung an Referenzpunkten zu Änderungskosten oder zu einer verringerten Effizienz in der Produktionsanlage führen. Trotz des etablierten Einsatzes computergestützter Anwendungen wird die Planungs- und Entwicklungsleistung sowie Koordination kritischer Einflüsse durch Erfahrung, dokumentenbasiert und meist unstrukturiert erbracht [115]. Potenziell änderungsintensive Fügestellen und Komponenten werden deshalb bislang qualitativ durch erfahrene Domänenexperten auf Basis unbestätigter Grobdaten bewertet [118]. Mit steigender Freigabestufe (QG) und entsprechendem Entwicklungsfortschritt erhöht sich zwar neben der Planungsgenauigkeit auch die Anzahl an bestätigten Daten, gleichzeitig sinkt aber im Gegenzug die Möglichkeit der Einflussnahme auf die Kostenstruktur (Materialkosten, Anlageninvestitionen etc.) sowie auf konstruktive Änderungen. Daher sind kritische Einflüsse mithilfe

geeigneter Methoden möglichst früh zu erfassen. Ebenso gilt es, Erfahrung aus vergangenen und konzeptähnlichen Projekten als implizites Wissen einzubinden, um Wiederholungsfehler zu vermeiden und bereits umgesetzte Potenziale zu übernehmen.

Um explizites wie auch implizites Wissen über kritische Wirkungszusammenhänge und Erfahrungswissen als vordefinierte Anforderung in das multimethodische Verfahren zu integrieren, wird der entwickelte domänenspezifische Ansatz nach WAGNER ET AL. angewendet [139]. In Anlehnung an den Knowledge-Discovery-in-Databases (KDD)-Prozess umfasst dieser Lösungsansatz vier Hauptprozessschritte: **Datenabruf und -transformation**, **Datenvorverarbeitung**, **Data-Mining** und **Datenrepräsentation** [117]. Oftmals wird der Begriff des Data-Minings fälschlicherweise für den gesamten Prozess des KDD als Synonym verwendet. Dabei beinhaltet der KDD sowohl ergänzende Schritte der Vorverarbeitung als auch Auswertung und ist dem Data-Mining übergeordnet. Unter Data-Mining wird der analytische Prozess zur Untersuchung von Datensätzen verstanden, um potenziell nützliche und neue Informationen zu erhalten [117].

Ziel ist es dabei, unbekannte Zusammenhänge und Änderungsverläufe festzustellen und dadurch kritische Teile, Baugruppen und Fügetechniken zu klassifizieren. Es findet damit eine interdisziplinäre Verknüpfung konventioneller Planungsmethoden des FEP mit den Methoden der Datenanalyse statt. Die Qualität der Data-Mining-Ergebnisse hängt stark von den zuvor aufbereiteten Daten ab [140]. Folglich ist die Datenvorverarbeitung der aufwendigste Schritt und die Ergebnisqualität dieser Phase entscheidet somit über Erfolg oder Misserfolg der Analyse. Um in der Karosseriestruktur und der eingesetzten Fügetechnik mögliche Änderungsmuster innerhalb bestehender Daten zu erkennen, eignen sich die Analysemethoden der deskriptiven Verfahren [141]. Zudem ist es möglich, kritische ET, ZB und Fügetechnik mit den Domänenexperten auf mögliche Ursachen der Brisanz zu prüfen und Handlungsempfehlungen zu entwickeln. Abschließend werden die generierten Ergebnisse zur intuitiven Kommunikation in eine übersichtliche Darstellung überführt und in die DSM übertragen.

4.3.2 Datenabruf und -transformation

Um den abzurufenden Datenbestand auszuwählen, legen die Domänenexperten zunächst mögliche Kennzahlen der Datenanalyse fest [117]. Dabei werden insbesondere wirtschaftliche Ziele (z. B. messbare Kennzahl: Reduktion der Nacharbeitskosten) und

ein besseres Prozessverständnis angestrebt [118]. In Abstimmung mit den Fach- und Schnittstellenbereichen werden die angestrebten Kennzahlen, die notwendigen Modifikationen und abhängige Variablen mit Bezug zur Datenquelle festgelegt. Tabelle 4-4 zeigt einen Auszug der ermittelten Kennzahlen, um beispielsweise innerhalb des FEP auftretende Änderungen am Produkt (Form- und Gestaltänderung) und der Produktion (Anlagenkapazität) durch neue Erkenntnisse zu reduzieren.

Tabelle 4-4: Auszug der ermittelten Ziele der Datenanalyse zur Reduktion der produkt- und produktionsseitigen Änderungen

Zuordnung	Ziel / Kennzahlenbildung	Einflusswirkung	Datenquelle
Produktion	Reduktion der Änderungen in: Fügeinhalte und Fügelänge.	<ul style="list-style-type: none"> – Festlegung Anlagenkapazität, -größe und Anzahl. – Einfluss Zykluszeit und Gesamtdurchlaufzeit. – Einfluss Fahrzeuggewicht und CO₂-Ziele. 	Hallenlayout, Kapazitäts-/ Betriebszeitdiagramme, Wertstrom.
Produktion	Reduktion der Änderungen in: Lage der Fügeinhalte (x-, y-, z-Richtung).	<ul style="list-style-type: none"> – Zugänglichkeit der Füge- und Greiftechnik. – Änderung der Werkzeuggeometrie (C- / X-Form). – Einfluss Zykluszeit und Gesamtdurchlaufzeit. 	Fügetechnik-Report, Werkzeugentwicklung und -planung.
Produktion	Reduktion der Änderungen in: Geometriepunkte.	<ul style="list-style-type: none"> – Kosteneinfluss bei Veränderung ($\pm 0,5$ mm). – Einfluss stat. / dyn. Steifigkeit. – Abgleich mit Maßkonzept und Package. 	Fügetechnik-Report, Packageplan.
Produkt	Reduktion der Änderungen in: Anzahl an ET innerhalb der ZB.	<ul style="list-style-type: none"> – Erhöhung Varianz und Gesamtanzahl. – Einfluss Gesamtkapazität und Teilehandling. – Abgleich mit Anlagenkapazität, -größe und Anzahl. 	Stücklisten, Fügefolgen, CAD-Daten, SCM-Daten.
Produkt	Reduktion der Änderungen in: Form und Gestalt der ET und ZB.	<ul style="list-style-type: none"> – Abgleich über form- und gestaltabhängige Verbindungen. – Einfluss Ladungsträger und (Intra-) Logistik. – Einfluss Spann-/Fixiertechnik und Referenzpunkte. 	Visualisierungsdaten der Prototypen (Q-Freigaben).
...			

Um den direkten Bezug zwischen den Zielgrößen und Datenquellen herzustellen, wird eine Verknüpfung der Datenabfragefunktion mit einem Datenbankmanagementsystem (DBMS) gebildet. Hierfür werden Datensätze der Produkt- und Produktionsumfänge durch das Produktdatenmanagementsystem (als DBMS) erfasst. Über bestehende multidimensionale Methoden und Systeme (wie z. B. Online Analytical Processing) ist es möglich, automatisierte Abfragen aus mehreren Datenquellen abzuleiten und zentral zu speichern. Die Verwaltung und Zusammenführung aller Dokumente und Datensätze aus den unterschiedlichen Quellen finden in einer zentralisierten Datenbank statt,

dem sogenannten Data Warehouse [118]. Durch die Festlegung der Betrachtungsebene (ZB- und ET-Ebene) kann somit eine nachvollziehbare Funktion zur Abfrage der Datenquellen (siehe auch Abbildung 4-9) mit direktem Bezug der Zielgrößen entwickelt werden [118]. Daraus lassen sich Rohdaten, Dokumente und tabellenbasierte relationale Datenbanken je Freigabestufe (QG) generieren.

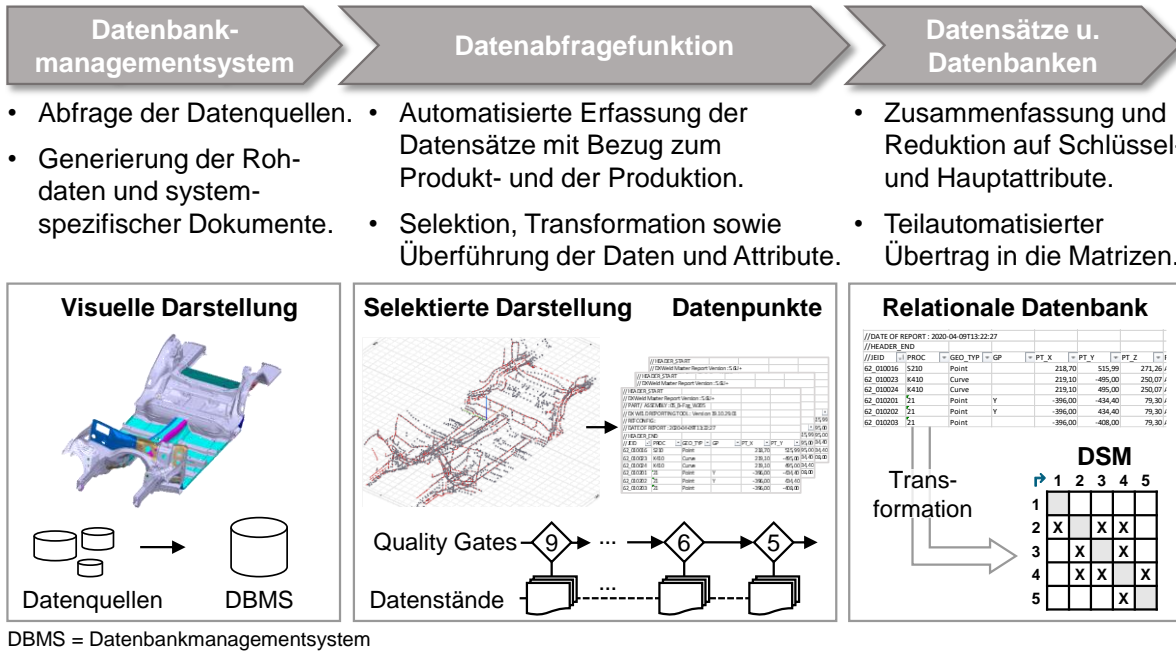


Abbildung 4-9: Verarbeitung der Datenquellen über eine Abfragefunktion zu analysierbaren und transformierten Daten

Da die Daten in unterschiedlichen Formaten aus verschiedenen Quellen und Systemen vorliegen, sind diese in eine vergleichbare und analysierbare Darstellungsweise zu überführen. So werden beispielsweise CAD-Konstruktionsdaten als visuelle Repräsentation durch alle Freigabestufen in ein strukturiertes, quantifizier- und analysierbares Datenformat transformiert (vgl. Abbildung 4-9). Unter Berücksichtigung der vorliegenden Datenstruktur in der Phase des FEP eignet sich für die Abhängigkeitsanalyse die Integration und Überführung der Daten in Tabellenform [140]. Die Datensätze werden sukzessive durch die Domänenexperten, jeweils nach Relevanz zum Erreichen der gesetzten Ziele (vgl. Tabelle 4-4), selektiert. Es entsteht eine integrierte Merkmalsselektion auf notwendige Schlüsselattribute und Hauptattribute mit eindeutigem Bezug zur Zielgröße. Ein Attribut beschreibt dabei die Eigenschaften, die einem Element oder Objekt zugeordnet werden (z. B. die Länge, Bezeichnung oder Art des Objekts). Innerhalb der Verbindungstechnik und der abgeleiteten Datensätze reduziert sich hierzu beispielsweise durch das Entfernen nicht benötigter und irrelevanter Attribute (z. B. Speicherort, Herstellerdaten etc.) die Gesamtanzahl der Attribute um bis zu 96 % [139].

Damit reduziert sich nicht nur die Menge der zu bearbeitenden Daten deutlich, es folgt außerdem auch die Verringerung der benötigten Rechenleistung und -dauer bei den Datenanalysen.

Die Weiterverarbeitung der Datensätze im Teilprozess des Data-Minings erfolgt ausschließlich über anwendungsspezifische Daten. Für die Analyse kritischer Füge-technik und die Nachverfolgung der Änderungszyklen kann aus den vielfältigen visuellen Informationen der Fügestellen eine aggregierte tabellarische Darstellungsform der Haupt- und Schlüsselattribute abgeleitet werden. Somit können beispielsweise durch den Datenverantwortlichen grafische CAD-Modelle über die bestehende Datenplattform oder eine geeignete CAx-Schnittstelle in relationale Datenbanken transformiert werden. Die ausgewählten (Schlüssel-) Attribute dienen daher beispielsweise der Füge-technikanalyse mit eindeutigem Zielgrößenbezug. Das Zielformat der DSM vereint folglich die selektierten Abhängigkeiten je Attribut in einer vergleichbaren und nachvollziehbaren Struktur. Damit wird der Prozessschritt der Datenbeschaffung von der Ermittlung der Datenquellen, Attribute und Ziele bis hin zur automatisierten Vorselektion der Hauptattribute durch die Abruffunktion eindeutig beschrieben.

4.3.3 Datenvorverarbeitung

Die abgerufenen Datensätze, die vorselektierten Merkmale sowie die Produkt- und Prozessdaten selbst sind im nächsten Schritt der Datenvorverarbeitung für die anschließende Datenanalyse so aufzubereiten, dass fehlende und fehlerhafte Daten sowie Inkonsistenzen beseitigt werden [118]. Besonders produktionsrelevante Daten aus unterschiedlichen Quellen besitzen eine hohe Fehleranfälligkeit. Diese Daten sind beispielsweise auf falsches Labeling (falsche Bezeichnungen), temporäre Asynchronität (Ausreißer) sowie Null-Werte (fehlende Daten) zu prüfen und entsprechend anzupassen [117, 118, 142, 143]. Daher wird der Prozess der strukturierten Datenvorverarbeitung durch die Methoden der *Bereinigung*, *Normalisierung*, *Transformation*, *Ergänzung*, *Integration* sowie die *Ausreißer-Analyse* unterstützt [144].

Die Anpassung und Reduktion der Daten und Merkmale geschieht durch korrigierende Methoden der Datenmanipulation. Neben den physikalischen Größen und statistisch messbaren Fehlern (Ausreißer, fehlende Daten etc.) wird der Kontext der abgerufenen Daten (Richtigkeit, Vollständigkeit, Sinnhaftigkeit etc.) oft erst unter Einbeziehung der

Domänenexperten festgestellt. Die selektierten und transformierten Daten der Abruf-funktion werden somit auf Fehler, Rauschen, Redundanzen und Inkonsistenzen inner-halb der Datenmengen geprüft, bereinigt und korrigiert. So können mehrere zusam-mengefasste Tabellen oder Datenmatrizen auf mögliche Redundanzen, Null-Werte so-wie weitere Bereinigungsumfänge geprüft werden [145]. Das Endergebnis und die Aussagefähigkeit der Datenanalyse hängt somit maßgeblich von der Datenqualität ab [146]. Die Eigenschaften der Datenqualität entsprechen dabei den zweckabhängigen Metriken der Daten- und Informationsqualität (Vollständigkeit, Relevanz, Aktualität etc.) nach ROHWEDER ET AL. [147].

Schlüsselattribut: Bezeichnung Geo-Typ: Koordinaten in Teile- und Baum-
Fügestück-Nr. Fügetechnik Punkt / Linienförmig X-, Y-, Z-Richtung ZB-Bezeichnung struktur

//DATUM REPORT : 2022-07-08T12:19:08

FÜG_P_ID	FÜG_T	GEO_TYP	GP	X	Y	Z	TEIL_NR_ZB	NAME_ZB	STRUKT_ZB
62_001651	212	Punkt		348,4	-379,2	8,35	A177 6202500	ZB PEDALBODEN	C177 40804..
62_001104	212	Linie		-177,6	-479,7	341,4	A177 6201350	ZB LT LI	C177 40804..
62_003510	223	Linie		-74,2	-706,4	454,8	A177 6200230	ZB RAD-EB VO LI	C177 40804..
62_001001	212	Punkt	J	-27,0	-379,5	227,6	A177 6203100	ZB LT RE	C177 40804..
62_003509	212	Punkt	J	-62,9	-270,8	426,9	A177 6200900	ZB RAD-EB VO RE	C177 40804..
62_001105	K410	Punkt		-94,2	-419,7	241,4	A177 6207300	ZB LT VO	C177 40804..

Abfrage Referenz-/ Geo-Punkt (J= Ja) Teile- und ZB-Nummer

Abbildung 4-10: Beispiel reduzierter Produkt- und Prozessmerkmale auf acht Hauptattribute

Im Fall der selektierten und reduzierten Produkt- und Prozessmerkmale zur Fügetechnik werden beispielsweise innerhalb der Kontinuitätsprüfung über das eindeutige Schlüsselattribut der Fügestück-Nr. und über die Bezeichnung "NAME_ZB" (vgl. Abbildung 4-10) Änderungen in allen generierten Datenständen und Freigabestufen gesucht. Bei Anomalien oder abweichenden Merkmalen erfolgt die Aktualisierung der Bezeichnungen und der zugehörigen Fügestück-Nr. aus dem neusten Datenbestand durch eine Übersetzungsfunktion (vgl. Abbildung 4-11). Anomalien und falsches Labeling können beispielsweise die Schreibweise von Umlauten im deutschsprachigen Raum oder auch Abkürzungen und Änderungen der Bezeichnungen sein. Diese würden den Datensatz verfälschen. Auch das Erkennen von Ausreißern, Null-Werten, Redundanzen sowie weiteren Fehlern kann in den Datensätzen mit Prüffunktionen auf Basis statistischer Parameter und neu generierter Merkmale ermöglicht werden [148].

Für die Datenmanipulation werden bestehende Attribute durch neue Datenfelder und Merkmale ergänzt, um mithilfe zusätzlicher analytischer Variablen und Attribute weitere Fehler innerhalb der Datensätze zu erfassen [144]. Um Ausreißer zu prüfen und

Null-Werte durch den Entfall von ET und ganzen ZB zu prüfen und anzupassen, eignet sich die Prüffunktion und die Manipulation der erfassten Attribute über statistische Lage- und Streumaße. Hierzu werden die Wertebereiche der Komponenten mit Wirkung auf die Fügepunktanzahl untersucht und bestehende Datensätze durch neue Attribute verändert.

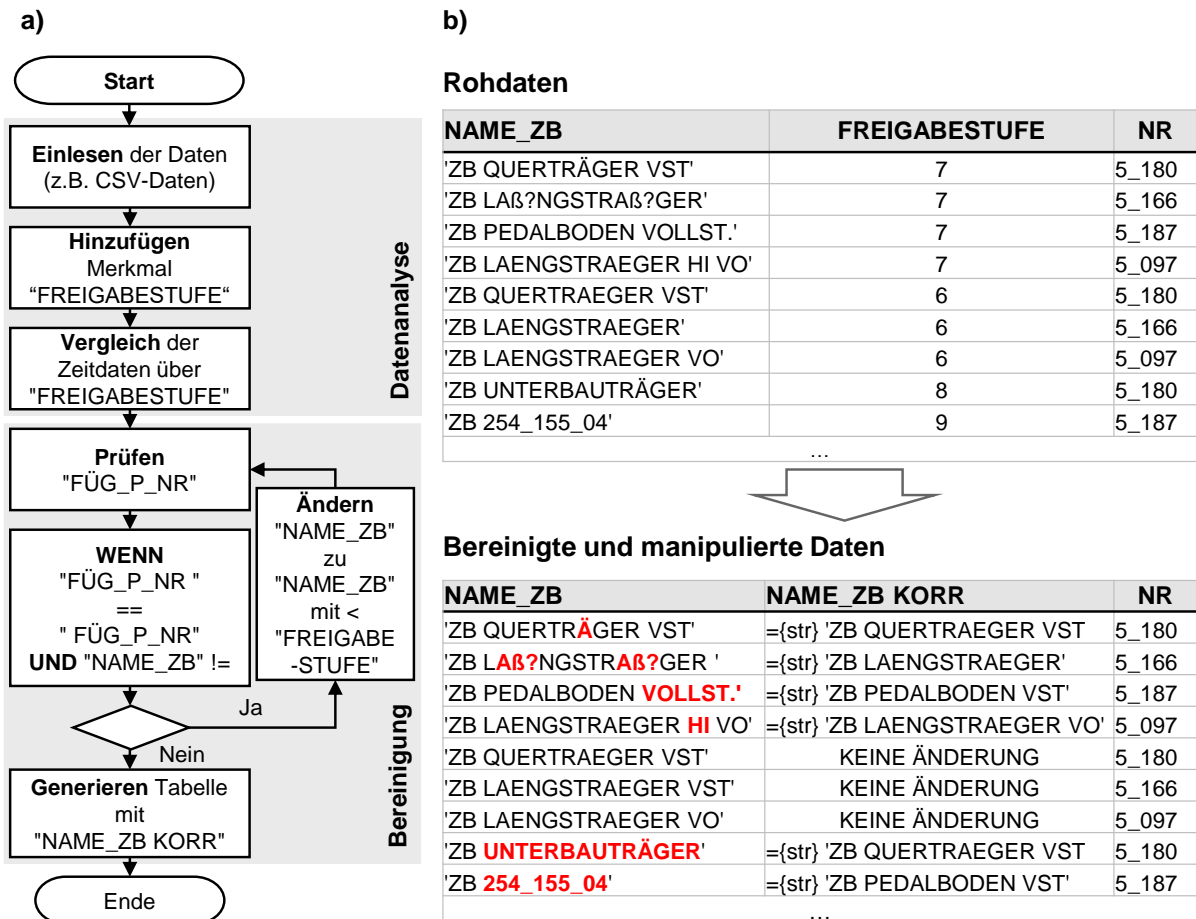


Abbildung 4-11: a) Programmablaufplan der Prüf- und Bereinigungsfunktion, b) Übersetzungsfunktion und Ergebnis

Die Prüffunktion zur Erkennung von Ausreißern sowie Null-Werten wird beispielsweise neben dem ersten und dritten Quartil (Q1 und Q3) des Wertebereichs ebenfalls um das Streuungsmaß des Interquartilsabstandes (IQA) als zusätzliches Prüfmerkmal ergänzt (vgl. Tabelle 4-5). Liegt der Wert der Datenpunkte unterhalb des 1,5-fachen IQA des ersten Quartils (W1) oder oberhalb des 1,5-fachen IQA des dritten Quartils (W3), erfolgt eine Kennzeichnung der Datenpunkte als Ausreißer oder Null-Wert. Trotz der automatisierten Prüffunktion und Regeln zur Manipulation der Daten sind diese Ergebnisse abschließend durch die Domänenexperten auf Richtigkeit zu prüfen. Je nach Beobachtung können Ausreißer als "Rauschen" klassifiziert und somit entfernt oder als definierte Merkmalsausprägung bestätigt werden [144].

Tabelle 4-5: Beispiel geprüfter und manipulierter Daten der Fügepunktbelegung je ZB zur Prüfung von Ausreißern und Null-Werten

Bestehender Datenbereich							Manipulierte Daten				
NAME_ZB	Anzahl Fügepunkte je QG						Statistische Lage- u. Streumaße				
	QG 9	QG 8	...	QG 3	QG 2	QG 1	Q1	Q3	IQA	W1	W3
ZB LT HI LI	34	34		75	42	43	35	43	8	23	55
ZB QTR VST	31	31		45	3	45	31	45	14	10	66
ZB LT OB LI	40	40		40	40	40	40	40	0	40	40
ZB KOS QTR	161	0		195	202	202	179	202	23	145	137
				

Weiterhin werden eine robuste Datenqualität sowie die Verlässlichkeit der genutzten Datenquellen durch die Kombination der Methoden zur Fehleranalyse abgesichert. Erst die bestätigte Durchgängigkeit und damit verbundene Qualität der Daten erlaubt die Umsetzung nachfolgender deskriptiver Analysen zur Wissensgenerierung [144]. Gleichzeitig erhöhen sich die Aussagekraft sowie die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Die notwendigen Datensätze zur Analyse liegen somit in einer einheitlichen und wiederholbaren Darstellungsweise vor, wodurch die Integration und Weiterverarbeitung über das Zielformat der Matrizendarstellung ermöglicht wird.

4.3.4 Methoden zur deskriptiven Datenanalyse durch Data-Mining innerhalb der Fahrzeugstruktur

Im nächsten Schritt werden die aus der Datenvorverarbeitung präparierten und transformierten Datensätze im Teilprozessschritt der Datenanalyse durch Methoden des Data-Minings weiterverarbeitet. Dabei gilt es hier zunächst bestehende Methoden zu erfassen und die Übertragbarkeit auf die zugrundeliegende Problemstellung zu prüfen.

Grundsätzlich stellen alle Methoden des Data-Minings eine Kombination aus einigen wenigen statistischen Basisfunktionen und Analysen (Polynome, Schwellenwertelemente etc.) dar [117]. Daher findet eine domänen- und modellspezifische Selektion und Adaption bestehender Methoden aus den Verfahrensklassen der Klassenbildung, Klassifizierung, Assoziation sowie Regression statt [149, 150]. Die Auswahl der eingesetzten Methode an die Problemstellung geschieht dabei über die stärksten Merkmalsausprägungen sowie die Präferenz der Domänenexperten [118, 151]. Dabei können Methoden des Data-Minings eingesetzt werden, um aufgestellte Hypothesen der Domänenexperten zu verifizieren oder unbekannte Muster und Korrelationen innerhalb umfangreicher Datensätze zu identifizieren [117, 118].

Bestehende Methoden des Data-Minings lassen sich in deskriptive, diagnostische, prädiktive und präskriptive Analysen unterteilen. Dabei eignet sich insbesondere aufgrund der historischen Daten im Entwicklungsprozess der Karosseriekomponenten sowie innerhalb der Füge- und Verbindungstechnik (vgl. Kapitel 4.3.2) die Anwendung deskriptiver Analysemethoden. Es entstehen somit auf der Grundlage bestehender Datenstände neue interpretierbare Muster und dadurch unter Umständen bislang unbekanntes Wissen. Zudem können Hinweise über Änderungen der Struktur, bestehende Beziehungen sowie Wirkungszusammenhänge zwischen den Elementen direkt abgeleitet werden. Um Handlungsempfehlungen zur Bildung von Modulen in neuen Fahrzeugarchitekturen zu entwickeln [152], eignen sich daher deskriptive Verfahren auf der Grundlage historischer Daten aus dem Entwicklungs- und Planungsprozess.

Die Auswahl geeigneter Data-Mining Verfahren wird dabei über die vorliegende Problemstellung innerhalb der Fahrzeugstruktur, die definierten Ziele sowie über erweiterte Kriterien und Randbedingungen (Übertragbarkeit auf unterschiedliche Baureihen, Anpassbarkeit an veränderliche Datenstrukturen und Interpretierbarkeit der Ergebnisse) bestimmt. Darüber hinaus können ebenfalls den bereits bekannten Aufgabenstellungen typische Verfahren und sogar Werkzeuge zugeordnet werden [153]. Über das gesetzte Ziel des KDD-Prozesses zur Generierung von bislang unbekanntem und ungenutztem Wissen kommen dabei grundsätzlich drei deskriptive Data-Mining Verfahren in Frage: die Zusammenfassung, Klassenbildung und Assoziationsanalyse. Damit können nicht nur unterschiedliche Betrachtungsebenen (Baureihe bis Einzelteil) abgedeckt, sondern auch weitere vertiefende Analysen abgeleitet werden:

- **Summarization** (Zusammenfassung):
Durch eine vereinfachte Darstellung und kompakte Visualisierung der gesammelten Rohdaten können damit bereits erste interpretierbare Muster [154] ermöglicht werden. Dabei wird zum einen durch die explorative Zusammenfassung das Verständnis der Anwender für die Datenstruktur erhöht und zum anderen eine gezielte Ableitung weiterer spezifischer Analysen zugelassen.
- **Clustering** (Klassenbildung):
Durch die Identifikation, Klassifikation und Zuordnung der Daten und Datensätze in definierte Kategorien werden insbesondere verwandte Elemente (ET oder ZB) hinsichtlich unterschiedlicher Parameter (Material, Änderungswahrscheinlichkeit etc.) durch das Clustern erfasst. Dadurch entstehen erfahrungsgeprägte Zuordnungen ähnlich gruppierter Elemente über mehrere Ebenen.

- **Association rules** (Assoziationsanalyse):

Um aus wiederkehrenden Änderungs- und Anpassungszyklen innerhalb der Datensätze neue Regeln, Assoziationen und Korrelationen abzuleiten, werden Assoziationsanalysen genutzt. Die Assoziationsanalyse bietet eine nachvollziehbare Möglichkeit, die identifizierten Regeln und Muster frühzeitig über quantifizierbare Messgrößen und Wahrscheinlichkeiten.

Durch die Methode der **Summarization** und der damit verbundenen Visualisierung aufbereiteter Datensätze ist es nicht nur möglich weitere Ausreißer und Anomalien zu identifizieren und zu bereinigen, sondern auch erste Zusammenhänge zu bestimmen und im weiteren Verlauf anwendungsspezifische Analysen durchzuführen [117, 148]. Große und unübersichtliche Datensätze werden folglich in einer nachvollziehbaren und kompakten Darstellungsweise verringerter Komplexität abgebildet. Es bilden sich somit bereits erste Hinweise und visuelle Analysemöglichkeiten heraus. Weiterentwickelte Verfahren der Summarization, z. B. bivariate statistische Analysen, ermöglichen somit erste Analysen zu bestehenden Wirkungsabhängigkeiten [155].

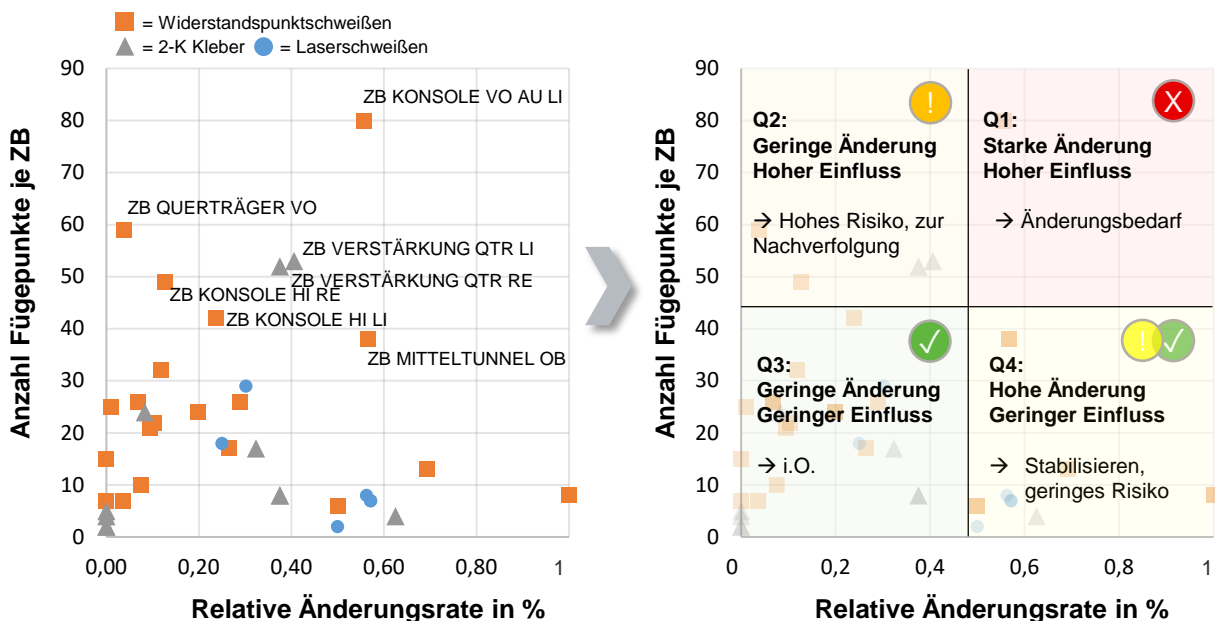


Abbildung 4-12: Beispiel zur Ableitung einer Klassifizierung aus der Zusammenfassung

Am Beispiel zur Identifikation änderungskritischer Umfänge zur Fügechnik werden die Wertepaare über die Zielgröße der "Fügepunktanzahl je ZB" (Ordinate) sowie die relative Änderungsrate (Abszisse) alle Freigabestufen in einem Streudiagramm gegenübergestellt. Die relative Änderungsrate stellt dabei das Änderungsverhalten (z. B. Anzahl geometrischer Änderungen der Außenkontur) im Verhältnis zur Anzahl an Datensätzen dar. Damit kann festgestellt werden, wie oft ein Bauteil oder Fügeverfahren

in Bezug auf den betrachteten Zeitraum oder die Anzahl an Meilensteinen im FEP modifiziert wurde. Jeder Datenpunkt stellt einen ZB dar, der durch die jeweilige Einordnung im Koordinatensystem eine definierte Anzahl an Fügepunkte besitzt sowie einer relativen Änderungsrate unterliegt (vgl. Abbildung 4-12). Neben den Wertepaaren selbst werden zudem die eingesetzten Fügetechniken (Widerstandspunktschweißen, 2-K Kleber etc.) als drittes Merkmal in das Koordinatensystem aufgenommen. Damit ist es möglich, beispielsweise ergänzend zur Auswertung auf der ZB-Ebene eine Differenzierung der Änderungsraten je Verbindungsverfahren im ZB darzustellen und auszuwerten. Mit steigender Anzahl an Fügeumfängen wächst ebenfalls die Bedeutung und Einflussnahme der Baugruppe gegenüber kapazitiven Änderungen in der Produktionsanlage. Unterliegt die verbundene Fügepunktanzahl je ZB zusätzlich Schwankungen und unregelmäßigen technischen Anpassungen, können diese Umfänge als änderungskritische Elemente innerhalb des Systems klassifiziert werden.

Diese Darstellungsart ermöglicht es, in Abhängigkeit zur jeweiligen Betrachtungsebene, unterschiedliche Baureihen in festgelegte Klassen und Grenzwerte in vier Quadranten (Q1-4) einzuteilen. (vgl. Abbildung 4-12). Die Darstellung kritischer (Änderungs-) Module, Wirkungszusammenhänge sowie eindeutiger Handlungsableitungen erfolgt hierbei über eine vereinfachte visuelle Analyse. Bereits geplante und gesetzte Kapazitäten im FEP, wie das Produktionsvolumen je Anlage oder die Investitionskosten, können frühzeitig abgesichert und Abhängigkeiten änderungskritischer Umfänge identifiziert werden. Dadurch kann nicht nur ein unmittelbarer Änderungsbedarf (Q1), wie beispielsweise "ZB KONSOLE VO AU LI" in Abbildung 4-12, als direkte Handlungsempfehlung abgeleitet werden. Auch die Erfassung und Bestimmung änderungsstabiler und unveränderlicher Datenpunkte im dritten Quadranten (z. B. "ZB KONSOLE HI LI") ermöglicht bereits zu einem frühen Zeitpunkt die Generierung von Standardisierungspotenzialen durch produktunabhängige Module. Die Methode der Summarization stellt damit einen kompakten Ansatz zur Komprimierung und Zusammenfassung bereits existenter (Roh-) Daten in einer Darstellungsart dar. Bestehende Informationen und Abhängigkeiten bleiben dabei erhalten [154].

Die weitere Strukturierung der Daten erfolgt über eine **Klassenbildung** durch die Methode des **Clusterings**. Übereinstimmende Merkmale erzeugen dabei Gruppierungen und Klassen innerhalb der Datensätze, um Daten ähnlicher Struktur miteinander zu verknüpfen oder durch abweichende Merkmalsausprägungen zu trennen [118]. Durch die Zuordnung in eindeutig definierte und abgegrenzte Klassen lassen sich neben der

Zusammenfassung einzelner Datensätze ebenfalls bislang unbekannte Abhängigkeiten und übergreifende Verknüpfungen unterschiedlicher Datensätze (z. B. baureihenübergreifende Abhängigkeiten) feststellen. Die Cluster selbst sowie deren Anzahl sind im Vorfeld nicht bekannt und entstehen schrittweise in mehreren Iterationen. Daher zählen diese Methoden auch zu den unüberwachten Lernverfahren ohne benötigte Vorkenntnisse hinsichtlich der Datenstruktur [141, 148].

Durch die Aufbereitung der zu klassifizierenden Daten in einen Vektorraum oder in ein Koordinatensystem entlang der zu untersuchenden Merkmale (wie z. B. in Tabelle 4-2) können zunächst durch manuelle und visuelle Clustering-Verfahren erste Klassen innerhalb reduzierter Datensätze erkannt und gebildet werden. Sind manuelle Verfahren aufgrund der Datenmenge oder -rate zu zeitintensiv oder nicht ausführbar, erfolgt die automatisierte und rechnergestützte Klassenbildung über partitionierende, hierarchische, dichtebasierte sowie kombinierte Methoden [140, 148]. Diese Methoden bilden über einheitliche Merkmale wie Abstand, Ähnlichkeit oder Dichteverbundenheit zwischen mehreren Datenpunkten abgegrenzte Gruppierungen und weisen Datenpunkte trennscharf einer definierten Klasse zu. Zur Erfassung übertragbarer Abhängigkeiten und Interdependenzen zwischen den ET, ZB sowie Derivaten einer Baureihe eignen sich neben partitionierenden ebenfalls dichtebasierten Clustering-Verfahren.

Damit wird nicht nur eine individuelle Zielerreichung (optimale Partition oder stärkere Einbindung von Randbedingungen) ermöglicht, sondern ebenfalls eine Anpassung des Verfahrens an die unterschiedlichen Arten von Datensätzen (hohe Streuung oder hohe Datendichte). Darüber hinaus bieten diese Verfahren den Vorteil, sowohl Datensätze mit starken Streuungen als auch mit einer hohen Datendichte bearbeiten zu können. Über die Auswahl des spezifischen Verfahrens besteht auch die Möglichkeit, weitere Randbedingungen und Ausreißer stärker zu berücksichtigen, um ausreichend robuste Datenstrukturen abzuleiten. Während partitionierende Verfahren eine eindeutige Zuordnung und Gruppierung in k -Cluster erzeugen, erfolgt zusätzlich durch dichtebasierte Verfahren eine Unterscheidung der erfassten Datenpunkte in Kernpunkte, Randpunkte und Rauschen [141, 148, 156]. Ebenfalls zeichnen sich partitionierende Verfahren durch eine bereits vordefinierte Anzahl an k -Cluster aus, die durch eine vorangegangene Sichtung der Daten oder erste Ergebnisse der Summarization festgelegt werden. Dazu findet in der Literatur und Praxis häufig das k -Means-Clustering in Verbindung mit dem Lloyd's-Algorithmus Verwendung [118, 141, 148, 157].

Besonders für die hohen Streubreiten und verteilten Dichten bereits vorhandener Daten zur Karosseriestruktur sowie die Produktions- und Prozessdaten des Karosseriebaus eignet sich das k -Means-Clustering zur Klassenbildung reduzierter Datensätze. Über n Iterationen werden durch die quadrierten euklidischen Abstände so lange neue Zuordnungen der Datenpunkte in k -Cluster gebildet, bis sich die Clustering-Ergebnisse nicht mehr ändern [158]. Um hingegen in großen Datensätzen ohne Vorwissen oder Sichtung der Daten dennoch neue Klassen zu entwickeln, werden dichte-basierte Clustering-Verfahren DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) angewendet. Dies trifft insbesondere bei der Implementierung konzeptunabhängiger Baureihen, Fahrzeugarchitekturen wie auch neuer Anforderungen zu. Die Zuordnung der Daten in das gleiche Cluster erfolgt somit erst, nachdem die Datenpunkte innerhalb einer definierten Entfernung (Radius ε) als Rand- oder Kernpunkte zueinander stehen [148, 159].

Auf der Betrachtungsebene der Derivate ist es somit durch die eindeutige Zuordnung und Gruppierung zu einem Cluster möglich, mehrere ZB-Ebenen aus unterschiedlichen Fahrzeugen derselben Architektur zu vergleichen. Damit sind baureihenübergreifende Gemeinsamkeiten, Unterschiede sowie Abhängigkeiten über definierte Merkmale und quantifizierbare Größen nachvollziehbar zu veranschaulichen. Die unter der Funktionsbezeichnung "ZB Halter RE" (vgl. Abbildung 4-13) zusammengefassten Komponenten der drei Fahrzeugderivate zeigen beispielsweise durch die verteilte Streuung der einzelnen ZB-Umfänge eine verringerte funktionale Interdependenz und organisationale Verknüpfung innerhalb der Fahrzeugarchitektur. Verteilte und nicht übereinstimmende Elemente können daher entweder als fahrzeugspezifische Umfänge vollständig isoliert werden oder sind durch nachfolgende Produkt- und Prozessanpassungen in die Zielgruppierung zu integrieren.

Komponenten ähnlicher und übereinstimmender Merkmale (z. B. "ZB Hauptboden" in Abbildung 4-13) werden hingegen zusammengefasst und einem derivateübergreifenden Modul zugeordnet. Die Bündelung und Zusammenfassung gleichartiger ET oder ZB mit hohen Abhängigkeiten bietet beispielsweise die Möglichkeit, innerhalb des FEP übergreifende Synergieeffekte der technischen Entwicklung umzusetzen wie auch angepasste organisationale Strukturen durch die Vereinigung ähnlicher Funktionen abzuleiten. Die hieraus resultierenden Karosseriemodule gelten folglich als produktunabhängige Standardmodule und somit über mehrere Derivate und Varianten innerhalb der definierten Fahrzeugarchitektur als wiederverwendbar.

Bezeichnung	Fahrzeug 1		Fahrzeug 2		Fahrzeug 3	
	X	Y	X	Y	X	Y
ZB HAUPTBODEN	0,13	180	0,18	185	0,21	170
ZB MITTELTNL	0,14	120	0,17	121	0,17	110
ZB KONSOLE BD	0,21	103	0,23	105	0,18	98
ZB KONSOLE MI	0,14	86	0,18	81	0,12	43
ZB HALTER LI	0,83	6	0,90	7	0,75	6
ZB HALTER RE	0,43	15	0,94	12	0,72	17
ZB KONSOLE HI	0,10	18	0,20	16	0,18	16
ZB KONSOLE LI	0,06	16	0,39	16	0,07	31
ZB KONSOLE RE	0,11	7	0,00	29	0,15	36
ZB LTGR LI	0,55	47	0,07	34	0,08	40
ZB LTGR RE	0,57	42	0,04	31	0,16	37
ZB VERST LI	0,42	3	0,51	3	0,45	6
ZB VERST RE	0,00	5	0,08	26	0,00	20
ZB QTR FS	0,19	20	0,10	27	0,15	21
ZB QTR VO	0,08	38	0,11	48	0,02	35
ZB QTR HI	0,00	85	0,05	81	0,18	94

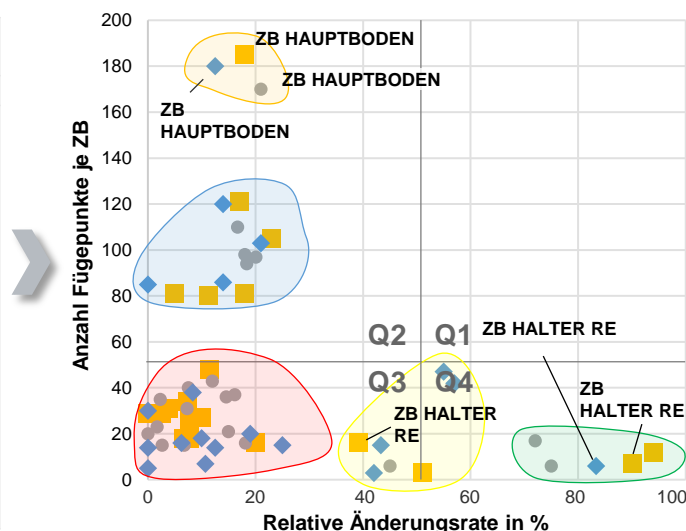


Abbildung 4-13: Beispiel für den Vergleich definierter ZB-Umfänge mehrerer Fahrzeuge innerhalb einer Fahrzeugarchitektur durch Clustering

Das Ergebnis des Clusterings besteht damit in der eindeutigen Zuordnung der Datenpunkte und ET und ZB in neue Klassen, die definierte Merkmale quantifizierbarer Abhängigkeiten besitzen. Abweichungen oder Übereinstimmungen können bestimmt und als interpretierbare Ergebnisse mithilfe computergestützter Analysemethoden übersichtlich formalisiert werden. Durch die vergleichende Betrachtung mehrerer unterschiedlicher ZB-Ebenen bilden sich quantifizierbare Abhängigkeiten zwischen den Komponenten und ermöglichen eine nachvollziehbare Aufbereitung in einer übertragbaren Darstellungsweise für die nächsten Schritte im multimethodischen Verfahren.

Für eine ganzheitliche Betrachtung der zusammengefassten und gruppierten Daten, ermöglicht die **Assoziationsanalyse**, bislang unbekannte Korrelationen, Regeln und Muster in großen Datensätze zu identifizieren und als implizites Wissen zu ergänzen. Die Analyse und Ableitung quantifizierbarer Regelmäßigkeiten und sich wiederholender Muster werden über statistisch relevante Häufigkeiten sowie verbundene Eintrittswahrscheinlichkeiten festgestellt. Formale Aussagen über Regeln und verknüpfte logische Folgen ermöglichen somit die Definition von Prämissen ("Wenn") sowie daraus abgeleitete Folgerungen ("Dann") [148]. "Wenn-Dann"-Regeln bzw. Bedingungen der Assoziationsanalyse beschreiben damit auffällig sich wiederholende Abhängigkeiten zwischen Datenobjekten und definieren durch nachvollziehbare Kenngrößen und Attribute bestehende Korrelationen [118, 160]. Eines der zentralen Verfahren der Assoziationsanalyse zur Beschreibung von häufigkeitsgestützten Regeln ist die im Marketing vielfach eingesetzte Warenkorbanalyse durch den Apriori-Algorithmus. Dieser zeichnet sich durch die problembezogene Vorgehensweise und eine nachvollziehbare

Darstellungsweise aus [119]. Hierbei werden Abhängigkeiten dokumentierter Einkäufe zwischen unterschiedlichen Produkten erfasst, um Kunden auf Basis von Wahrscheinlichkeiten Empfehlungen zu weiteren Käufen zu geben. Entgegen einer klassischen Korrelationsanalyse nutzt der Algorithmus hierzu mehrere Attribute und Datenwerte zur Untersuchung nichtlinearer Zusammenhänge [161]. Zur Identifikation sowie Generierung bislang unbekannter Assoziationen kritischer Wirkungszusammenhänge erfolgt damit die Übertragung der Vorgehensweise zum Apriori-Algorithmus auf die Karosseriestruktur und Fügetechnik (vgl. Abbildung 4-14).

Die zugrundeliegende Datenbasis $D = \{t_1, \dots, t_k\}$ aus dem Änderungsverlauf des "ZB Vorbau Struktur" über sieben Quality Gates besteht aus einer definierten Menge an t_k Transaktionen. Die in diesem Beispiel genutzten Daten wurden dabei aus den Änderungszyklen eines Mittelklasse-Fahrzeugs aus dem D-Segment generiert. Jede Transaktion stellt darin eine abgeschlossene Freigabestufe (QG) in Verbindung mit der dokumentierten Anzahl an $I = \{i_1, \dots, i_n\}$ Items (Anzahl an ET oder ZB) dar, die innerhalb des QG geändert und angepasst wurden. Hieraus entwickeln sich Item-Mengen mit $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ als Kombination aller relevanten und verbundenen Items mit $t_j \subseteq I$ [118]. Die definierte Länge k bestimmt maßgeblich den Betrachtungs- und Untersuchungsumfang an spezifischen Elementen x_k als k -Item-Menge und die Anzahl an veränderten Komponenten innerhalb einer Freigabestufe im FEP. Je höher somit der Wert von k , desto mehr ET und ZB sind innerhalb einer definierten "Wenn-Dann"-Regel miteinander verknüpft. Dabei beschreibt beispielsweise die Assoziationsregel $\{C \rightarrow D\}$ in Abbildung 4-14 die identifizierten Änderungsmuster und die Abhängigkeiten für die Komponenten $\{C\}$ und $\{D\}$ als 2-Item-Mengen mit $\{C, D\}$.

Um im ersten Schritt der Assoziationsanalyse mehrfach auftretende k -Item-Mengen zu selektieren und die relative Häufigkeit der Teilmengen aus X zu bestimmen, wird die Kennzahl *support* berechnet. Der *support* beschreibt somit die relative Häufigkeit der jeweiligen Regel (z. B. $\{X\}$, $\{X \rightarrow Y\}$ etc.) bezogen auf die Gesamtheit aller Transaktionen. Über eine Zählfunktion wird die Häufigkeit der Freigabestufen, in denen ausgewählte ZB-Kombinationen auftreten, durch die Gesamtanzahl aller Freigabestufen geteilt. Über die Messgröße *support* und einen Vergleich der Mindestanzahl gleicher Item-Mengen (*minSupp*) erfolgt der Nachweis der statistischen Relevanz und Regelmäßigkeit mit $support(X) \geq minSupp \forall D \subseteq I$.

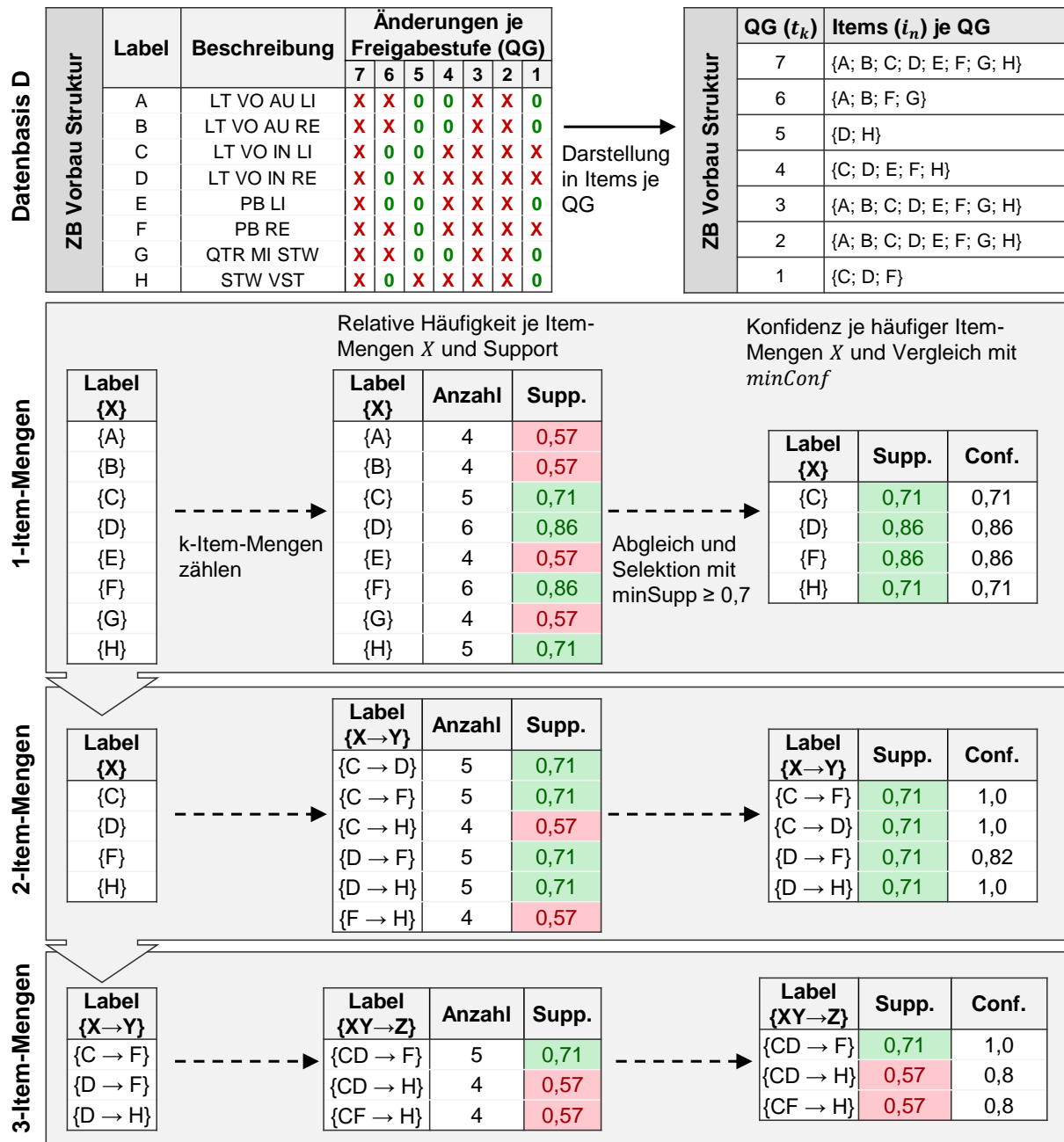


Abbildung 4-14: Beispiel zur Assoziationsanalyse "ZB Vorbau Struktur" über 3-Item-Mengen durch den Apriori-Algorithmus in Anlehnung an [149]

Auffällige und änderungsrelevante Item-Mengen werden selektiert und für $k + 1$ -Item-Mengen eingesetzt (vgl. Abbildung 4-14). Um zusätzlich die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Stärke der erfassten Korrelation zu bestätigen, nutzt die Assoziationsanalyse die Kennzahl der Konfidenz (*confidence*) [148]. Im Gegensatz zum *support* berechnet die *confidence* die relative Häufigkeit, in der die jeweilige Regel richtig ist und somit auch die Eintrittswahrscheinlichkeit. Auch die Konfidenz verwendet dazu ein definiertes Minimum (*minConf*), um ausschließlich relevante Änderungsregeln sowie Abhän-

igkeiten zwischen den Komponenten der Karosseriemodule aufzunehmen. Beispielsweise zeigt sich in den 3-Item-Mengen der Abbildung 4-14 in allen Änderungszyklen (*confidence* von 100 %) der "ZB LT VO RE u. LI" ($\{C\}$, $\{D\}$) ebenfalls eine Anpassung der Komponente "PB RE" ($\{F\}$). Damit besteht eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit und -sicherheit der ausgewählten 3-Item-Menge $\{CD \rightarrow F\}$.

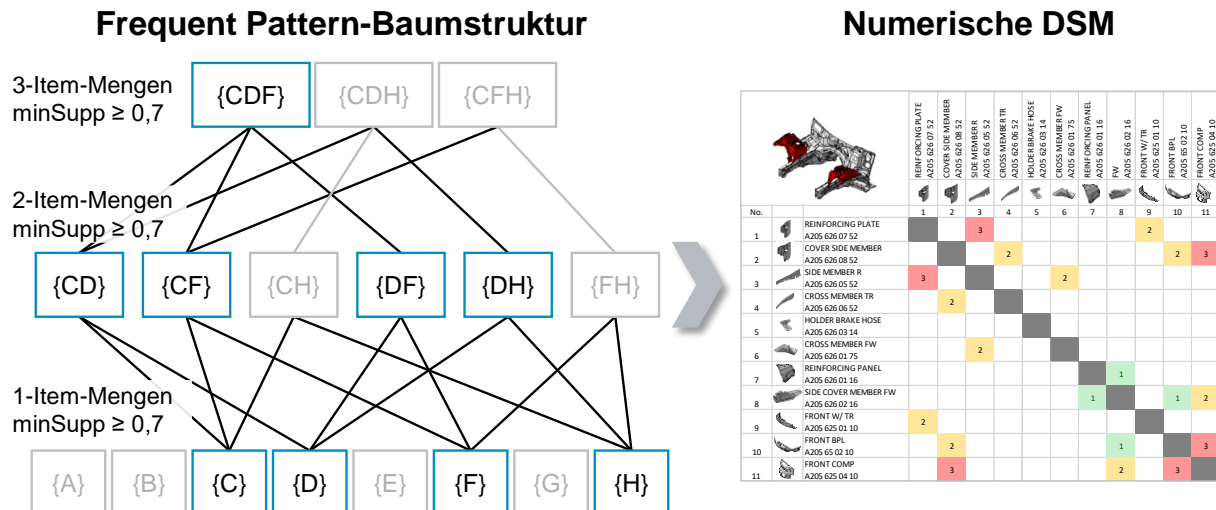


Abbildung 4-15: Überführung der Baumstruktur und Abhängigkeiten in eine DSM

Die adaptierte Methode der Assoziationsanalyse über den Apriori-Algorithmus ermöglicht folglich eine strukturierte Vorgehensweise, um nachvollziehbare, wiederholbare und bislang unbekannte (kritische) Änderungsmuster und stark abhängiger ET und ZB aus den erfassten Datensätzen abzubilden. Hieraus können neben quantifizierbaren Abhängigkeitsstrukturen (z. B. in eine Frequent-Pattern-Baumstruktur) ebenfalls direkte Handlungsempfehlungen für eine angepasste Modulbildung sowie für quantifizierbare Matrizen abgeleitet werden (vgl. Abbildung 4-15). Dabei beschränkt sich die Assoziationsanalyse nicht nur auf die Untersuchung kritischer Produkt- und Produktionsänderungsraten im FEP, sondern ermöglicht den Vergleich über mehrere Baureihen, Derivate und Varianten in einer Fahrzeugarchitektur.

Zusammenfassend zeigt sich, dass durch die an die Problemstellung angepassten Methoden der deskriptiven Datenanalyse eine vollumfängliche Betrachtung und Analyse der bestehenden Datenstruktur ermöglicht wird. Die strukturierte und IT-gestützte Vorgehensweise ergänzt somit konventionelle Vorgehensweisen und Planungsprozesse durch die Integration von Domänenwissen sowie Wissen über kritische Wirkungszusammenhänge. Die hierbei erkannten Abhängigkeiten und Ergebnisse der Datenanalyse können anschließend durch die Überführung in das Zielformat der Design Structure Matrix als internes Produkt- und Prozesswissen integriert werden.

4.3.5 Evaluation, Ergebnispräsentation und -überführung

Um im letzten Teilschritt das rechnergestützte Vorgehen, die aufgestellten Hypothesen sowie die Resultate der Analyse selbst abschließend und vollumfänglich zu prüfen und zu beurteilen, werden die Domänenexperten und Fachbereiche eingebunden. Nur die Domänenexperten können die generierten Daten evaluieren und die Umsetzungsrelevanz der Ergebnisse für den FEP bestätigen [117, 118]. Da der Datenverantwortliche diese Fähigkeit nicht besitzt, wird eine standardisierte Berichtsform (z. B. Änderungs- und Hot-Spot-Dokumentationen) oder vollständig integrierte visuelle Darstellungsweise (z. B. als interaktive Webplattform vgl. Abbildung 4-16) benötigt. Diese werden auf Produkt- und Produktionsebene hinsichtlich Plausibilität durch die Experten geprüft und ggf. durch ergänzende Daten, Analysen oder Zielgrößen erweitert und angepasst. Beispielsweise können dadurch die produktionsseitige Einteilung der Änderungshäufigkeit innerhalb der Produktionsanlagen (z. B. durch die Darstellung der Quadranten Q1 bis Q4) mit den produktseitigen Änderungsumfängen und -Muster in einer Übersicht miteinander verknüpft werden.

Der manuell identifizierte Datenpfad der aufbereiteten Produkt- und Prozessdaten ermöglicht damit die Integration und Entwicklung einer automatisierten Datenabruffunktion direkt an der Datenquelle. Somit können Data-Mining-Ergebnisse nicht nur durch neue Datenstände (z. B. Freigabestufen) automatisch aktualisiert, sondern auch durch die standardisierte Vorgehensweise ebenfalls um weitere Fahrzeugarchitekturen, Füügeverfahren oder Produkt- und Produktionsmerkmale erweitert werden. Es entsteht eine übersichtliche Benutzeroberfläche, die je nach Bedarf um weitere Parameter (Bezeichnung, Änderungsrate, Klasse etc.) angepasst werden kann. Folglich ist es möglich, mehrere Datenanalysen, Kennzahlen und Darstellungsarten in einer standardisierten Berichtsform aufzubereiten (vgl. Abbildung 4-16). Darüber hinaus ermöglichen die bislang unbekanntenen Wirkungsabhängigkeiten und Muster nicht nur die Ableitung umsetzbarer Handlungsempfehlungen, sondern auch die einheitliche Modellierung der Abhängigkeiten in ein übertragbares Datenformat.

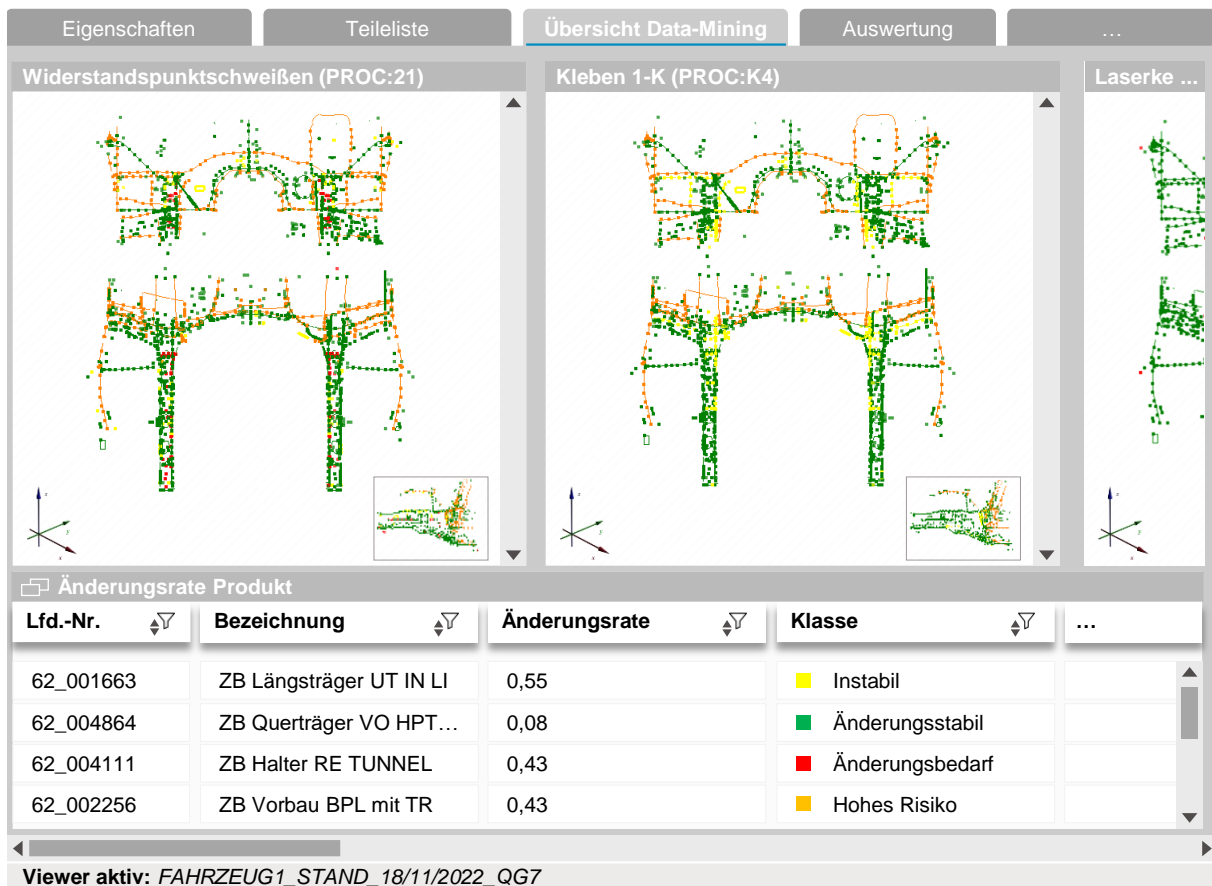


Abbildung 4-16: Beispiel für die Aufbereitung der Data-Mining Ergebnisse zur Analyse der Fügepunkteänderungen in einer webbasierten Austauschplattform

Daher kann das explizite Wissen über kritische Wirkungszusammenhänge und Erfahrungswissen der Fachbereiche in das Zielformat der Darstellungsweise der DSM übertragen und als vordefinierte Anforderung innerhalb des multimethodischen Verfahrens mit aufgenommen werden (vgl. Beispiel 3 in der Abbildung 4-7). Auf der Grundlage der benutzerdefinierten Analysen bilden sich dadurch aktuelle und validierte Daten aus einer wiederholbaren und nachvollziehbaren Quelle mit einem hohen Maß an Genauigkeit. Dies ermöglicht weiterhin eine strukturierte Zuordnung und Einteilung der Module auf der Basis von robusten und unveränderlichen Daten sowie das Aufzeigen von zusätzlichen Planungskapazitäten oder Änderungen am Produkt selbst.

Über eine einheitliche Austausch- und Informationsplattform können die Domänenexperten (z. B. bauteilbezogene Karosserieentwickler oder Produktionsanlagenplaner) baureihen-, fahrzeug- und bereichsübergreifendes Wissen abrufen. Dadurch können weitere Potenziale (Zeit- und Kostenreduzierungen sowie Qualitätssicherung) zwischen den Entwicklungs- und Planungsbereichen generiert und Wiederholungsfehler vermieden werden.

4.4 Modulbildung und Abgleich der Anforderungen

Im vierten und letzten Methodenbaustein des multimethodischen Verfahrens erfolgt die Ableitung der Module aus den identifizierten Interdependenzen. Die Zwischenergebnisse im Zielformat der DSM bilden die Grundlage für den Abgleich und die Zusammenfassung verbundener Elemente und Abhängigkeiten. Aus den individuellen Wirkungsabhängigkeiten entstehen somit vollständige Module. Abweichungen, wie auch Übereinstimmungen in der Zuordnung von Modulen, werden dabei aufbereitet und abgestimmt, um mehrere Anforderungen und Ziele erfüllen zu können.

In einem System können damit Elemente mit hoher interner Abhängigkeit in ein gemeinsames Modul zusammengefasst und gegenüber Modulen geringer Abhängigkeiten durch gruppierende bzw. klassenbildende Verfahren abgegrenzt werden. Die resultierenden Modulanordnungen unterscheiden sich neben der Zusammensetzung und Anzahl an gruppierten Komponenten auch durch nicht eindeutige, gegensätzliche und widersprüchliche Abhängigkeiten. Um dennoch einen Abgleich zwischen den gebildeten Modulen zu erreichen und Abweichungen quantifizierbar darzustellen, werden Gewichtungsfaktoren und Priorisierungen einzelner Anforderungen eingesetzt. Im Gegensatz zur Gewichtung und Darstellung von Abhängigkeiten innerhalb der DSM werden hierbei die resultierenden Module und Anforderungen entsprechend der Einflusswirkung auf das Gesamtsystem sowie durch Leistungskennzahlen zur Modularisierung bewertet. So können abweichende Modulbildungen anhand eindeutiger Kriterien verglichen und notwendige Zuordnungen nachvollziehbar begründet werden. Besitzt ein Einzelteil oder eine Baugruppe mehrere unterschiedliche Zuordnungen über eine Vielzahl an Anforderungen, kann dabei die Priorisierung die Modulzuordnung wesentlich beeinflussen oder auch endgültig festlegen.

Erst unter der Einbeziehung von Bewertungsgrößen und -kriterien entsteht ein Abgleich mehrerer unterschiedlicher Anforderungen zu einem angestrebten bzw. definierten Zielzustand. Insbesondere die Priorisierung und das Einbringen quantifizierbarer Größen unterstützt die Aussagefähigkeit und Begründung übereinstimmender Modulentscheidungen. Damit entsteht ein robuster Konsens aus allen Anforderungen. In Abhängigkeit von der Datenmenge und -verfügbarkeit sowie der bereitgestellten Rechenleistung lassen sich ebenfalls im Prozess zum Abgleich der Anforderungen teilautomatisierte Auswertungsverfahren einsetzen.

4.4.1 Individuelle Modulbildung und -zuordnung

Für die Ableitung individueller und anforderungsspezifischer Module sind die bereits vorstrukturierten Daten in Form der Abhängigkeitsmatrizen bzw. DSM heranzuziehen. Entsprechend der Vorgehensweise zur Modularisierung (vgl. Kapitel 2.3.1) werden die Wirkungsabhängigkeiten sowie die Ergebnisse der Datenanalyse in Gruppierungen und dadurch in Module mit reduzierter Komplexität überführt. Als Folge dessen entsteht gleichzeitig innerhalb des festgelegten Systems eine Zusammenfassung der verknüpften Elemente sowie die Entkopplung dieser gegenüber abweichenden Modulordnungen. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Zielgrößen können Module entweder durch die Reduktion und Zusammenfassung der Interaktionen ("Partitioning") oder der Maximierung der internen Abhängigkeiten ("Clustering") gebildet werden. Beide Methoden unterstützen den individuellen Handlungsbedarf, der sich aus der zugrundeliegenden Problemstellung ergibt.

Innerhalb der DSM findet die Analyse der Abhängigkeiten in mehreren Iterationen statt und fasst dabei Verknüpfungen in angepasste Module zusammen. Die Methode des "Partitioning" ordnet die Zeilen und Spalten der Matrizen so lange neu, bis keine oder wenige Rückkopplungen und wechselseitige Interdependenzen zwischen Modulen und Einzelementen mehr vorhanden sind [81, 134, 162]. Durch die Matrixmanipulation erfolgt daher die Anordnung der Elemente des Systems möglichst dicht zueinander und oberhalb der Diagonalen, um eine einseitige Abhängigkeit in Sequenz zu generieren (vgl. Abbildung 4-17). Mit der verringerten Anzahl an wechselseitigen Rückkopplungen und Iterationen können somit kompakte, unabhängige und analysfähige Module [163] entwickelt werden. Die zusammengefassten Elemente repräsentieren demnach reduzierte Module. Insbesondere bei aufgaben- und wertebasierten DSM, wie etwa richtungsabhängigen Ablauf- und Fügefolgen, entstehen dadurch Module mit verringerter Komplexität. Für die Bestandteile der Karosseriestruktur mit einseitiger Wirkungsrichtung können beispielsweise Gruppierungen mit einer reduzierten Anzahl an Iterationen als produktunabhängige Elemente zur Standardisierung vorgeschlagen werden (vgl. Abbildung 4-17). Komponenten mit wechselseitigen Abhängigkeiten sind hingegen gezielt zu isolieren, um zusätzliche Iterationen und Störgrößen in der dynamischen (Ablauf-) Struktur zu vermeiden.

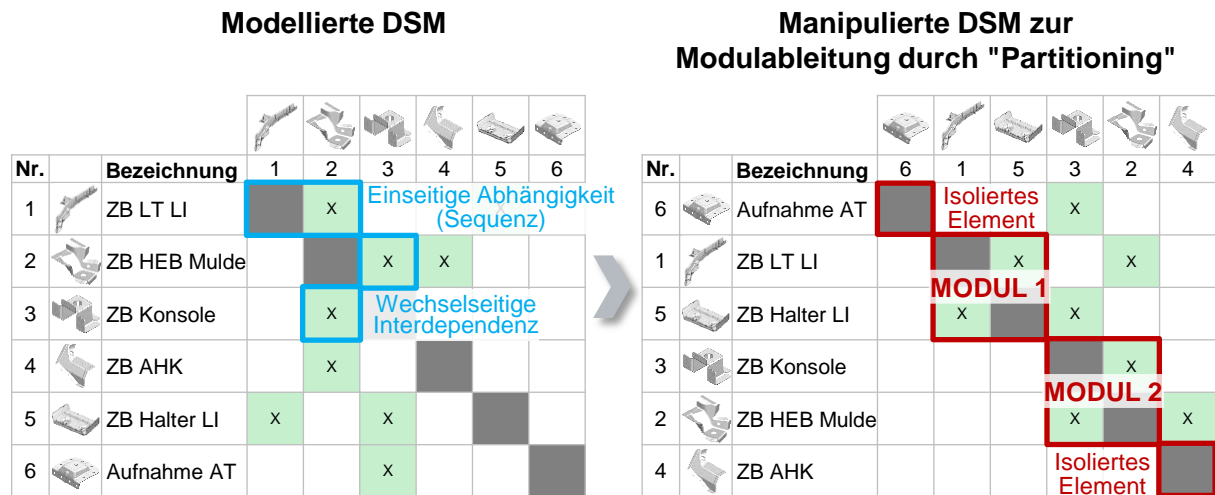


Abbildung 4-17: Beispiel für das "Partitioning" einer richtungs-basierten DSM für eine Fügefolge in zusammengefasste Module und isolierte Elemente

Im Fall statischer und komponentenbasierter DSM wird hingegen die Zusammenfassung in logische Module über das "Clustering" durch Fokussierung auf Ähnlichkeitsmaße und der Maximierung interner Abhängigkeiten durchgeführt [164]. Neben der Gruppierung wechselseitiger Wirkungsabhängigkeiten in binären Matrizen können quantifizierbare Abgrenzungen der Einzelteile und Module über Schwell- und Grenzwerte numerischer DSM umgesetzt werden. Auf Basis ähnlicher Abhängigkeiten und Modulformationen erfolgen unter Beibehaltung der externen Unabhängigkeit zusammengefasste Elemente innerhalb des ausgewählten Systems [81, 104, 134].

Dabei leitet sich die Zusammenfassung der Elemente durch die Analyse der Abhängigkeiten zwischen den Elementen (vgl. Abbildung 4-18) ab. Bilden sich mehrere Gruppierungen, wird die Anzahl der externen Abhängigkeiten zwischen den Modulen selbst so weit reduziert, bis eine eindeutige Zuordnung der Elemente zu den jeweiligen Modulen erfolgen kann. Für geometrisch unabhängige Komponenten besteht beispielsweise zwischen den Modulen eine physisch sichtbare Trennung über die Außenkontur der Karosseriebauteile und eine reduzierte Anzahl an Wechselwirkungen. Dennoch sind eine vollständige Isolation und Abgrenzung der Module nicht immer möglich, wodurch es zu intermodularen Interdependenzen kommt (vgl. Abbildung 4-18). Diese sind bei der Bildung der finalen Modulzusammensetzungen zu berücksichtigen und auf negative Einflusswirkungen sowie Widersprüche zu untersuchen [135]. Durch die Methode des "Clustering" können dadurch Abhängigkeiten mit starker interner Interaktion festgestellt und für die eindeutige Zu- und Anordnung in Module genutzt werden. Daher kann diese Methode insbesondere in der Entwicklung von Produktarchitekturen sowie

der Modularisierung komponentenbasierter Systeme eingesetzt werden, um möglichst eng verknüpfte Elemente zusammenzufassen [104].

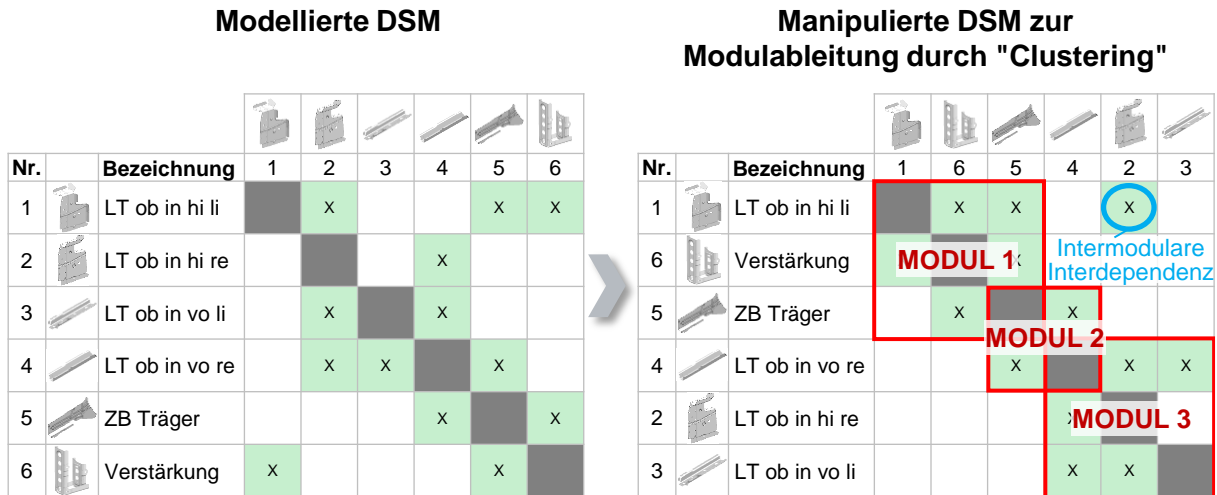


Abbildung 4-18: Beispiel zum "Clustering" einer komponentenbasierter DSM in drei Module. Aus unterschiedlichen Anforderungen und Abhängigkeiten lassen sich durch den strukturierten Prozess zur Modulbildung nachvollziehbare An- und Zuordnungen der Elemente in Module ableiten. In diesem Zusammenhang ist es unerheblich, welche Anforderung (z. B. geometrische Abhängigkeit oder Fertigungsfügeföolge) oder Attribute (binär, numerisch und aufgabenbasiert) innerhalb der DSM vorliegen.

Beide Methoden ermöglichen gleichermaßen die Ableitung von Modulen und damit die Zuordnung von Einzelementen in Baugruppen. Es wird somit ein Prozess entwickelt, um unter definierten Bedingungen mehrere anforderungsindividuelle Module für ein System zu generieren. Dabei kann die Modulbildung durch rechnergestützte Analysemöglichkeiten und generische Algorithmen unterstützt werden. Damit ist es ebenfalls möglich, für größere Systeme, wie Fahrzeugarchitekturen mit einer höheren Anzahl an Komponenten, eine nachvollziehbare und eindeutige Zuordnung der Elemente in Modulen zu generieren.

4.4.2 Gewichtung und Priorisierung

Durch die Abhängigkeitsanalyse und individuell entwickelte Modulzuordnungen erfolgt die Zusammenfassung der Komponenten und ZB in Modulgruppen. Über einheitliche Bewertungsgrößen entsteht damit ein nachvollziehbarer und änderungsrobuster Konsens aus allen Modulhalten. Anforderungen sowie resultierende Modulbildungen

werden somit nach der Einflusswirkung auf die Gesamtkomplexität bewertet und priorisiert. Auswahl, Gewichtung und die daraus abgeleitete Priorisierung werden dabei durch qualitative und quantitative Bewertungsgrößen abgesichert (vgl. Tabelle 4-6).

Tabelle 4-6: Zusammenstellung qualitativer und quantitativer Bewertungsgrößen sowie Fokuse und Zielgrößen für Modulzuordnungen in Anlehnung an [165]

Bewertungsgröße	Fokus	Zielgrößen / Kennzahlen / Regeln
Domänenexpertenschätzung → <i>Qualitativ</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Feste Moduleinteilungen. - Entwicklungs- und planungsseitige Restriktionen. - Machbarkeitsbewertung. - Wirtschaftliche Bewertung. 	<ul style="list-style-type: none"> - Moduleinteilung, -größe und -anzahl $M_i = \{\text{Elemente } X_1, \dots, X_n\}$. - Klassifikations-, Priorisierungs- und Werteskala (1., 2., ...). - Untrennbare Modulzusammensetzungen (ZB A ↔ ZB C).
Coupling-Index (CI) → <i>Quantitativ</i>	Bewertung der Interaktionen und Abhängigkeiten zwischen Modulen.	$CI = \frac{\text{Anzahl Verbindungen innerhalb der Module}}{\text{Gesamtanzahl an Verbindungen im Betrachtungsumfang}}$ [166]
Whitney-Index (WI) → <i>Quantitativ</i>	Bewertung Moduleinteilung über das Verhältnis der Verbindungen innerhalb der DSM zur Anzahl an Elementen.	$WI = \frac{\text{Anzahl Verbindungen in der DSM}}{\text{Anzahl an Elementen in der DSM}}$ [167]
...		

So werden beispielsweise das vorhandene Wissen und die Erfahrung der Domänenexperten über gegensätzliche und getrennte Moduleinteilungen genutzt, um eine Bewertungsgröße für die jeweiligen Modulbildungen und Anforderungen abzuleiten. Ebenfalls können produktionsseitige Festlegungen und untrennbare Modulzusammensetzungen als feste Module definiert werden, um diese im weiteren Prozess isoliert zu betrachten. Bestehende Restriktionen legen damit bereits im Vorfeld vereinzelte Module fest. Daher besteht beispielsweise für die ZB Längsträger Links und Rechts entlang der Spiegelachse aufgrund derselben Fügeumfänge eine theoretisch hohe Abhängigkeit der Bauteile zueinander und eine hohe Übereinstimmung der umzusetzenden Handlingsstufen. Dennoch stellt die Zusammenfassung in einem Modul hinsichtlich der räumlichen Trennung und unterschiedlichen Verbauorten in der Prozessfolge einen konstruktiven Widerspruch dar.

Neben den physikalischen Restriktionen werden ebenfalls funktionale und schnittstellenbedingte Abhängigkeiten sowie die generelle Kompatibilität der Elemente in einem Modul geprüft und bewertet [168]. Somit können durch die qualitative Betrachtung und

die Einbindung der Entwicklungs- und Planungsexperten kritische und nicht logische Modulbildungen und -trennungen festgestellt und gegenüber der Einflussnahme auf die Gesamtkomplexität priorisiert werden. Neben qualitativen Regeln und Auswertungen erlaubt die Methode der DSM zudem eine quantitative Bewertung und damit Anpassung der gebildeten Module nach festgelegten Kennzahlen (vgl. Tabelle 4-6). Vergleichbare Parameter zur Einordnung der Komplexität und Bewertung der Interaktionsstärke der Verbindungen werden damit über Kennzahlen bezüglich der Anzahl an Modulen, Elementen sowie Schnittstellen generiert [165–167, 169]. Umfasst in den Modulen eine bereits manipulierte DSM annähernd so viele Abhängigkeiten wie in Summe durch die DSM ermittelt, steigt der Coupling-Index (CI) als Bewertungsgröße der Interaktion und weist auf hohe Abhängigkeiten zwischen den Elementen hin. Damit entwickelt sich eine eindeutige Möglichkeit zur Abgrenzung und quantifizierbaren Priorisierung gegenüber schwächeren Abhängigkeiten. Die Ableitung besonders kritischer Anforderungen und Modulzusammensetzungen erfolgt somit in einer priorisierten Reihenfolge. Insbesondere durch die Zusammenfassung und Vereinheitlichung der Kennzahlen und Regeln entstehen beispielsweise über eine Bewertungsmatrix nachvollziehbare Kriterien zur übergreifenden Konsensbildung.

4.4.3 Visualisierung und Abgleich der Modulbildungen

Um die individuellen und einzeln gebildeten Module im nächsten Schritt des multimedialen Verfahrens vollständig miteinander verknüpfen und abgleichen zu können, sind die Modulzuordnungen zunächst in einer einheitlichen multikriteriellen und mehrdimensionalen Betrachtungsweise darzustellen. Insbesondere die Vereinigung und auch die Entkopplung der Module sowie der Abgleich zwischen variierenden Teillösungen zu einer Lösungsmenge wird durch die unterschiedlichen Gewichtungen und Priorisierungen zunehmend erschwert [95].

Diese Herausforderung wird in Anlehnung an die Visualisierungsmethode der "Parallel Sets" durch die Übertragung der Teillösungen in verknüpfte Parallelogramme (k -partite Netzwerke) gelöst. Es entsteht dadurch eine übersichtliche Aufbereitung und erste Analyse der klassifizierten Daten ohne Informationsverlust [170]. Die parallelen Achsen des Koordinatensystems werden durch die individuellen Modulzuordnungen entsprechend der Anforderung (z. B. Vereinbarkeit der Designprämissen und einheitlicher Einsatz der Verbindungstechnik) ersetzt, um die mehrdimensionalen Beziehungen der Module darzustellen (vgl. Abbildung 4-19).

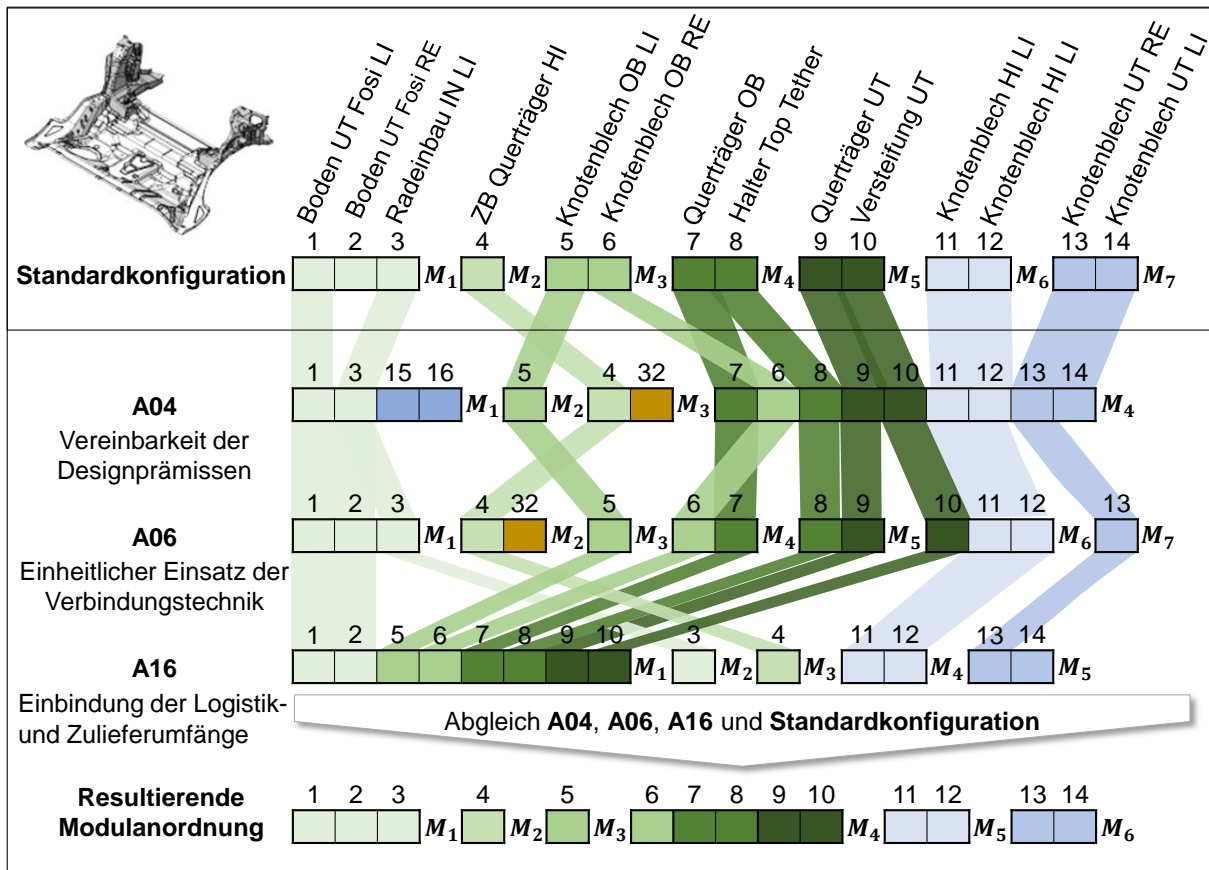


Abbildung 4-19: Beispiel zur Visualisierung und Abgleich für den ZB Heckwagen

Durch die Darstellungsweise entsteht eine vergleichende Übersicht von der Anzahl an Einzelementen ($1, 2, \dots, n$), der Modulzuordnungen (M_1, M_2, \dots, M_i) sowie zwischen den anforderungsübergreifenden Verbindungen der Module selbst. Über Verbindungselemente, wie beispielsweise farblich gekennzeichnete Parallelelogramme zwischen den Einzelementen werden ebenfalls Abweichungen und Übereinstimmungen der Modulgruppen für jede Anforderung (A04, A06, ...) sowie der Standardkonfiguration (z. B. bestehender Baureihen) visualisiert und erfasst (vgl. Abbildung 4-19). Der Betrachtungsumfang wird folglich im laufenden Analyseprozess durch variierende Modulzuordnungen und neue Anforderungen erweitert oder reduziert. Damit kann in den frühen Phasen des FEP mit geringem Aufwand eine Vielzahl an unterschiedlichen Kombinationen der Modulzusammensetzungen visualisiert, analysiert und abgeglichen werden [139].

Während durchgängig übereinstimmende Modulgruppen wie beispielsweise Elemente 11 und 12 in Abbildung 4-20 eindeutig als Konsens zusammengefasst werden, sind andere Elemente schwieriger zuzuordnen. Für Element 10 sind damit mehrere nicht eindeutige und gegensätzliche Moduleinteilungen möglich. Ein vollständiger Abgleich

erfolgt somit erst unter dem Einbezug weiterer Kriterien und Priorisierungen. Über beispielweise Gewichtungen, feste Modulkonfigurationen oder die Einbindung von Domänen- und Erfahrungswissen sind erfolgskritische Anforderungen zu priorisieren, um einen Konsens mit der Modulbildung zu erreichen (vgl. Abbildung 4-20).

Standardkonfiguration	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
A04	1	3	15	16	5	4	32	7	6	8	9	10	11	12	13
A06	1	2	3	4	32	5	6	7	8	9	10	11	12		
A16	1	2	5	6	7	8	9	10	3	4	11	12	13	14	

= Vorgegebene Modulzuordnung
 = Gewichtung (Faktor 2)
 = Konsens

Abbildung 4-20: Beispiel unterschiedlicher Komponenten und Modulgruppen durch die Modulzuordnung, Gewichtung und den Konsens

Dabei werden Zuordnungen und Verknüpfungen zwischen den einzelnen Modulen umso deutlicher, je dichter diese beieinanderliegen und über mehrere Anforderungen hinweg einen Konsens bilden [119]. Die durchgängigen Modulzuordnungen ermöglichen daher eine Abgrenzung gegenüber volatilen, nicht eindeutigen und abweichenden Anordnungen. Damit erfüllt die entwickelte Methode in Anlehnung an die Vorgehensweise der "Parallel Sets" nach BENDIX ET AL. [170] die grundsätzlichen Anforderungen zum Abgleich unterschiedlicher Module und Modulzuordnungen. Die daraus resultierende Darstellung der Modulgruppen stellt eine einfache und nachvollziehbare Aufbereitung der kategorisierten Daten dar. Auf Basis dieser visuellen Analyse sind erste manuelle Auswertungen durchführbar, und es entsteht eine Darstellung zur grundlegenden Einordnung übereinstimmender sowie abweichender Modulzusammensetzungen.

Aufgrund der manuellen Interpretation und Auswertung eignet sich die Methode für kleinere Datensätze und Systeme (bis zur Unter-ZB-Ebene) sowie zur Modulbildung und -trennung bereits bekannter Anforderungen. Folglich sind die Abstimmung und Zuordnung der Einzelteile in definierte Module besonders zeit- und arbeitsintensiv. Mit zunehmender Anzahl an abzugleichenden Elementen und unbekanntem Anforderungen steigt damit der Bedarf an einem Lösungsansatz zur Verarbeitung großer und komplexer Datensätze in allen ZB-Ebenen.

4.4.4 Aggregierte Clusteranalyse durch Consensus Clustering

Um komplexe Systemstrukturen sowie die erfassten Anforderungen vollständig miteinander abzugleichen und untereinander abzustimmen, können aggregierende Methoden der Clusteranalyse genutzt werden. Insbesondere das Ziel- und Ausgabeformat der DSM ermöglicht eine strukturierte Zusammenfassung der Zwischenergebnisse durch rechnergestützte Algorithmen sowie (teil-) automatisierte Methoden zu einer durchgängig abgestimmten Lösungsmenge.

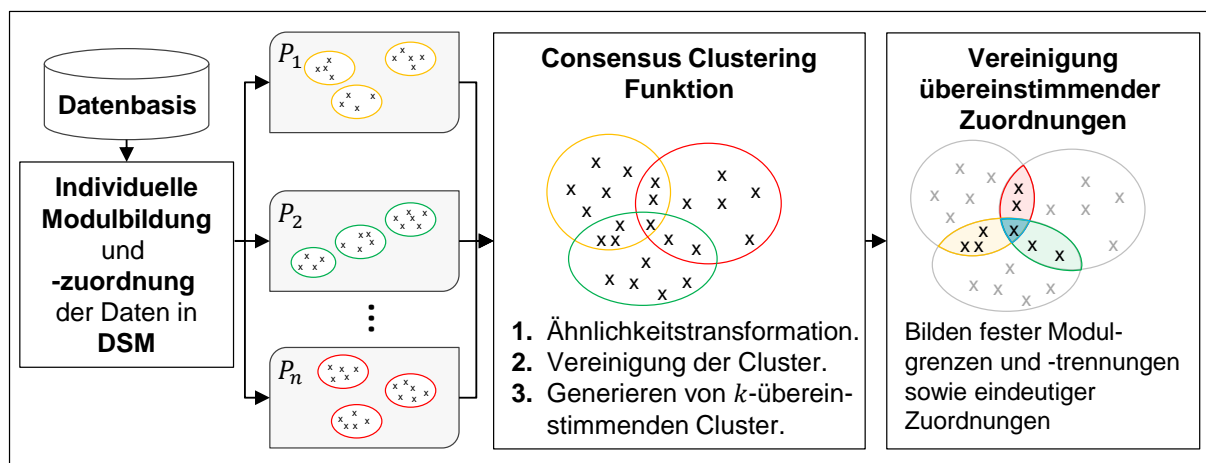


Abbildung 4-21: Schematische Darstellung des Consensus Clustering in Anlehnung an [171]. Die Methode des "Consensus Clustering" (vgl. Abbildung 4-21) verbindet überschneidende Modulzuordnungen und Verknüpfungen in einer aggregierten Form, um einen durchgängigen Konsens aus allen Anforderungen zu bilden und Übereinstimmungen wie auch Abweichungen festzustellen [172]. Damit können ähnliche Module, Gruppierungsmuster und Interdependenzen zusammengefasst, während Ausreißer und widersprüchliche Zuordnungen isoliert werden. Es entsteht somit ein Abgleich der wechselseitigen Abhängigkeiten wie auch bei gegensätzlichen Anforderungen an die Auslegung von Karosseriekomponenten. Die eindeutige Zuordnung der Datenpunkte und Partitionen in vollständig abgestimmte Modulgruppen kann dabei über die Assoziationsfunktionen als multivariate Matrixanalyse durchgeführt werden [85, 172, 173].

Im ersten Schritt zur Entwicklung aggregierter und abgestimmter Modulgruppen erfolgt die Zusammenfassung der Anforderungen und Modulbildungen in einer Datenbasis. Die Abhängigkeiten und Partitionen werden hierzu in einer gemeinsamen Assoziationsmatrix (U) für alle definierten Cluster C_k vereint. Damit entsteht eine Kombination mehrerer unterschiedlicher Partitionen und Cluster in einer Darstellung (vgl. Abbildung 4-22). Auf Grundlage der resultierenden Konnektivitätsmatrix können im nächsten

Schritt dichte- und distanzbasierte Verfahren genutzt werden, um die Abstände der vereinten Datenpunkte zu bestimmen und mögliche Überschneidungen der Modulordnung quantifizierbar darzustellen. Findet die Zuordnung von zwei oder mehreren gleichen Elementen aus unterschiedlichen Anforderungen in ein übereinstimmendes Cluster statt, wird der Abstand der Datenpunkte mit $U_{ij} = 1$ oder bei abweichenden Merkmalen mit $U_{ij} = 0$ beschrieben [174].

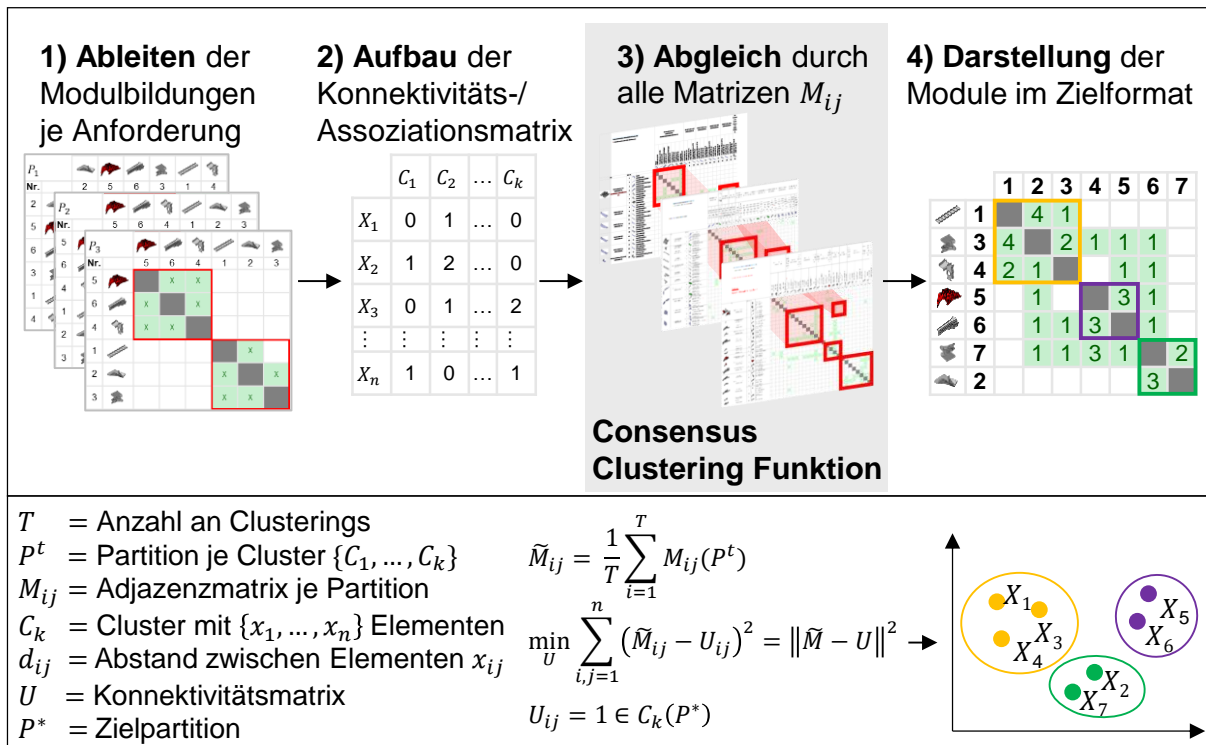


Abbildung 4-22: Schrittweise schematisches Vorgehen zur Entwicklung aggregierter DSM in Anlehnung an [173, 174]

Nahe Datenpunkte (Elemente x_n), wiederholende Partitionen (P^t) sowie ähnliche Clusterzuordnungen mit $C_k = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, werden auf mehrfache Überschneidungen geprüft und nach relativer Häufigkeit quantifizierbar in einer abgestimmten Lösungsmenge zusammengefasst [175]. Insbesondere dichte- und distanzbasierte Verfahren ermöglichen somit einen nachvollziehbaren Abgleich der Elemente i, j in die anforderungsabhängigen Cluster und Modulgruppen. Durch die Ableitung quantifizierbarer Abhängigkeiten sowie die eindeutige Zuordnung von strukturierten Modulgrenzen bzw. -trennungen entsteht weiterhin eine erhöhte Sensitivität gegenüber nachträglich ergänzten und abgeänderten Interdependenzen. Beispielsweise kann bereits eine zusätzliche, wechselseitige Abhängigkeit und Verbindung zwischen den Elementen "ZB REB VO LI" und "Verstärkung MI" in P_2 (vgl. Abbildung 4-23) die abgestimmte Modul-

zuordnung in Szenario A entscheidend beeinflussen, sodass eine abweichende Anordnung und Anzahl an Modulen entsteht (Szenario B). Die Relevanz und Qualität der Ergebnisse der Clusteranalyse sind somit abhängig von der Gesamtanzahl der untersuchten Anforderungen und insbesondere von der Wiederholhäufigkeit der jeweiligen Modulzuordnungen.

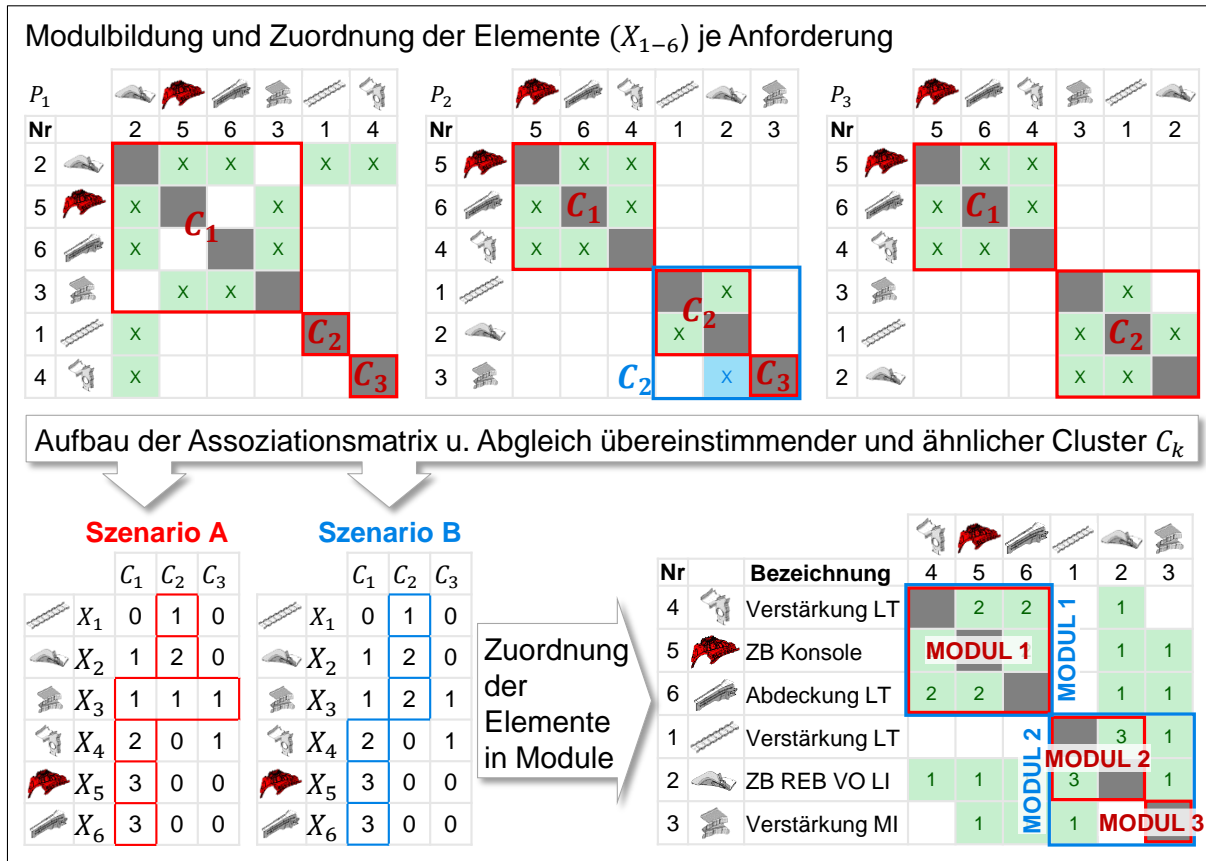


Abbildung 4-23: Beispiel zur Aggregation unterschiedlicher DSM und Szenarien in einem System über das Consensus Clustering

Daher eignet sich das "Consensus Clustering" insbesondere für den Abgleich und die Abstimmung neuer und bislang unstrukturierter Anforderungen ohne Erfahrungswerte. Module und Einzelemente können dadurch zunächst auf den Grad an Einflusswirkung und damit auf die Änderungssensitivität gegenüber einzelnen Anforderungen untersucht werden. Auch die Beurteilung gegensätzlicher Zielgrößen kann über die Aggregation der resultierenden Module des "Consensus Clustering" erfolgen. Durch das gezielte Ergänzen sowie die Modifikation von Anforderungen entwickeln sich damit alternative Modulgruppen sowie ein strukturierter Prozess zur Einordnung der Ergebnisse und zur Bewertung der resultierenden Modulkombinationen.

4.4.5 Gewichtete und aggregierte Clusteranalyse

Um einen nachvollziehbaren Konsens aus allen Teillösungen durch das "Consensus Clustering" zu generieren, werden im Prozess zum Abgleich der Anforderungen die Modulzuordnungen durch Gewichtungsfaktoren erweitert [119]. Durch diese Bewertungsgrößen können unterschiedlich priorisierte Anforderungen und Gruppierungen von Modulen durch messbare Kennzahlensysteme konkretisiert werden.

Die Methode der aggregierten Clusteranalyse durch gewichtete Einflussgrößen ("Weighted Consensus Clustering") berücksichtigt beispielsweise die in Kapitel 4.4.2 ermittelten Gewichtungen und abgeleiteten Priorisierungen. Die Gewichtung lässt somit einen Vergleich der Module zu, sodass durch eine Priorisierung bei gegensätzlichen Modulen eine eindeutige und quantifizierbare Entscheidung zur Moduleinteilung erfolgen kann. Mit der Konnektivitätsmatrix wird das arithmetische Mittel der Datenpunkte je Partition durch anforderungsindividuelle Gewichtungen w_i ersetzt und erweitert. Zudem wirkt die Gewichtung nicht nur auf die Einzelelemente und Komponenten, sondern auch auf die Partitionen und auf die Einteilung der Elemente in Module selbst. Entlang der gebildeten k -Cluster durch den k -Means-Algorithmus entstehen folglich angepasste und gewichtete Anordnungen der Elemente in Cluster über den Einbezug des individuellen Gewichtungsfaktors w_i je Anforderung.

Durch die vollständige Aufbereitung der neu strukturierten Clustering-Ergebnisse lassen sich änderungsstabile Modulentscheidungen sowie umsetzungsnahe Modulzuordnungen höherer Qualität und Akzeptanz ableiten. Beispielsweise können karosserieformabhängige Restriktionen und bereits festgelegte Module, wie Hauptboden-Versteifungen innerhalb der Cabrio-Variante, als Leit- bzw. Primärmodule mit stärkerer Gewichtung (P_3 in Abbildung 4-24) in den Prozess zum Abgleich unterschiedlicher Modulbildungen integriert werden. Die daraus resultierende Zielpartition (P_{WCC}) beinhaltet und berücksichtigt den individuell gewichteten Einfluss je Anforderung. Damit ist es möglich, modulübergreifende Verknüpfungen, Abhängigkeiten und Knotenpunkte in einer Struktur zu vereinen und durch die Darstellung als Hypergraphen übersichtlich und vollständig aufzubereiten (vgl. Abbildung 4-24). So können die definierten Produkt- oder Produktionsmerkmale der Module und Modulgruppen gezielt und individuell angepasst und in den weiteren Prozess zum Abgleich der Module integriert werden.

Durch die Isolation der umgebenen Störgrößen sowie den unabhängigen Abgleich der Anforderungen über Bewertungsgrößen weist die Methode der gewichteten Clusteranalyse eine Robustheit gegenüber externen Einflüssen und Abweichungen wie Übertragungs- oder Datenbankfehlern auf [176, 177]. Weiterhin wird eine erzwungene und nicht zielführende Zusammenführung gegensätzlicher Modulzusammensetzungen und Verknüpfungen vermieden.

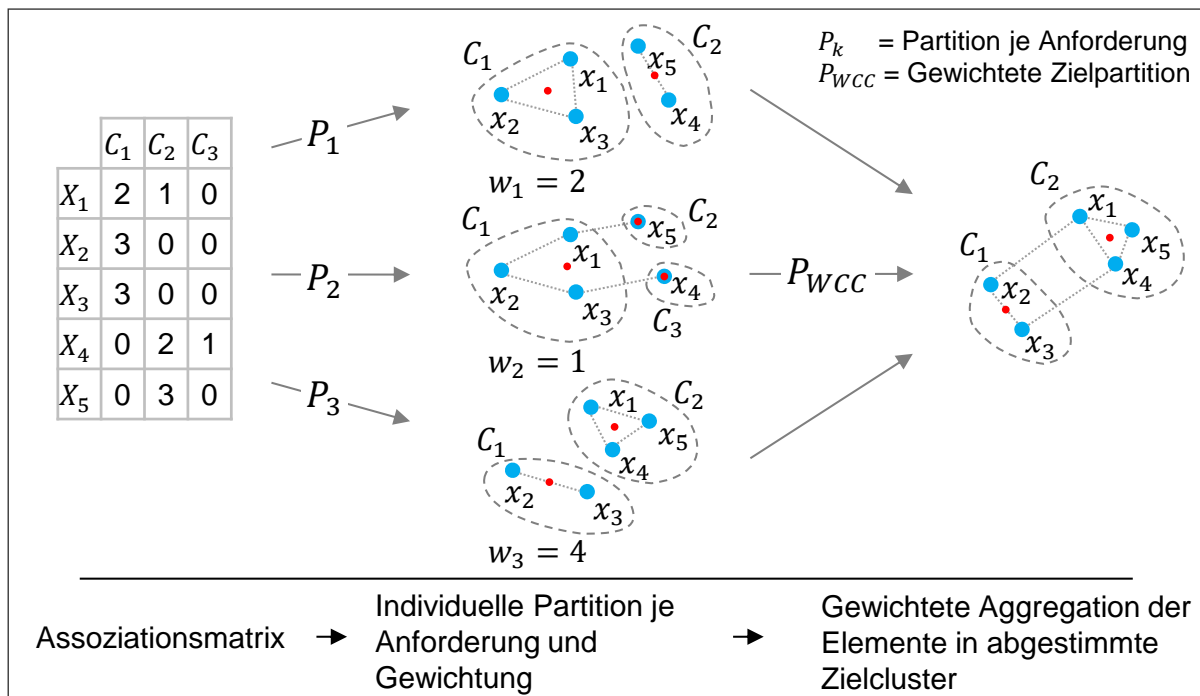


Abbildung 4-24: Beispiel zur grafischen Zusammenfassung gewichteter Partitionen durch die gewichtete Clusteranalyse zu einem strukturierten Hypergraphen

Durch den Einbezug gewichteter Bewertungsgrößen können weiterhin differenzierte Auswertungen mit unterschiedlichen Anforderungen und Einflusswirkungen entwickelt und auf übereinstimmende Merkmale angepasst werden. Mit steigender Divergenz zur Gewichtung je Cluster wächst ebenfalls die Eindeutigkeit und Präzision der finalen Modulzuordnungen [174]. Unterschiedliche Gewichtungen bestimmen daher über die bestehenden Anforderungen hinweg Schwerpunktmodule sowie produkt- und produktionsbedingte Anpassungen [178]. Insbesondere für nicht eindeutige Abhängigkeiten eignet sich der gewichtete Abgleich überschneidender Module über die Matrixform.

Am Beispiel des Strukturaufbaus "ZB Längsträger Li" werden im Folgenden drei unterschiedliche Anforderungen und damit ebenfalls drei individuelle Partitionen dargestellt und durch die gewichtete Clusteranalyse abgeglichen (vgl. Abbildung 4-25). Für die Unterkomponenten (X_n) werden über die individuellen Partitionen je Anforderung überschneidende wie auch gegensätzliche Partitionen gebildet. Jede Partition (P_1 - P_3) stellt

damit eine mögliche Modulbildung mit Bezug auf eine Anforderung dar. Durch die farbliche Unterscheidung der resultierenden Partitionen (Rot, Grün, Blau), werden die Unterschiedlichen Modulzuordnungen nochmals verdeutlicht. Der Anteil an nicht eindeutig zugeordneten Einzelteilen reduziert sich somit unter der Einbeziehung von Gewichtungen. Dadurch werden über den angepassten Clustering-Algorithmus drei Modulzuordnungen für die Elemente X_1 - X_{10} (vgl. Abbildung 4-25) entwickelt.

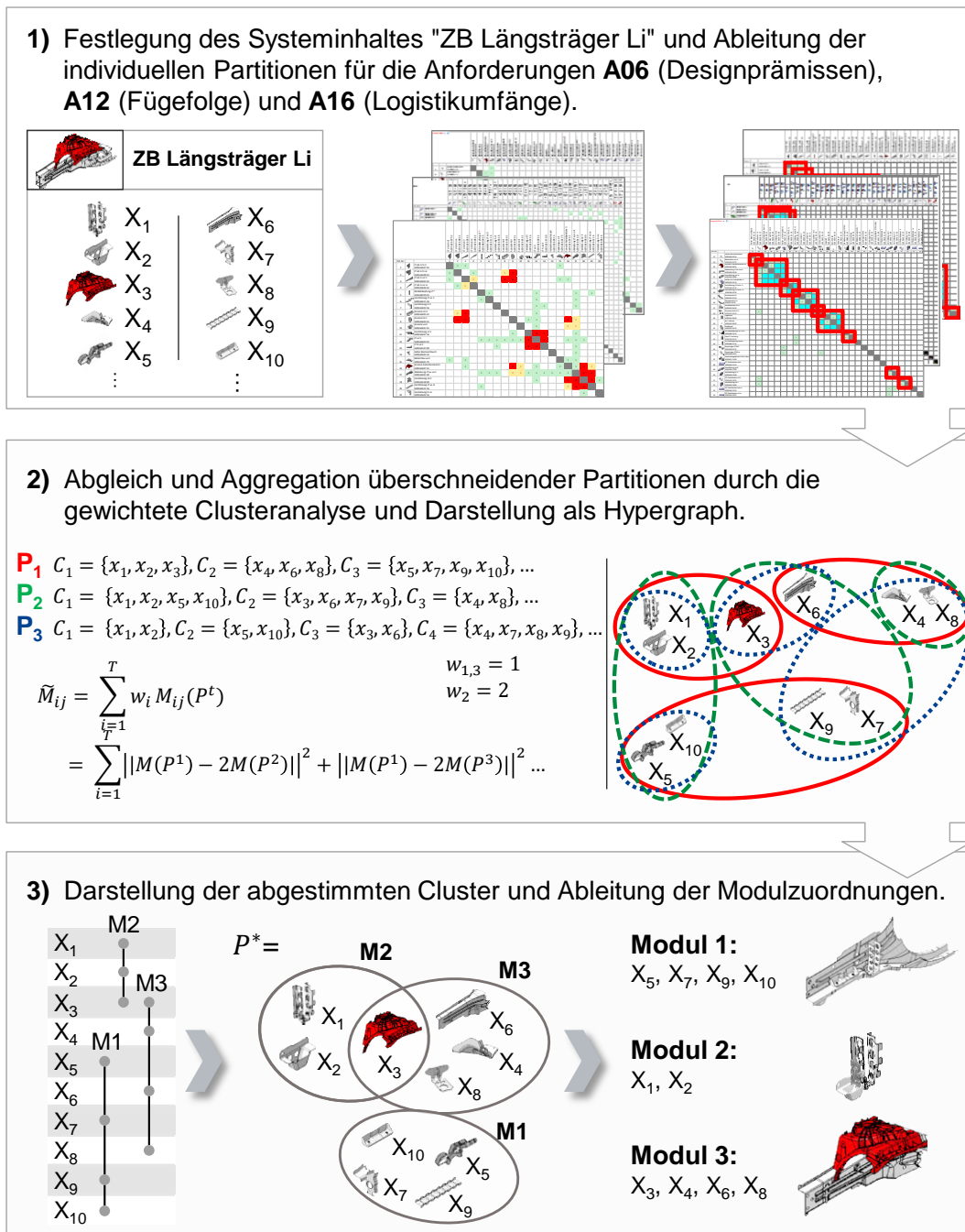


Abbildung 4-25: Beispiel zum Abgleich gewichteter Anforderungen im "ZB Längsträger Li" Darüber hinaus ermöglicht das Zielformat der DSM eine kontinuierliche und nachvollziehbare Auswertung durch teilautomatisierte Algorithmen unter Beibehaltung sowie

Berücksichtigung der anforderungsindividuellen Priorisierungen und Handlungsschwerpunkte. Der gewichtete Abgleich und die Clusteranalyse stellen somit ein geeignetes Verfahren zur Abstimmung unterschiedlicher Anforderungen dar. Insbesondere in Bezug auf die Übertragbarkeit der Methode auf weitere Karosseriekomponenten und Module der Karosseriestruktur. Durch den Clustering-Algorithmus und die standardisierten Bewertungsgrößen entstehen somit eindeutige, nachvollziehbare und quantitativ abgesicherte Modulentscheidungen. Der entwickelte Konsens bildet daher durch die Gewichtung und den Abgleich der Anforderungen eine zielgrößenorientierte Zuordnung der Elemente in Module mit einer reduzierten Gesamtkomplexität. Damit entsteht unter Berücksichtigung der individuellen Zielgrößen eine an die fokussierten Anforderungen angepasste Lösungsmenge zur Bewertung von Produkt- und Produktionsszenarien.

Für das Beispiel der Längsträgerstruktur in Abbildung 4-25 konnten somit die Anforderungen zur Einhaltung der Designprämissen (konstruktiv am Produkt), die Anordnung der Produktionsanlagen entlang der Werksfügefolge (Produktion) sowie die Einbindung der zugelieferten Teile und Logistikumfänge (unterstützende Prozesse) aufeinander abgestimmt werden. Damit kann beispielsweise der Konstrukteur bzw. verantwortliche Entwickler die Sichtweisen der Produktion und unterstützenden Prozesse übernehmen, konstruktive Änderungen durch die Modulzuordnung begründet nachvollziehen und mehrere Anforderungen teilweise oder auch vollständig umsetzen. Insbesondere durch die Ergänzung von Gewichtungen und Priorisierungen können nicht eindeutige und gegensätzliche Anforderungen aufgelöst und komplett einem Modul zugeordnet werden.

4.4.6 Komparative Bewertung und Anforderungsabgleich

Um über die konstruktiven Merkmale hinaus die Umsetzungsfähigkeit der Lösungsmenge anhand des Erfüllungsgrads der gesetzten Anforderungen zu bewerten, ist eine komparative Analyse notwendig. Das Ziel der komparativen Bewertung ist es hier, durch einen Abgleich der individuellen Modulableitungen unterschiedliche Anforderungskombinationen, Szenarien, Gewichtungen sowie eine nachvollziehbare Bewertungsmöglichkeit zu entwickeln. Dabei sind auch Modulzuordnungen infolge intermodularer Interdependenzen entsprechend der Anforderungserfüllung zu bewerten und auf Zielgrößen-Konformität zu prüfen.

Teile der Produkt- und Produktionskomplexität werden durch das multimethodische Verfahren nicht vollständig reduziert, sondern durch die Modulzusammenfassung komplementärer Funktionen in vor- und nachgelagerte Fertigungsabschnitte übertragen. Beispielsweise werden durch eine logistikgerechte Trennung flächenintensiver Karosseriekomponenten, wie der Hauptbodenstruktur, zunächst besser handhabbare Logistikmodule mit einer geringeren Komplexität gebildet. Um das Optimierungspotenzial gegenüber der kritischen Produkt- und Produktionsparameter messbar darzustellen, werden die individuellen Modulbildungen mit der abgestimmten und abgeglichenen Gesamtlösungsmenge auf Übereinstimmungen untersucht, geprüft und angepasst. Durch die Darstellung und den Aufbau unterschiedlicher Szenarien mit variierenden Gewichtungen und alternativen Modulzusammensetzungen erfolgt die Bewertung durch festgelegte Kenngrößen wie z. B. durch den Anteil an überschneidenden Modulzuordnungen. Die in Abbildung 4-26 dargestellten Szenarien unterscheiden sich somit in der Anordnung und durch die Konfiguration der Module unter Berücksichtigung der Anforderungen sowie individuellen Gewichtungen für "A00" bis "A05".

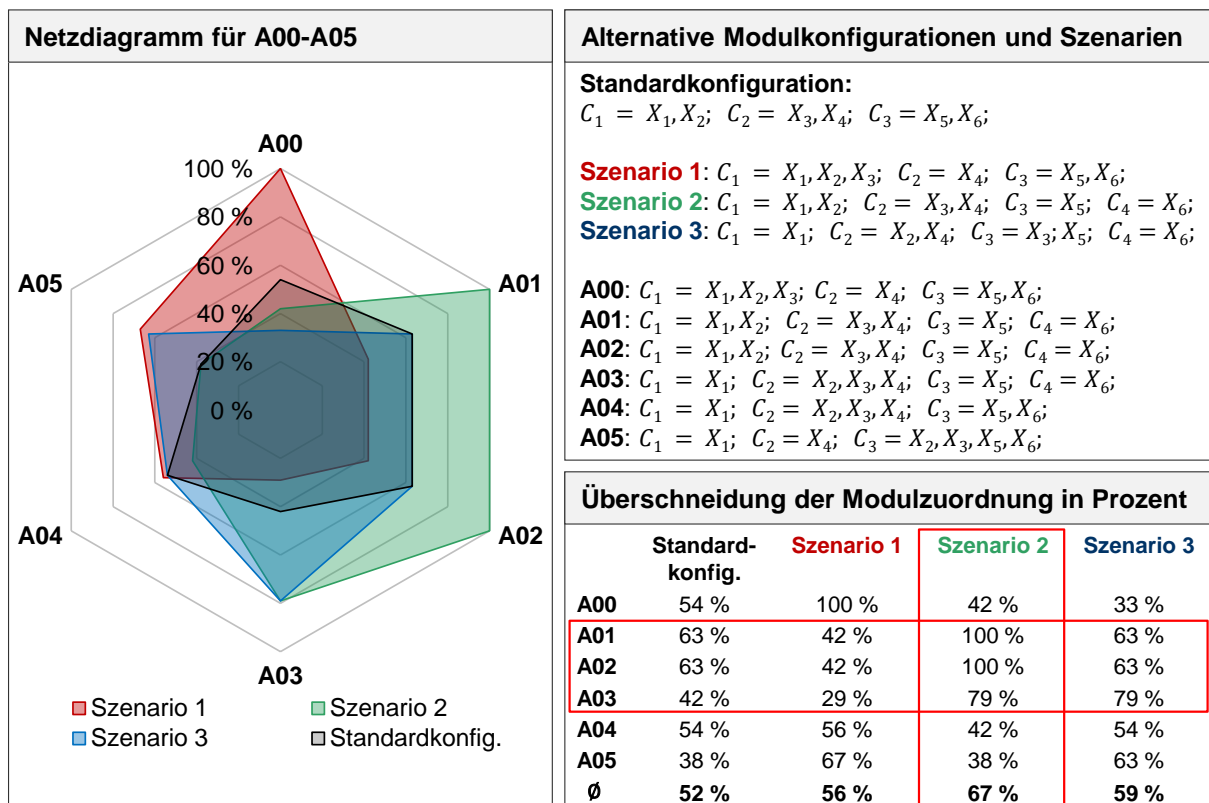


Abbildung 4-26: Beispiel zur Auswertung und Darstellung des Übereinstimmungsgrads für die Standardkonfiguration und Szenario 1-3

Während beispielsweise Szenario 1 die Elemente X_1 , X_2 und X_3 dem Modul C_1 zuordnet, wird das Element X_3 in Szenario 2 mit X_4 im Modul C_2 zusammengefasst. Die

daraus entstandenen Anordnungen der Module und deren Anzahl werden dann über die Szenarien auf den einzelnen und gesamten Erfüllungsgrad der gesetzten Anforderungen geprüft. Die Auswertung und Beurteilung über den Grad an Übereinstimmung kann dabei übersichtlich durch ein Netzdiagramm visualisiert werden. Mögliche Indizes und Kennzahlen zur Darstellung der Komplexität und des Vergleichs der Szenarien können neben der Anzahl an gebildeten Modulen ebenfalls die überschneidende Menge gleicher Zuordnungen der Komponenten in Module sein.

Wie in Abbildung 4-26 dargestellt, berücksichtigt die entwickelte Modulanordnung in "Szenario 2" gegenüber der Standardkonfiguration mehrere Anforderungen. Lediglich die Anforderungen "A00" und "A05" sind durch eine geringfügig reduzierte Überschneidung auf gegenläufige und erfolgskritische Auswirkungen hin zu prüfen. Neben dem Übereinstimmungs- und Erfüllungsgrad der Modulbildungen zu den gesetzten Anforderungen (z. B. A00-A05 in Abbildung 4-26) können ebenfalls wirtschaftliche und produktionskapazitative Teilaspekte sowie weitere Bewertungsgrößen genutzt werden. Dabei lassen sich qualitative Aussagen unter der Berücksichtigung von erfolgskritischen Anforderungen wie Stückkosten oder die maximale Anzahl an Fügepunkte als eindeutige Kennzahl übersichtlich und bewertbar darstellen (vgl. Tabelle 4-7).

Tabelle 4-7: Beispiel zum komparativen Vergleich der Transport- und Fügekosten zwischen drei Szenarien

	Umsetzungsgrad in %		Kosten		
	A00 (Konzept- übernahme ähnlicher Modul- gruppen)	A06 (Einheitlicher Einsatz der Verbindungs- technik)	Kosten Transport- logistik je technischer Einheit (TE) (Ladungsträger, Versand und Handling)	Kosten Fügeäqui- valente (FÄQ) und Fügepunktanzahl (FÜP) (Art und Anzahl an Verbindungs- technik)	Gesamt- kosten bei 500.000 Fahrzeugen
Stan- dard- konfig.	63 %	42 %	11,64 €/TE	0,0083 € FÄQ 470 FÜP	7.770.500 €
Szenario 1	42 %	29 %	13,43 €/TE	0,0104 € FÄQ 430 FÜP	8.951.000 € (+1.180.500 €)
Szenario 2	100 %	79 %	8,50 €/TE	0,0061 € FÄQ 540 FÜP	5.897.000 € (-1.873.500 €)
Szenario 3	63 %	79 %	11,64 €/TE	0,0061 € FÄQ 520 FÜP	7.406.000 € (-364.500 €)

So konnte beispielsweise durch den erhöhten Umsetzungsgrad der Anforderung A00 in Szenario 2 der Anteil bereits vorhandener Logistik-Ladungsträger erhöht werden. Damit ist es möglich, die Kosten für die Transportlogistik je technischer Einheit (Anzahl Module pro Ladungsträger) durch die Wiederverwendbarkeit der Ladungsträger zu reduzieren. Nicht nur die Fügekosten der Verbindungstechnik je Fügepunkt verringern sich durch die Einhaltung der definierten Produktionsanlagenkapazitäten, sondern damit auch die Beschaffungskosten von zugelieferten Baugruppen (vgl. Tabelle 4-7).

Somit können Modulzusammensetzungen einzelner und quantifizierbarer Anforderungen wie beispielsweise die Transport- und Fertigungskosten geprüft, in einer kostenkomparativen Darstellung dargestellt und abgestimmt werden. Die tatsächliche Verbesserung der Zielgrößen (z. B. Fertigungsgesamtkosten) sowie die Bewertung der abgeleiteten anforderungsgerechten Moduleinteilungen findet damit über einen Abgleich der Anforderungen und Lösungsmengen statt (vgl. Tabelle 4-7).

4.5 Darstellung des multimethodischen Verfahrens

Über die vier übergreifenden Methodenbausteine des multimethodischen Verfahrens konnte durch die Verknüpfung klassischer Planungsmethoden mit neuen IT-gestützten Ansätzen ein iterativer Lösungsprozess für das definierte Problemumfeld kreiert werden. Dazu wurde das Konzept aus Kapitel 3 über ergänzende Methoden schrittweise in Kapitel 4 detailliert, um wie nachfolgend in Abbildung 4-27 abgebildet, das multimethodische Verfahren zu generieren.

In Bezug auf das Problemumfeld der Karosseriestruktur entsteht somit über die Anforderungserfassung und -analyse, die einheitliche Modellierung der Wirkungsabhängigkeiten, die Wissensgenerierung durch deskriptive Analysen sowie durch den Abgleich ein multimethodisches Verfahren, um so auf anforderungsgerechte Module und Handlungsempfehlungen schließen zu können. Zusammenfassend lassen sich somit über die vier Methodenbausteine der **Anforderungserfassung und -analyse**, der **einheitlichen Modellierung**, der **Wissensgenerierung durch deskriptive Analysen** sowie die abschließende **Modulbildung und dem Abgleich** die Produkt- und Produktionsmodule zielgerechter und in Bezug auf gesetzte Anforderungen fokussierter umsetzen.

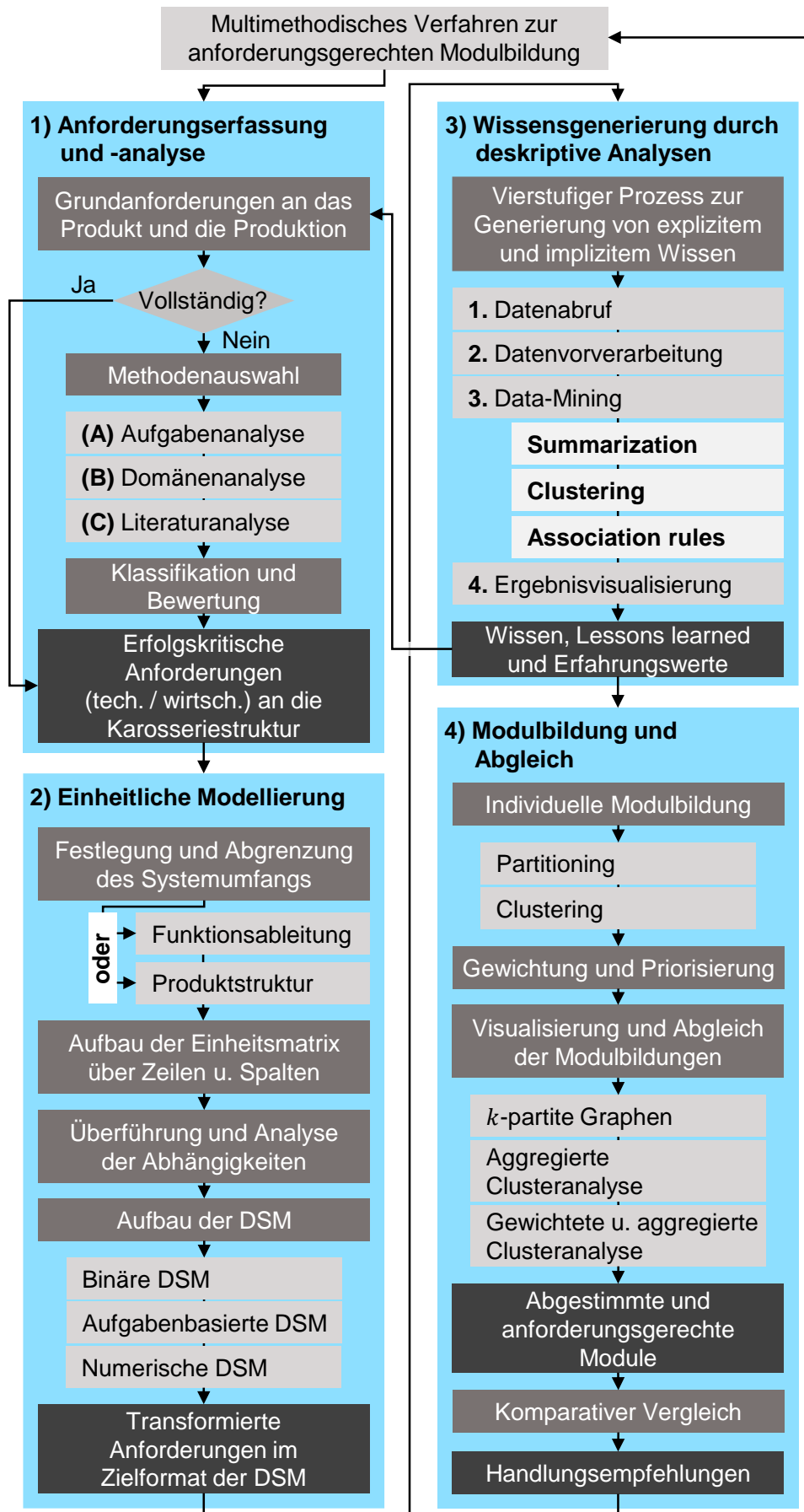


Abbildung 4-27: Zusammenfassende Darstellung des entwickelten multimethodischen Verfahrens

5 Validierung des multimethodischen Verfahrens

Die Validierung des multimethodischen Verfahrens zur anforderungsgerechten Bildung und der Abgleich von Modulen erfolgte anhand eines repräsentativen Beispiels einer batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugarchitektur. Für die Validierung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten multimethodischen Vorgehens wurde eine alternative Modulstruktur entwickelt, um bereits in den frühen Entwicklungs- und Planungsphasen einen höheren Umsetzungs- und Erfüllungsgrad der identifizierten Anforderungen zu erreichen. Darüber hinaus konnte eine Einteilung in produktabhängige und produktunabhängige Module ermöglicht werden, um die Produktstruktur auf Standardisierungspotenziale und Individualisierungseignungen zu prüfen. Die Darstellung der qualitativen und quantitativen Validierungsergebnisse schließt das Kapitel ab.

5.1 Rahmenbedingungen und Prämissen

Die Anwendung des entwickelten multimethodischen Verfahrens wurde an einem vorliegenden Planungsfall bei einem Automobilhersteller für die batterieelektrische Kompaktklasse im C-Segment durchgeführt. Auf Grundlage der Steilheck-Limousine als konzeptbestimmende Grundplattform der Fahrzeugarchitektur (vgl. Abbildung 1-5) wurde eine alternative Modulaufteilung und -zuordnung entwickelt und untersucht. Mithilfe eines wahlweisen Produktionsszenarios für ein neues Produkt wurde daher untersucht, ob eine an die definierten Anforderungen angepasste Anordnung der Karosseriekomponenten und damit eine höhere Wiederverwendbarkeit von Komponenten zwischen den Hauptmodulen realisierbar ist. Das Ziel dieser Untersuchung ist es somit, einen höheren Erfüllungsgrad der identifizierten Anforderungen zu ermöglichen und damit nachvollziehbare Handlungsempfehlungen für eine zukünftige vollelektrische Fahrzeugarchitektur ableiten zu können.

Die genutzten Entwicklungs- und Planungsdaten stellen daher einen realen Planungsfall in der Automobilindustrie dar. Der Entwicklungs- und Planungsstand der Fahrzeugarchitektur und die vorliegenden Realdaten entsprechen einem konzeptreifen und digital abgesicherten Gesamtfahrzeug. Mit den Daten aus den abgeschlossenen Meilensteinen, Freigabedokumenten und QG konnte überprüft und nachvollzogen werden, welche Anpassungen an der Produktstruktur vorzunehmen wären und welche Vorteile sich durch das Alternativ-Szenario zur Ist-Situation ergeben würden.

Da die Vorgängerbaureihe und deren Derivate ausschließlich als Verbrenner geführt wurden, ließ sich eine vereinfachte Übertragung der bestehenden Karosseriekomponenten und Grundanforderungen ausschließen. Für die Anwendung und Validierung des entwickelten multimethodischen Verfahrens lag folglich eine vollständige Neuentwicklung und ein neuartiger Planungsfall mit unbekanntenen Anforderungen an die Karosserie und den Karosseriebau vor.

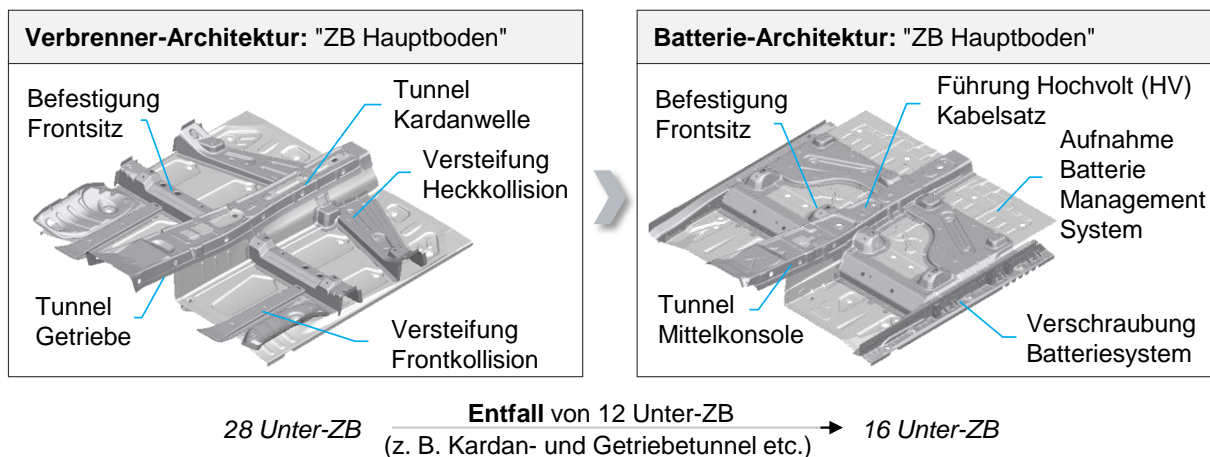


Abbildung 5-1: Beispiel zur Anforderungs- und Funktionsverteilung sowie konstruktiven Änderung der Hauptbodenstruktur in der Verbrenner- und Batterie-Architektur

Um das Verfahren mit besonderem Fokus auf die Übertragbarkeit und Anwendung in komplexen Systemen zu untersuchen, wurde das System "ZB Hauptboden" ausgewählt. Neben den bestehenden Grundanforderungen an die Hauptbodenstruktur (z. B. Biege- und Torsionssteifigkeiten, einheitlicher Einsatz von Verbindungstechniken etc.) entstehen durch die Integration der Fahrzeugbatterie als Energieträger im Hauptboden sowohl technische als auch wirtschaftliche Anforderungen.

Durch ergänzende Verschraubungspunkte und Trägerstrukturen zur Aufnahme des Batteriesystems werden weitere Hochvolt (HV)-Komponenten, wie Kabelsätze oder Batterie-Management-Systeme in den Hauptboden integriert (vgl. Abbildung 5-1). Auch müssen in der vollelektrischen Hauptbodenstruktur durch den Entfall von 12 Unter-ZB und die Reduktion von spezifischen Einzelteilen der Verbrenner-Architektur verstärkt technische Grundanforderungen und Funktionen durch weniger Komponenten erfüllt werden. Anhand des multimethodischen Verfahrens lassen sich somit wiederverwendbare, austauschbare und funktionsgleiche Hauptmodule für die Anpassung auf weitere Karosseriederivate sowie werks-, markt- und länderspezifischen Anforderungen definieren.

Für die Validierung wurden durch die Entwicklungs- und Planungsbereiche folgende Rahmenbedingungen zur Batterie-Architektur festgelegt:

- Einhaltung der standardisierten Fügefolgen
- Einhaltung der konstruktiven und geometrischen Außenkonturen
- Bündelung materialabhängiger Verbindungstechniken
- Verringerung der Zeitspreizungen in Fügeoperationen bei Karosseriederivaten
- Planungssichere Verbindungstechniken (Anzahl und Verfahren)
- Reduktion der Sonderladungsträger (SLT) auf Universalladungsträger (ULT).

5.2 Anwendung des multimethodischen Verfahrens

Zu Beginn der Nutzung des multimethodischen Verfahrens erfolgte zunächst die **Anforderungserfassung und -analyse (vgl. Kapitel 4.1)**. Für die Untersuchung und Auswahl der Anforderungen aus den bestehenden Prämissen und Rahmenbedingungen wurde die Aufgaben- (**A**) und Domänenanalyse (**B**) aus Kapitel 4.1.1 durchgeführt. Dazu wurden sechs erfolgskritische Anforderungen an die batterieelektrische Karosseriebodenstruktur ermittelt, angepasst und nach Einfluss auf die **Teilaspekte der Komplexität (vgl. Kapitel 4.1.3)** klassifiziert. Die Festlegung wurde dabei auf Basis der ermittelten Grundanforderungen (vgl. Anhang A1) in mehreren Workshops und Gruppenarbeiten durch die Entwicklungs- und Planungsexperten durchgeführt.

Insbesondere für den vorliegenden Planungsfall einer neuen (batterieelektrischen) Baureihe sind die Anforderungen der Integrationsfähigkeit somit die Beibehaltung der Fügefolge (A12), der Einsatz einheitlicher Fügetechnik (A06) und Materialien (A01) sowie die Integration in das vorhandene Logistik- und Ladungsträgerkonzept (A18) relevant. Weiterhin besteht ebenfalls der Bedarf zur Einhaltung der geometrischen Abhängigkeiten (A03) sowie einer nachvollziehbaren Aufbereitung der Änderungszyklen im Entwicklungs- und Planungsprozess (A32). Die ausgewählten Anforderungen (vgl. Tabelle 5-1) stellen darüber hinaus auch den frühen Planungsstand innerhalb des FEP dar, sodass zusätzliche Anforderungen erst im weiteren Verlauf der Produkt-, Prozess- und Ressourcenplanung relevant werden.

Tabelle 5-1: Identifizierte Anforderungen an die batterieelektrische Karosseriebodenstruktur

Nr.	Anforderung	Beschreibung, Kennzahlen und Zielgrößen
A01	Vereinheitlichung der Materialeigenschaften	Vereinheitlichung der Blecheigenschaften in: <ul style="list-style-type: none"> - Gewicht in kg - Oberfläche in m² - Blechdicke in mm - Material (Festigkeitsrelevante Metallmatrix, Fügeigenschaften, magnetische Abschirmung etc.)
A03	Geometrische Umsetzung der Maßkonzeption	Einhaltung der geometrischen Abhängigkeit durch: <ul style="list-style-type: none"> - Referenzpunkte (Eindeutige Koordinaten) - Basismaße (x-, y-, z-Richtung) - Package-Plan und verfügbarer Bauraum - Verknüpfte Außenkonturen
A06	Einheitlicher Einsatz der Verbindungstechnik	Einhaltung der gesetzten Kenngrößen zur Verbindungstechnik: <ul style="list-style-type: none"> - Fügeverfahren - Sicherheitszonen und Ausschleusungsmöglichkeiten bei Zelldefekt - Fügeäquivalenz (Einheitliches Verhältnis der mechanischen Festigkeit des Fügeverfahrens zur Kosteneinheit) - Fügeparameter (Anpressdruck, Länge, Wärmeeinfluss etc.) - Anzahl Fügepunkte und -länge
A12	Anordnung nach der werks- und baureihen-spezifischen Fügefolge	Einhaltung der Fertigungsreihenfolge u. Aufbaustufen: <ul style="list-style-type: none"> - Baureihen- und werkspezifische Aufbaufolge - Traglast der Dreh- und Schwenksysteme für Batteriemodule - Anordnung Geometriestufen und Ausschweißstationen - Anzahl und Kapazität je Anlage (Basis: Ecktyp-Fahrzeug)
A18	Durchgängiges Logistik- und Ladungsträger-konzept	Durchgängig umgesetzte Anlieferungs-, Intra- u. Versandlogistik: <ul style="list-style-type: none"> - Ladungsträgerverteilung - Lieferantenposition und geografische Anbindung - Bandversorgung und Linienanstellung - Anteil an LKW-Teilladungen (Full- / Less-Than-Full-Truckload)
A32	Nachvollziehbare Änderungszyklen der Kontur, Dimensionen und Gewicht	Nachverfolgung konstruktiver u. designrelevanter Änderungen: <ul style="list-style-type: none"> - Hauptmaße (Länge x Breite x Höhe) - Radien, Flächen, Fugen, Sicken (Class-B-Flächen) - Leergewicht und Gewicht mit Batterie - Außenkonturabhängige Verbindungen und Ausrichtung - HV-Kabelbaumängen und Position

Aufgrund der Analyse ergänzender Kennzahlen und Zielgrößen der ermittelten Anforderungen konnten gleichzeitig neue Restriktionen (z. B. erhöhte Traglasten durch Batteriemodule im Karosseriebau) und Anpassungen (z. B. Sicherheitszonen zur Ausschleusung bei Zelldefekten) der bestehenden Beschreibung der bekannten Grundanforderungen ergänzt werden. Folglich wurden auf der Grundlage von Prämissen und Rahmenbedingungen zur Fahrzeugarchitektur angepasste technische und wirtschaftliche Anforderungen ausgewählt sowie quantifizierbare Kennzahlen und Zielgrößen für eine anschließende Abhängigkeitsanalyse entwickelt.

Um das ausgewählte System des "ZB Hauptboden" in Bezug auf mögliche Abhängigkeiten und Wirkungszusammenhänge in Bezug auf die erfassten Anforderungen prüfen zu können, erfolgte zunächst die Ableitung geometrischer Modelle des Konzeptfahrzeugs in die Produktstruktur und die Überführung in eine **standardisierte Einheitsmatrix** (vgl. Kapitel 4.2.2). Dabei umfasst das vorliegende System der Hauptbodenstruktur vier Hauptmodule ($M_1 - M_4$), aufgeteilt in 16 Unter-ZB und 15 ET (vgl. Abbildung 5-2). Durch die individuelle Färbung der Komponenten im geometrischen Modell können diese in der Produktstruktur und als Elemente der DSM nachverfolgt und eindeutig zugeordnet werden.

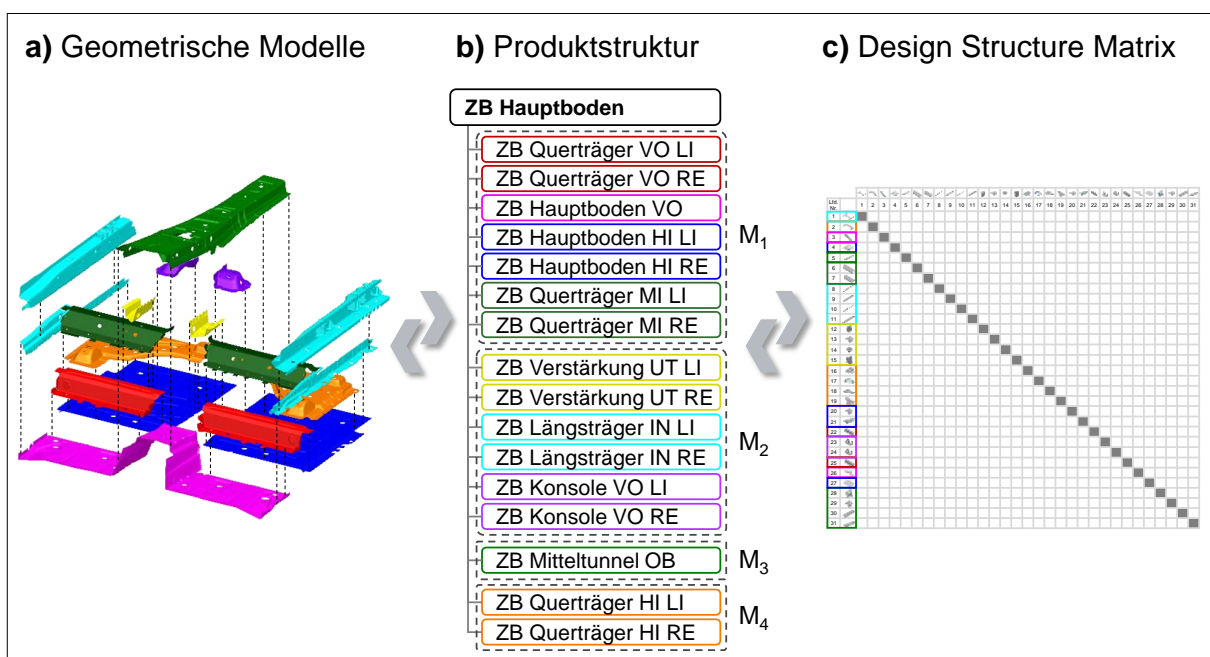


Abbildung 5-2: Auflösung des "ZB Hauptboden" in a) Geometrische Modelle, b) Produktstruktur und in die c) Design Structure Matrix

Durch das Auflösen des "ZB Hauptboden" in funktionale und physische Bestandteile wurde die Produktstruktur in relevante Unter-ZB gegliedert und entlang der Zeilen und Spalten in eine quadratische $n \times n$ -Matrix mit 31 Elementen strukturiert (vgl. c) in Abbildung 5-2). Bei der Übertragung in die DSM fand zudem keine Unterscheidung zwischen den Ebenen der Unter-ZB und ET statt, sodass alle Elemente vollständig übertragen werden konnten. Ebenfalls wurden Standardkomponenten, wie beispielsweise Konsolen, Halter und Verankerungen zusätzlich als Einzelelemente aufgeführt. Trotz geometrischer und konstruktiver Gleichartigkeit als Universalkomponenten besteht bei den Standardelementen die Notwendigkeit, Wechselwirkungen und funktionale Abhängigkeiten einzeln und getrennt voneinander abzubilden. Denn damit wird im weiteren Verlauf insbesondere die Möglichkeit geschaffen, produktunabhängige Module

eindeutig zu definieren, indem wiederkehrende Standardkomponenten aus der Karoseriestructur zusammengefasst und isoliert werden. Dadurch lässt sich zukünftig nicht nur ein höherer Detaillierungsgrad darstellen, sondern auch eine ganzheitliche Modulzuordnung unter dem vollständigen Einbezug aller ET und ZB.

Im nächsten Baustein des multimethodischen Verfahrens erfolgte die **Modellierung der Abhängigkeiten und Wirkungszusammenhänge (vgl. Kapitel 4.2.3)** auf Grundlage der gebildeten DSM. Die standardisierte Einheitsmatrix wurde dabei für jede Anforderung durch bestehende wechselseitige Wirkungsinterdependenzen und richtungsabhängige Abhängigkeiten befüllt. Mithilfe der digitalen Absicherung und der definierten Zielgrößen zur Anforderungserfassung (z. B. Fügeparameter, Materialmix etc.) konnten dafür entwicklungsseitige Bauteilanalysen genutzt werden (vgl. Abbildung 5-3). Damit ließen sich bestehende Produkt- und Prozessdaten **transformieren**, bauteilabhängige Verknüpfungen direkt in die individuellen Matrizen **übertragen** und durch weitere **Domänenanalysen** prüfen und ergänzen.

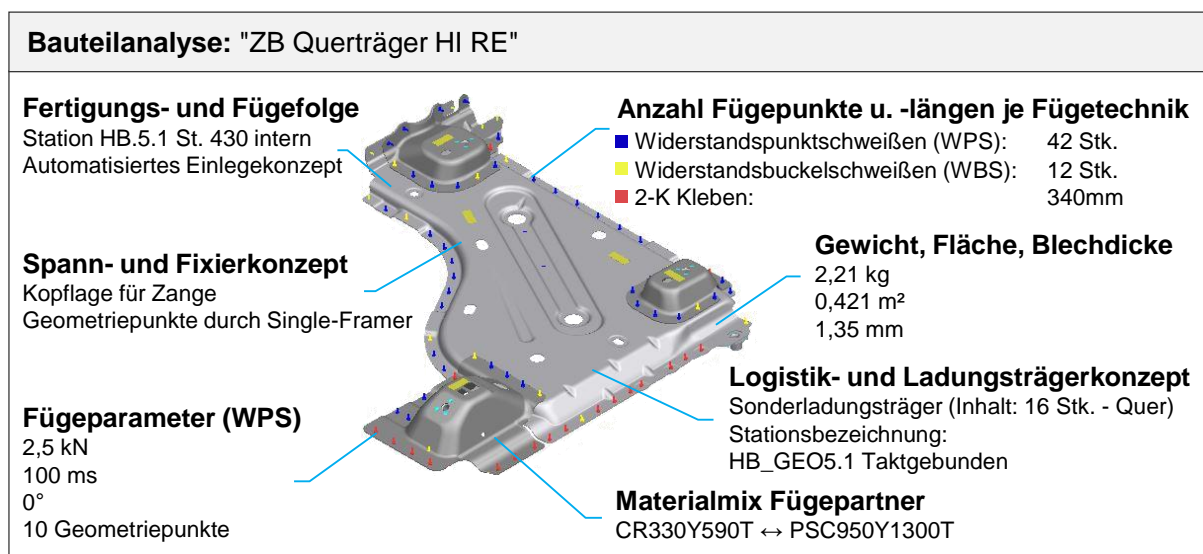


Abbildung 5-3: Bauteilanalyse des "ZB Querträger HI RE" zur Ableitung von Abhängigkeiten
Auch baugruppenspezifische Festlegungen und nicht trennbare Modulzuordnungen infolge fertigungs- oder materialbedingter Restriktionen erfolgten über schnittstellenübergreifende Workshops der Planungs- und Entwicklungsbereiche. Insbesondere durch die Übertragbarkeit bestehender oder die Ergebnisse neuer Analysen über Wirkungszusammenhänge, wie auch die nachvollziehbare Transformation bislang unstrukturierter Informationen über paarweise Abhängigkeiten, konnten die erfolgskritischen Anforderungen aus Tabelle 5-1 vollständig berücksichtigt werden (Abbildung

5-4). Dabei wurden sowohl binäre, numerische als auch aufgaben- bzw. richtungsba-
sierte Abhängigkeitsmatrizen abgeleitet. Zusätzlich erhöhte sich durch die Bearbeitung
und Befüllung der Matrizen das Verständnis der Domänenexperten über Abhängigkei-
ten und Wechselwirkungen der identifizierten Anforderungen.

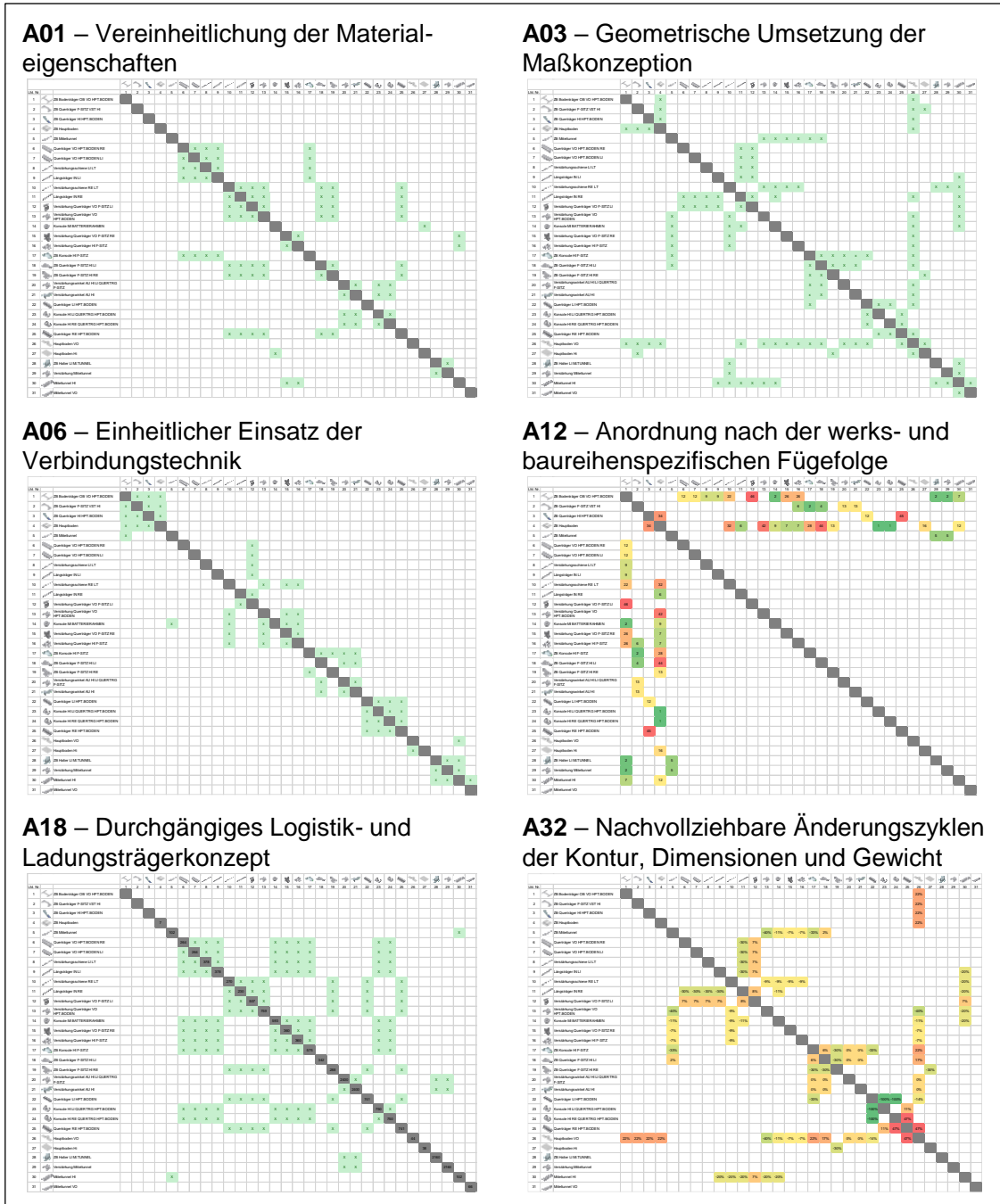


Abbildung 5-4: Ableitung der Abhängigkeiten je Anforderung in die Einheitsmatrix

Um neben der Übertragung von Abhängigkeiten aus bestehenden Datenquellen und einzelnen Domänenanalysen ebenfalls explizites und implizites Wissen als zu erfüllende Anforderung zu ergänzen, erfolgte die **Wissensgenerierung durch deskriptive Analysemethoden (vgl. Kapitel 4.3)**. Aufgrund der ausgeprägten konzeptionellen

Unterschiede grundlegender Modulgruppen (z. B. Entfall Kardanwellentunnel in Abbildung 5-1), konnten keine Daten aus den Vorgängerbaureihen genutzt werden. Deshalb wurden zu den aktuellen Freigabedaten des digitalen Konzeptfahrzeugs weitere Absicherungsmodelle und Entwurfsdaten der frühen Strategiephase herangezogen, um beispielsweise kostenintensive Modifikationen und unbekannte Wirkungszusammenhänge identifizieren und analysieren zu können. Daher bildet der bis zum Zeitpunkt der Validierung gesammelte Planungs- und Entwicklungsstand aus dem FEP die Datengrundlage zur Durchführung der deskriptiven Datenanalysen.

Über die vier Hauptprozessschritte zur Generierung von expliziten und impliziten Wissen (vgl. 4) in Abbildung 4-27) zum **Datenabruf**, zur **Datenvorverarbeitung**, **Datenanalyse (Data-Mining)** und zur **Ergebnispräsentation** bzw. **Evaluierung** der Daten (vgl. Kapitel 4.3) wurden somit die gesammelten Daten strukturiert, bereinigt und über deskriptive Verfahren analysiert. Die Visualisierung der Ergebnisse zur Analyse kritischer Änderungen und änderungsstabiler Umfänge innerhalb der Füge-technik und am Produkt selbst erfolgte anschließend durch eine Hotspotanalyse (vgl. Abbildung 5-5).

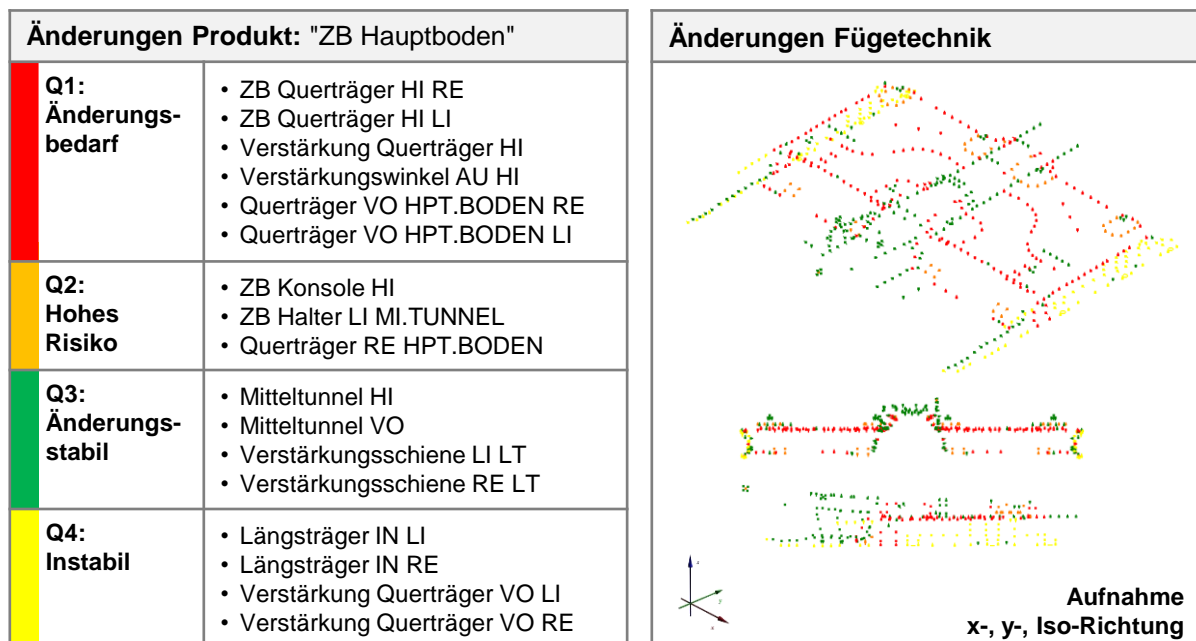


Abbildung 5-5: Änderungsverhalten der Komponenten sowie Füge-technik in Bezug auf den "ZB Hauptboden" als Ergebnis der deskriptiven Datenanalyse

Als Ergebnis der Hotspotanalyse konnten sowohl die produktseitigen ET und ZB als auch die produktionsabhängigen Fügepunkte über die Farbgebung in vier Kategorien (Q1-Q4) zur Einordnung der Änderungshäufigkeit klassifiziert werden (vgl. Kapitel 4.3.5). Während beispielsweise "rote" Fügepunkte und Produktumfänge mit Zuordnung zu Q1 hohe Änderungszyklen und schwankende Bedarfe darstellen, konnten aus

den "grün" klassifizierten Punkten und Umfängen in Q3 unmittelbare Standardisierungspotenziale durch produktunabhängige Module abgeleitet werden. Um gleichzeitig gegensätzliche Wirkungsabhängigkeiten zu den Anforderungen aus Tabelle 5-1 auszuschließen, werden die Ergebnisse der Änderungshäufigkeiten in eine numerische DSM überführt (vgl. Abbildung 5-6) und als abzugleichende Anforderung unter der Bezeichnung **AX** (vgl. Abbildung 5-7) in die Lösungsmenge mitaufgenommen. Dabei stellt die Matrix zu AX die Abhängigkeiten der änderungsintensiven Komponenten und Fügeinhalte als Ergebnis der deskriptiven Datenanalyse dar.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31					
1	1																																			
2		1																																		
3			1							2	1																									
4				1											2	3			1	1			2													
5					1					2	1																									
6						1					4	4							1	1			2													
7							1				4	4							1	1	1		2													
8								1			3	3							1	1	1		2													
9									1		3	3							1	1	1		2													
10										1									1	1	1		2				2									
11											1								1	1	1		2				2									
12												1							1	1	1		2													
13													1						1	1	1		2													
14														1					1	1	1		2													
15															1				1	1	1		2													
16																1			1	1	1		2													
17																	1		1	1	1		2													
18																		1	1	1	1		2													
19																			1	1	1	1	2													
20																				1	1	1	2													
21																					1	1	2													
22																								1												
23																								1												
24																								1												
25																								1												
26																								1												
27																								1												
28																								1												
29																								1												
30																								1												
31																								1												

Abbildung 5-6: Übertrag der Ergebnisse zur Untersuchung kritischer Änderungsumfänge in eine numerische DSM entlang der Klassifikation der Quadranten Q1-Q4

Für die abschließende **Modulbildung und den Abgleich der Anforderungen** (vgl. **Kapitel 4.4**) erfolgt im letzten Methodenbaustein des multimethodischen Verfahrens zunächst die Auswahl der geeigneten Methode zur Modulbildung und Zuordnung der Elemente in Module. Da die Komponenten der Hauptbodenstruktur aufeinander aufbauen und alle Komponenten schrittweise an das Hauptmodul hinzugefügt werden, entstehen infolgedessen eine Vielzahl an Rückkopplungen innerhalb der Produktion. Deshalb wurde die Methode des "**Clustering**" ausgewählt (vgl. **Kapitel 4.4.1**), um richtungsbasierte Iterationen zuzulassen und ähnliche Elemente zusammenzufassen.

Identifizierte Abhängigkeiten konnten dadurch in eine teilautomatisierte Clustering-Anwendung übertragen werden, um über Ähnlichkeitsmaße und die Maximierung der internen Interdependenzen eindeutige Module zu bilden (vgl. Abbildung 5-7).

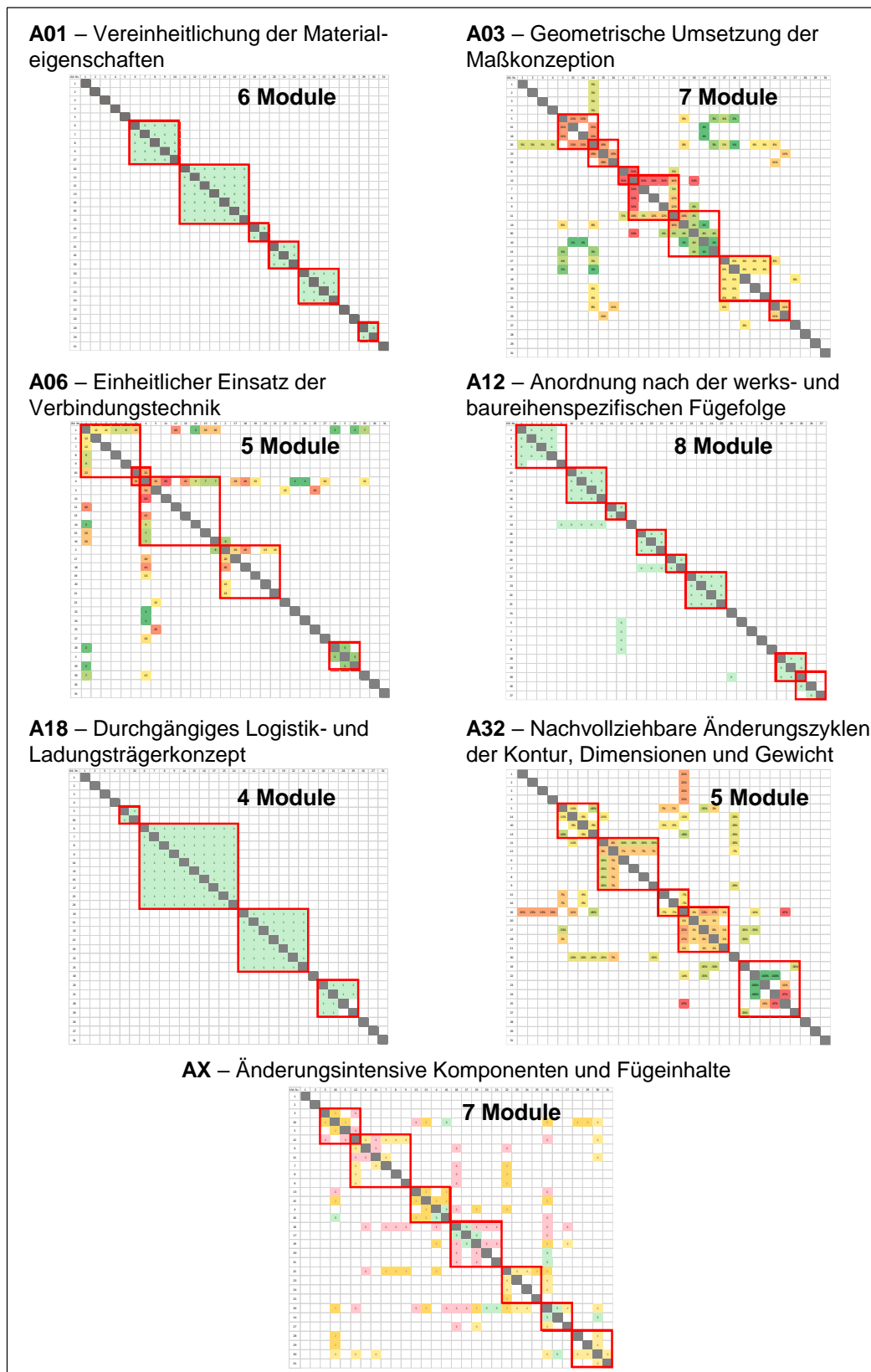


Abbildung 5-7: Ableitung der Modulaufteilung durch "Clustering" für den "ZB Hauptboden"

Das Ergebnis der individuellen Modulbildung zeigt dabei eine schwankende Anzahl an Modulen (4-8 Module), unterschiedliche Modulgrößen, variierende Zuordnungen der Elemente in Module und gegensätzliche Abhängigkeiten (vgl. Abbildung 5-7). Damit dennoch ein Abgleich der gebildeten Module möglich ist, müssen über **Gewichtungen und Priorisierungen (vgl. Kapitel 4.4.2)** bestehende Restriktionen, feste Moduleinteilungen und priorisierte Module festgestellt und bewertet werden. Hierzu fand über die Domänenexperten der Entwicklungs- und Planungsbereiche eine Abschätzung und Bewertung der Modulaufteilung hinsichtlich der kostenwirksamen Parameter (z. B. Material-, Personal-, Investitionskosten etc.) statt. Dabei erfolgte die Festlegung der Anforderungen **A01**, **A12** sowie **AX** als gewichtete Größen. Darüber hinaus mussten durch bestehende Restriktionen innerhalb der Fertigungssequenz und Stationsbelegung die **Elemente 1-4** als feste und untrennbare Modulzuordnung zusammengefasst werden. Von einer weiteren Bearbeitung dieser Elemente wurde daher abgesehen.

Um im nächsten Schritt durchgängige Überschneidungen der Elemente und abweichende Modulzuordnungen zu **visualisieren und abzugleichen (vgl. Kapitel 4.4.3)**, wurde die multidimensionale Analyse über die Darstellung verknüpfter Parallelogramme und "Parallel Sets" (vgl. Abbildung 5-8 und Anhang A2) durchgeführt.

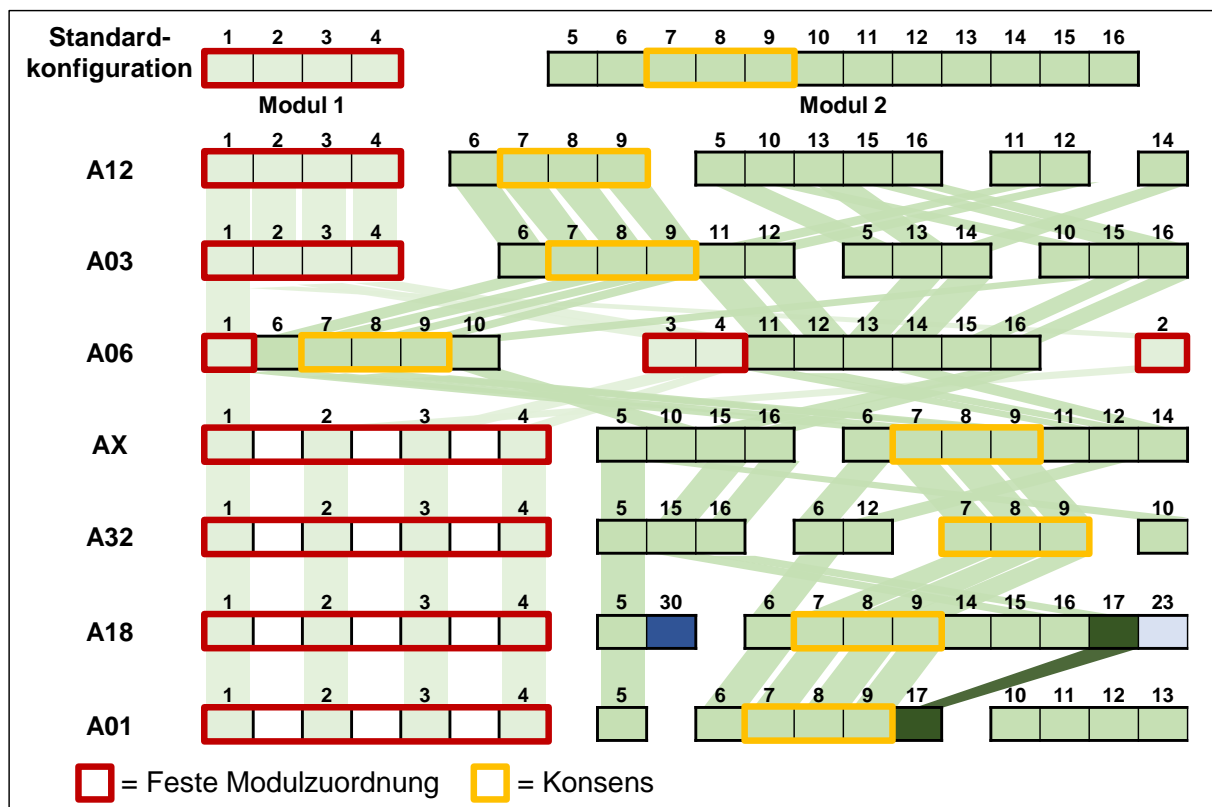
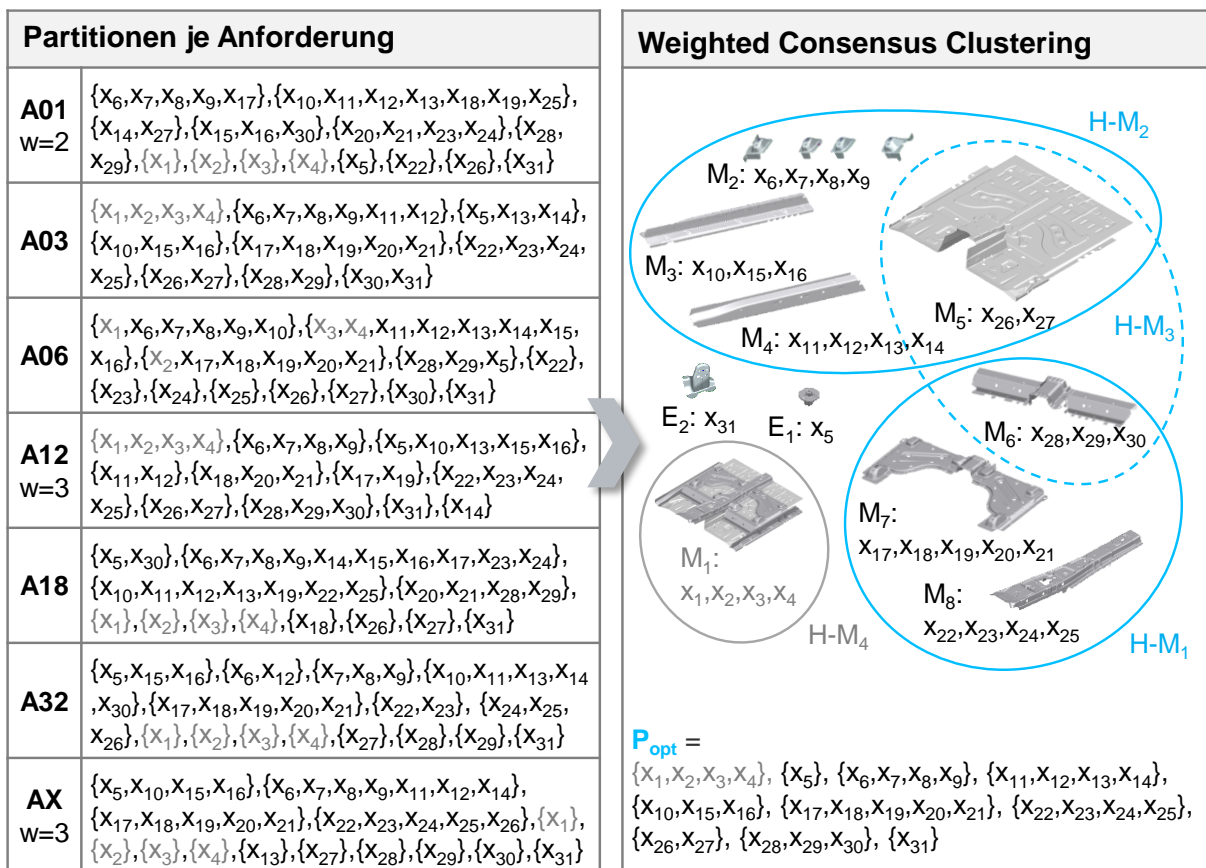


Abbildung 5-8: Ausschnitt zum Abgleich der identifizierten Modulzuordnungen zur Standardkonfiguration

Für jede Anforderung kann mit der Darstellungsweise aus Abbildung 5-8 die individuelle Modulzuordnung dargestellt und auf wiederkehrende bzw. verbundene Module untersucht werden. Die vorläufige Zuordnung durchgängig überschneidender Elemente als Konsens (vgl. Elemente 7, 8, 9 in Abbildung 5-8) erfolgte dabei manuell und in Abstimmung mit den Entwicklungs- und Planungsexperten. Das Ergebnis der Visualisierung und des Abgleichs der Modulzuordnungen zeigen, dass aufgrund der hohen Streuung sowie der Anzahl an Verbindungen und Elemente lediglich einzelne und nicht anpassbare Module abgeleitet werden (vgl. Modul 2 in Abbildung 5-8).

Damit eine nachvollziehbare Zuordnung sowie ein vollständiger Abgleich aller Elemente des Systems "ZB Hauptboden" ermöglicht werden konnten, folgte anschließend an die manuellen Verfahren die Durchführung der **gewichteten und aggregierten Clusteranalyse (vgl. Kapitel 4.4.5)**. Dazu wurde eine Aggregations- bzw. Konnektivitätsmatrix auf der Grundlage der resultierenden Modulbildungen (Partitionen) für den Hauptboden entwickelt (vgl. Abbildung 5-9). Unter Berücksichtigung der Gewichtungen konnte aus den Einzellösungen eine an die definierten Anforderungen angepasste Zielpartition P_{opt} (vgl. Abbildung 5-9) generiert werden.



w = Gewichtung x_n = Element n H-M_n = Haupt-Modul n M_n = Modul n E_n = Einzelteil n

Abbildung 5-9: Ableitung einer abgeglichenen Modulzuordnung für die Hauptbodenstruktur

Das Ergebnis stellt somit eine vollständig abgeglichene und abgestimmte Modulstruktur durch P_{opt} dar. Auf der Ebene der Produktstruktur wurden dadurch die Elemente in acht Module ($M_1 - M_8$) und zwei Einzelteile (E_1 und E_2) eingeteilt. Darüber hinaus erfolgte über die Analyse der modulübergreifenden Verbindungen und Abhängigkeiten die Anordnung der Module in Haupt-ZB (z. B. H- M_1 mit M_6, M_7, M_8). So ermöglichte die Zusammenfassung und Trennung der gebildeten Module eine Einteilung in produktabhängige und -unabhängige Modulumfangs. Da die Elemente X_1-X_4 bereits als feste Modulanordnung (aufgrund technologischer Restriktionen) in H- M_4 zusammengefasst werden, sind diese in Abbildung 5-9 ausgegraut. Es erfolgt somit keine Anpassung dieser Elemente, sodass diese im weiteren Verlauf der Modulbildung nicht weiter berücksichtigt werden.

Die daraus abgeleitete Zuordnung der Elemente in alternative Modulzusammensetzungen stellt einen nachvollziehbaren und vergleichbaren Konsens der ermittelten erfolgskritischen Anforderungen dar. Wiederkehrende und standardisierte Hauptmodule (bzw. Haupt-ZB) werden folglich zwischen den Derivaten und Varianten austauschbar und ermöglichen die Wiederverwendbarkeit innerhalb der Fahrzeugarchitektur. Abbildung 5-10 gibt dazu einen Überblick über die resultierende Modulbildung und Zuordnung der Elemente infolge vollständig abgestimmter und gewichteter Anforderungen an das System "ZB Hauptboden".

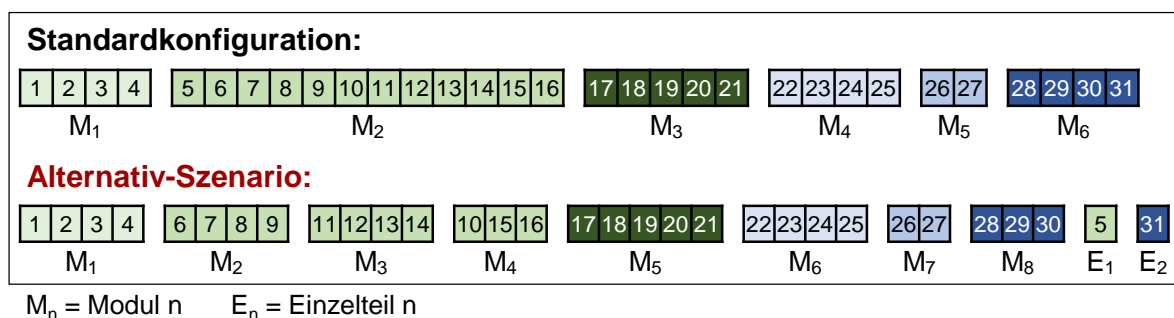


Abbildung 5-10: Vergleich der Modulzuordnung und -struktur zwischen der Standardkonfiguration und dem Alternativ-Szenario

Das Alternativ-Szenario stellt somit eine neue An- und Zuordnung der Elemente in den Modulen dar. Durch den erhöhten Zerlegungsgrad sowie die Orientierung an erfolgskritischen Anforderungen wurde eine zielorientierte Modulbildung entwickelt. Dadurch konnten auf der Grundlage der frühen Planungs- und Prototypen-Phasen produktabhängige und damit individuelle Module von produktunabhängigen Standardmodulen getrennt werden, um weitere Karosserievarianten aus der Grundplattform abzuleiten.

Für einen **komparativen Vergleich** und eine quantitative wie auch qualitative **Gegenüberstellung der Modulzuordnungen** (vgl. Kapitel 4.4.6) wurde das Alternativ-Szenario aus den Ergebnissen der Validierung entwickelt und in die Produktstruktur überführt. Um möglichst vollständig abgestimmte Module abzuleiten und die identifizierten Anforderungen zu erfüllen, wird ein hoher Grad an überschneidenden Modulzuordnungen erwartet. Der Erfüllungsgrad drückt dabei den prozentualen Anteil an übereinstimmenden Modulzuordnungen zwischen den Anforderungen und der zu bewertenden Größe (hier: Standardkonfiguration und Alternativ-Szenario) aus. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung und Bewertung der beiden Modulkonfigurationen und Modulzuordnungen sind in Abbildung 5-11 dargestellt.

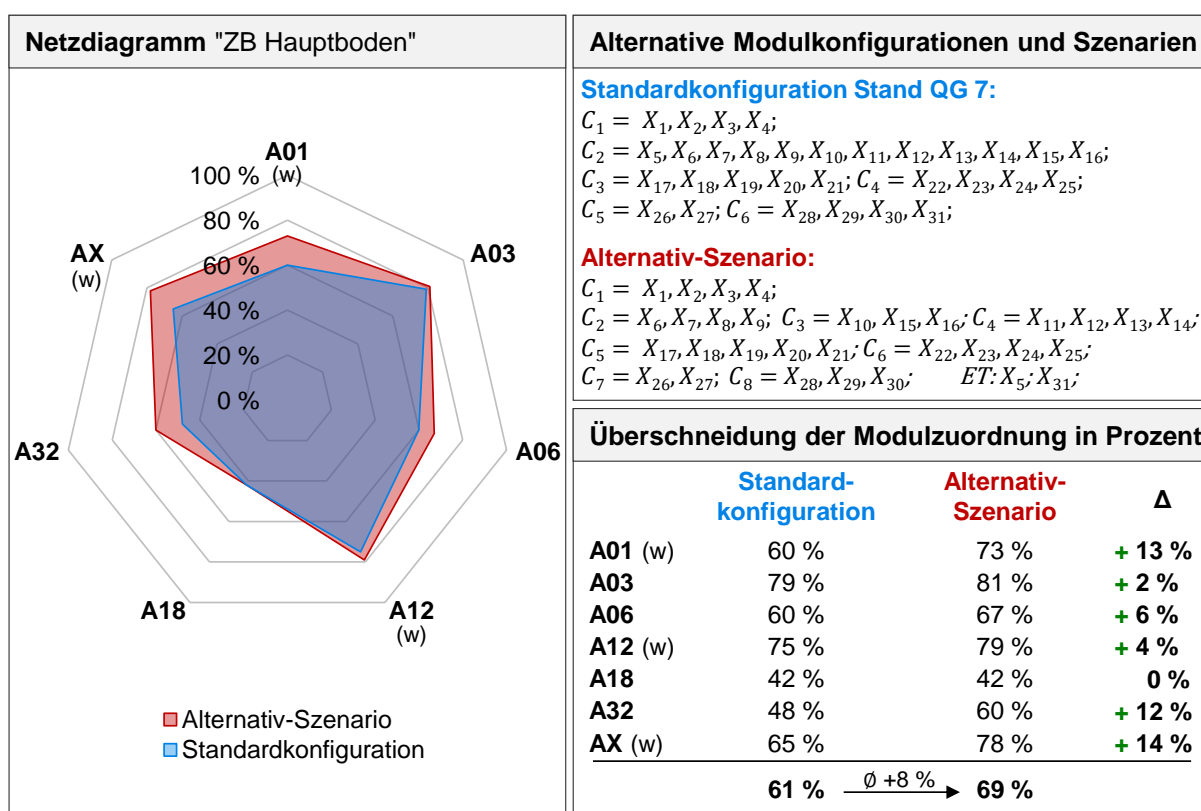


Abbildung 5-11: Vergleich und Gegenüberstellung der Planungskonfiguration mit dem Alternativ-Szenario der Validierung

So ließ sich aufzeigen, dass die Überschneidung und der Grad an übereinstimmenden Modulzuordnungen durch das multimethodische Verfahren um durchschnittlich 8 % gesteigert werden konnte. In Bezug auf umsetzungsrelevante und gewichtete Anforderungen (z. B. **A01**, **A12** und **AX**) zeigte sich darüber hinaus eine Steigerung des Erfüllungsgrads von bis zu 14 % (vgl. Abbildung 5-11).

Aus dem höheren Umsetzungsgrad erfolgskritischer Anforderungen sowie dem Abgleich übereinstimmender Module konnte eine vorteilhaftere Erfüllung der durch die

Anforderungen verfolgten Zielgrößen erreicht werden. Es wurde beispielsweise in Abstimmung mit den Domänenexperten aufgezeigt, dass durch die gestiegene Vereinheitlichung der Blecheigenschaften in **A01** (Erfüllungsgrad +13 %) die Vergabe einzelner ZB an einen Systemlieferanten erreicht werden konnte. Im vorliegenden Fall ließen sich durch die Anpassung der Vergabeumfänge nach Expertenschätzung nicht nur die Fixkosten (z. B. Personal-, Material- und Transportkosten etc.) reduzieren, sondern auch die Entwicklungs- und Planungszeiten durch die Kompetenzbündelung beim Systemlieferanten verringern. Zudem folgte aus dem durchgängig gleichbleibenden oder höheren Erfüllungsgrad der erfolgskritischen Anforderungen im Alternativ-Szenario ein Rückgang der gegensätzlichen Modulzuordnungen (Trade-Offs) und der in Zielkonkurrenz stehenden Anforderungen.

5.3 Validierungsergebnisse und Vergleich der Modulzuordnungen

Durch die Validierung und den komparativen Vergleich konnte folglich nachgewiesen werden, dass das multimethodische Verfahren einen erhöhten Erfüllungsgrad der gesetzten bzw. identifizierten Anforderungen ermöglicht. Um aus der qualitativen Bewertung quantifizierbare und produktionswirtschaftliche Wirkungen und Vorteile abzuleiten, wurden die gebildeten Module hinsichtlich der definierten technischen und wirtschaftlichen Zielgrößen aus Tabelle 5-1 untersucht. Die nachfolgende Tabelle 5-2 stellt dazu die unterschiedlichen Wirkungen und den Mehrwert durch den höheren Erfüllungsgrad der Anforderungen und die alternative Modulanordnung dar.

Tabelle 5-2: Produktionswirtschaftliche Wirkungen der Modulzuordnung der Expertenschätzung durch das Alternativ-Szenario

Anforderung	Technologisch-organisatorische Wirkung	Wirtschaftliche Wirkung
A01 Vereinheitlichung der Materialeigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> - Reduktion der Handlungsumfänge. - Steigerung der Ergonomiebewertung manueller Umfänge durch verringertes Einlegegewicht. - Reduktion der Gesamtfläche und Überführung von SLT in ULT. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fixkostendegression (Expertenschätzung -8 %) durch vollständige Vergabe einzelner ZB mit übereinstimmenden Materialzuordnungen. - Reduktion der Transportkosten durch Full-Truckload.
A03 Geometrische Umsetzung der Maßkonzeption	<ul style="list-style-type: none"> - Beibehaltung der gesetzten Referenz- und Geometriepunkte. - Kollisionsfreie Auslegung der Karosserie am Package-Plan. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduktion der Änderungskosten (z. B. Investitionskosten angepasster Produktionsanlagen) und benötigten Entwicklungsleistung.




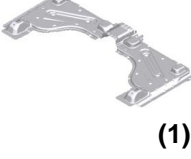

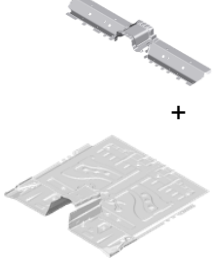

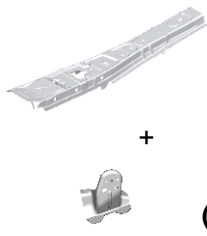
A06 Einheitlicher Einsatz der Verbindungstechnik	<ul style="list-style-type: none"> - Vereinheitlichung der produktgebundenen Verbindungsverfahren. - Erhöhung der Planungssicherheit für Produktionsanlagen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduktion der Änderungskosten und Entwicklungsleistung. - Fügeäquivalenz (Verhältnis der mechanischen Festigkeit des Fügeverfahrens zur Kosteneinheit) ~ 1. - Reduzierter Einsatz investitionsintensiver Verbindungsverfahren.
A12 Anordnung nach der werks- und baureihenspezifischen Fügefolge	<ul style="list-style-type: none"> - Beibehaltung baureihen-, derivate-, varianten- und werkspezifischer Fügefolgen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Erreichen der gesetzten Wertschöpfungstiefe und Erhöhung Anteil externalisierter Umfänge (Expertenschätzung +3 %). - Kapazitätsausgleich und Reduktion kostenintensiver Ausschleusungen.
A18 Durchgängiges Logistik- und Ladungsträger-konzept	<ul style="list-style-type: none"> - Reduktion der konstruktiven Aufwendungen zur SLT-Entwicklung. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduktion SLT und Umsetzung auf ULT (Verringerung um einen vollständigen SLT). - Erhöhung Full-Truckload durch zwei ULT je Ladung.
A32 Nachvollziehbare Änderungszyklen der Kontur, Dimensionen und Gewicht	<ul style="list-style-type: none"> - Einhaltung der Hauptmaße konstruktionsrelevanter Komponenten. - Einhaltung Gewichtsziele. - Reduktion Änderungsaufwendungen konturabhängiger Verbindungen. - Umsetzung der Designvorgaben 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduktion der Änderungskosten und Entwicklungsleistung. - Reduktion der Fehlerquoten an Class-B-Flächen.
AX Änderungsrate Produkt und Fügetechnik	<ul style="list-style-type: none"> - Einbezug von Entwicklungs- und Planungsdaten durch deskriptive Analyseverfahren. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduktion der Änderungskosten und Entwicklungsleistung.

Folglich konnten durch die anforderungsgerechte Modulbildung bereits zu einem frühen Zeitpunkt wesentliche Zielgrößen und Kennzahlen technisch-organisatorischer sowie wirtschaftlicher Anforderungen umgesetzt und erfüllt werden. Dadurch war es möglich, anpassungsfähige Module mit einer reduzierten Komplexität zu bilden und die Entwicklungs- und Planungszeit zu reduzieren sowie die Planungsgenauigkeit und -sicherheit zu steigern. Infolgedessen konnten Fixkosten (z. B. Personal- und Investitionskosten) durch verringerte Änderungsumfänge nachweisbar verringert werden.

Neben dem qualitativen und quantitativen Mehrwert durch die Anwendung des multi-methodischen Verfahrens wurden die Neuordnungen der Produkt- und Modulstruktur (z. B. Auftrennung von Modul 2 in Abbildung 5-10) in umsetzungsnahe Handlungsempfehlungen überführt (vgl. Tabelle 5-3). Die dabei entstandenen Handlungsempfehlungen reichen von Hinweisen zur Auftrennung der bisherigen Modulanordnung in mehrere Module bis zur strukturierten Nachverfolgung der Prozesskennzahlen (z. B. Kapazität, Fehlerquote etc.). Durch die resultierenden konstruktiven Anpassungen der

bestehenden Produktstruktur (vgl. Abbildung 5-2) konnten ebenfalls anpassungsfähige Produkt- und Produktionsmodule gebildet werden. Damit ermöglicht das Alternativ-Szenario nicht nur einen erhöhten Erfüllungsgrad der erfolgskritischen Anforderungen, sondern auch eine Einteilung in produktabhängige und -unabhängige Module.

Tabelle 5-3: Vergleich der Modulzuordnungen zwischen der Standardkonfiguration und dem gebildeten Alternativ-Szenario

Standardkonfiguration und Bezeichnung	Alternativ-Szenario	Handlungsempfehlungen
 <p>ZB Bodenträger OB RE LI</p>	 <p>(1) (2) + (1) (2) + (1) (2) (3)</p>	<p>(1) Auftrennung in drei Module. (2) Auftrennung und Isolation der Konsolen. Schaffen von freier Anlagenkapazität für Mehrumfänge und Anpassungen der Seitenträger. (3) Erhöhung des Gleichteileanteils in der Fahrzeugarchitektur durch Standardisierung der Konsolen.</p> <p>→ Produktunabhängige Module</p>
 <p>ZB Querträger VST HI</p>	 <p>(1) (2)</p>	<p>(1) Einführung von Frühwarn- und Eingriffsgrenzen für Änderungen innerhalb der Fügechnik des geschlossenen Querträgers. (2) Standardisieren der Konsolen und Erhöhung des Anteils an Gleichteilen in der Baureihe.</p> <p>→ Produktunabhängiges Modul mit vollständiger Vergabe an den System-Lieferanten.</p>
 <p>ZB Hauptboden VST</p>	 <p>(1) (3) + (1) (2) (3)</p>	<p>(1) Auftrennung in zwei Module. (2) FMEA-Analyse und Ursachenuntersuchung zur Änderung der Hauptmaße im Hauptboden. (3) Reduktion der externen Wirkungsabhängigkeiten zu Einzelteilen und ZB.</p> <p>→ Produktabhängige Module</p>
 <p>ZB Mitteltunnel VST</p>	 <p>(1) (2) + (1) (3) (4)</p>	<p>(1) Auftrennung in zwei Module. (2) FMEA-Analyse zu umformbedingten Anpassungen. (3) Standardisierung und Spiegelung (re + li) der Anpassungen. (4) Möglichst späte Anpassung der ZB Halter Tunnel durch nachträgliche Änderung und Abhängigkeit zum Batterie-Management-System.</p> <p>→ Produktabhängiges Modul (ZB Mitteltunnel) → Produktunabhängiges Modul (ZB Halter Tunnel)</p>

6 Kritische Würdigung, Reflexion und Ausblick

Im Zusammenhang mit der kritischen Würdigung folgt zunächst ein Abgleich des entwickelten multimethodischen Verfahrens mit der definierten Zielsetzung der Arbeit. Dabei wird das Verfahren gegenüber den bestehenden Methoden zur Modulbildung abgegrenzt, kritisch reflektiert und dessen nachgewiesener Mehrwert aufgezeigt. Des Weiteren wird auf den zukünftigen Forschungsbedarf und die anknüpfende Untersuchungsschwerpunkte eingegangen.

6.1 Kritische Würdigung und Reflexion

Ziel dieser Arbeit war es, durch ein innovatives multimethodisches Verfahren dazu beizutragen, vollständig abgestimmte technisch-organisatorische sowie wirtschaftliche Anforderungen für einen neuen und angepassten Prozess zur Modularisierung zu entwickeln. Durch eine vollständig abgestimmte und anpassbare Modulbildung können zu einem frühen Zeitpunkt im FEP anforderungsgerechte Produkt- und Produktionsmodule entwickelt werden, um innerhalb der (Teil-) Systeme des Karosseriebaus die Komplexität zu reduzieren. Mithilfe der Validierungsergebnisse gelang der Nachweis, die formulierte Zielsetzung dieser Arbeit erfüllen zu können. Damit leistet das entwickelte Verfahren einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Modularisierung, indem die Bildung von Produkt- und Produktionsmodulen zielgerechter entlang definierter Anforderungen erfolgen kann. Das Verfahren ermöglicht somit eine Erhöhung der Planungsgenauigkeit und -sicherheit gegenüber kurzzyklischen Änderungen. Gleichzeitig lassen sich durch änderungsstabile Module die resultierenden Nacharbeits- und Änderungskosten (z. B. Investitions- und Personalkosten) nicht nur reduzieren, sondern teilweise vollständig vermeiden. Über die konstruktive Ableitung und Zusammenfassung der Elemente in logisch verknüpfte Karosseriemodule erfolgt dabei eine Zuordnung in produktabhängige und produktunabhängige Module. Diese Differenzierung ermöglicht zudem das Generieren von Standardisierungspotenzialen durch wiederverwendbare Module unter Beibehaltung der kunden-, qualitäts- und strategierelevanten Eigenschaften des Produkts und in der Produktion.

Das multimethodische Verfahren basiert auf der Weiterentwicklung und Verbindung etablierter sowie neuer Methoden aus unterschiedlichen Forschungsgebieten. Diese Methoden werden auf ein spezifisches Problemumfeld übertragen, angepasst und neu

verknüpft, sodass ein iterativer Prozess zur ganzheitlichen Modulbildung entsteht. Der wissenschaftliche und produktionswirtschaftliche Mehrwert besteht folglich im Aufbau eines Verfahrens, das es ermöglicht, auf zukünftige technisch-organisatorische und wirtschaftliche Anforderungen an das Produkt und die Produktion zu reagieren.

In diesem Zusammenhang wurde zur Erarbeitung des ersten Methodenbausteins zunächst aufgezeigt, dass grundlegende Anforderungen aus dem Umfeld der Karosserie, aus dem Karosseriebau sowie hinsichtlich der Phasen im FEP über einen einheitlichen Prozess identifiziert und in einer Übersicht zusammengefasst werden konnten. Damit werden wie in der zusammenfassenden Darstellung in Abbildung 4-27 dargestellt, Grundanforderungen an das Produkt und die Produktion durch einen strukturierten Prozess erfasst und analysiert. Insbesondere das Teilsystem der Karosseriestruktur definiert dabei eine Vielzahl an konzeptbestimmenden Grundanforderungen und besitzt daher eine hohe Einflusswirkung auf die vor- und nachgelagerten Prozessschritte sowie auf weitere Karosseriederivate. Diese Grundanforderungen an die Karosseriestruktur stellen folglich die Basis für die nachfolgenden Schritte des Verfahrens dar. Kommt es zu großen konzeptionellen Unterschieden oder unternehmens- und produktspezifischen Anpassungen im Karosserieaufbau, können die Grundanforderungen nicht mehr ausreichend sein, um das (Teil-) System (z. B. eine spezifische Baugruppe innerhalb der Karosseriestruktur) im fokussierten Problemumfeld vollständig zu beschreiben. Dadurch entstehen abweichende, unvollständige und nicht kompatible Modulzuordnungen. Demnach resultiert eine eingeschränkte Übertragbarkeit der erfassten Grundanforderungen außerhalb der festgelegten Rahmenbedingungen und des Bereichs der Karosseriestruktur. Um dennoch Anforderungen für abweichende Karosseriekonzepte zu erfassen oder das Verfahren auf Bereiche außerhalb der Karosserie anzuwenden, erfolgt eine strukturierte Analyse der Anforderungen an das Problemumfeld durch eine Aufgaben-, Domänen- und Literaturanalyse. Auch stellt die Klassifikation und Einordnung nach dem Komplexitätseinfluss ein entscheidendes Auswahlkriterium hinsichtlich erfolgskritischer und abzustimmender Anforderungen dar. Insbesondere im Rahmen der Validierung konnte festgestellt werden, dass die stärkere Orientierung an den gewichteten Anforderungen einen höheren Erfüllungs- bzw. Umsetzungsgrad (bis zu +14 %) ermöglicht. Folglich entsteht ein nachvollziehbarer Prozess zur Identifikation relevanter Einflussgrößen und Anforderungen an das zu untersuchende Problemumfeld innerhalb der Fahrzeugkarosserie und dem Gewerk des Karosseriebaus. Als Ergebnis des ersten Methodenbausteins des in dieser Arbeit

entwickelten multimethodischen Verfahrens entstehen somit (technisch-organisatorisch wie auch wirtschaftliche) erfolgskritische Anforderungen an die Karosseriestruktur und den Karosseriebau.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Anforderungserfassung und -analyse im ersten Hauptschritt des entwickelten Verfahrens wird im zweiten Methodenbaustein der zu betrachtende Systemumfang festgelegt, abgegrenzt und in eine einheitliche Darstellungsweise modelliert (vgl. Abbildung 4-27). Durch den Übertrag der unterschiedlichen Systeme (z. B. Produkt-, Produktions- oder Modulstrukturen) in eine einheitliche Darstellung sowie die Modellierung der paarweisen Abhängigkeiten konnte dies als eine Methodik mit einem vereinfachten Aufbau und einer hohen Übertragbarkeit in das Verfahren integriert werden. Dabei ermöglicht die resultierende Struktur nicht nur eine Modellierung richtungsbezogener und wechselseitiger Abhängigkeiten, sondern auch die Erweiterung um zusätzliche (numerische) Merkmale. Zudem eignen sich frühe Produktdaten und geometrische Modelle der digitalen Prototypfahrzeuge für eine Übertragung der übergreifenden Struktur sowie für die Verdeutlichung der Wirkungsabhängigkeiten in der Darstellungsform der Matrizen. Damit erfolgt die Integration des multimethodischen Verfahrens in den FEP bereits zu einem frühen Zeitpunkt und lässt frühzeitige Anpassungen innerhalb der Modulzuordnung zu. Folglich werden die erfassten Anforderungen über die Methode der Design Structure Matrix nicht nur einheitlich über die Funktions- oder Produktstruktur transformiert, sondern auch entlang der Abhängigkeiten innerhalb der Elemente analysiert und damit vollständig dargestellt.

Entgegen bisherigen Ansätzen zur Modularisierung nutzt das multimethodische Verfahren explizites und implizites Expertenwissen über kritische Wirkungszusammenhänge als eine vordefinierte Anforderung. Damit können auf Basis ungenutzter Daten bislang unbekannte Abhängigkeiten und Muster erfasst und in den Prozess zur Modulbildung eingebunden werden. Gegenüber konventionellen Verfahren entsteht so ein wesentlicher Mehrwert: Das Expertenwissen ist nachvollziehbar, liegt dokumentiert und aufbereitet vor und ergänzt somit den Transfer weiteren Wissens über zusätzliche Schnittstellen der Entwicklungs- und Planungsleistungen. Die Validierung stellt hierzu insbesondere heraus, dass selbst auf der Grundlage weniger Daten und digitaler Absicherungsmodelle neues Wissen über Änderungsumfänge generiert und Abhängigkeiten in ein übertragbares Format überführt werden konnten.

Die Einbeziehung der Analysen zur Wissensgenerierung im dritten Hauptschritt des Verfahrens (vgl. Abbildung 4-27) bedingt zusätzlich aufgrund der Nutzung unterschiedlicher Algorithmen ein grundsätzliches Verständnis über den Aufbau dieser Analysen. So ist beispielsweise der genutzte *k*-Means-Algorithmus abhängig von der Anzahl an *k*-Clustern, die bereits vor der Analyse festzulegen und vollständig zu definieren sind. Demnach limitieren das Wissen und die Kompetenz zur problembezogenen Anwendung der Algorithmen die Umsetzung der Datenanalyse und damit die erzielbaren Ergebnisse. Weiterhin sind die Analyseergebnisse von der Qualität (z. B. Verlässlichkeit, statistische Relevanz etc.) sowie von der Durchgängigkeit der Daten (z. B. Vollständigkeit, Verfügbarkeit etc.) abhängig. Innerhalb der Entwicklung zum vierstufigen Prozess der Datenanalyse sowie der Validierung folgten somit die Schritte der Datenvorverarbeitung und -bereinigung unter Einbindung der Domänenexperten. Erst über regelmäßige und plausibilisierende Prüfungen erreichen die erfassten Daten die geforderte Qualität (siehe Definition zur Datenqualität in Kapitel 4.3.3). Daher bedingt eine hohe Datenqualität zusätzliche Arbeits- und Prüfvorgänge. Eine robuste Daten- und Ergebnisqualität steht dadurch in direkter Abhängigkeit zu den Randbedingungen der *Mitarbeiterqualifizierung* sowie der *Durchgängigkeit* und *Qualität* der verfügbaren Daten. Über den vierstufigen Prozess zur Generierung von explizitem und implizitem Wissen (vgl. Abbildung 4-27) werden so Erfahrungswerte und Lessons learned strukturiert aufbereitet, visualisiert und nachvollziehbar dargestellt.

Ungeachtet dessen soll hervorgehoben werden, dass der Einbezug von internem Wissen über deskriptive Analysen innerhalb der Modularisierung bislang noch nicht möglich war. Die hier entwickelte Perspektive stellt somit eine neue erfolgskritische Anforderung zur Modulbildung dar. Eine ausreichend hohe Qualifizierung ist demnach erst durch Erfahrung, geeignete Qualifizierungsmaßnahmen und die vollständige Integration des Verfahrens in den FEP zu erwarten.

Im vierten Schritt und letzten Methodenbaustein des multimethodischen Verfahrens (vgl. Abbildung 4-27) ermöglichen die Strukturierung und der Abgleich der identifizierten Anforderungen sowie die entstehenden Abhängigkeiten eine Ableitung anpassungsfähiger Produkt- und Produktionsmodule. Über visuelle, aggregierte und gewichtet-aggregierte Methoden erfolgt die Zusammenfassung von überschneidenden sowie gegensätzlichen Modulzuordnungen zu einer abgestimmten und anpassbaren Lösungsmenge. Diese Module werden dann in einer komparativen Darstellung über unterschiedliche Szenarien (z. B. mit alternativen Gewichtungen oder Anforderungen)

verglichen. Als Ergebnis des Modulabgleichs und der Entwicklung von Szenarien können somit Handlungsempfehlungen auf der Produkt- und Produktionsanlagenebene entwickelt und kommuniziert werden. Im Prozess zur Abstimmung und Analyse ist dabei zu beachten, dass visuelle Verfahren schnell an die Grenzen der Effizienz und Übersichtlichkeit kommen. Daher eignet sich der Einsatz der (aggregierten und gewichteten) Clusteranalysen insbesondere für komplexe Systeme mit einer Vielzahl an Elementen und Verbindungen. Da die Methoden zur Clusteranalyse ebenfalls manuelle Umfänge aufweisen, besteht (auch) die Gefahr einer Ergebnisverfälschung bei den Modulzuordnungen durch mangelnde Anwenderqualifikation, eine unzureichende Durchgängigkeit der Daten oder durch Übertragungsfehler. Der vorangehende Schritt der Visualisierung ist anzugehen, um das Verständnis über die Modulzuordnungen zu erhöhen und nicht plausible Ergebnisse zu erkennen. Die Ergebnisse des abschließenden Hauptschritts des multimethodischen Verfahrens (vgl. Abbildung 4-27) können somit genutzt werden, um neue und alternative Module zu bilden. Darüber hinaus ist es möglich, in einer weiteren Iterationsschleife die neu gewonnenen Erkenntnisse innerhalb des Verfahrens als neue zu verwenden.

Damit entsteht über die grundsätzliche Idee eines iterativen Lösungsprozesses zur Vereinigung von Einzellösungen und unterschiedlichen Strategien in Kapitel 3.1 das Zielbild für einen neuartigen Lösungsansatz der identifizierten Forschungslücke. Durch die Einteilung des bestehenden Verfahrens (vgl. Abbildung 3-1) lassen sich daraus eine angepasste Vorgehensweise für die Modulbildung und vier übergreifende Methodenbausteine generieren (vgl. Abbildung 3-2). Aus dem Zusammenwirken und der neuartigen Verknüpfung der Methodenbausteine 1-4 (vgl. Abbildung 3-3) wird dadurch das Konzept des multimethodischen Verfahrens zur Erfassung, Vereinheitlichung und zum Abgleich sowohl von internen als auch von externen Anforderungen an die Karosseriestruktur abgeleitet. Mithilfe der Verknüpfung klassischer Planungsmethoden und neuen IT-gestützten Ansätzen entsteht somit schrittweise das multimethodische Verfahren (vgl. Abbildung 4-27 und vgl. Kapitel 4). Die Entwicklung von der Idee bis zum validierten multimethodischen Verfahren wird in Abbildung 6-1 zusammengefasst.

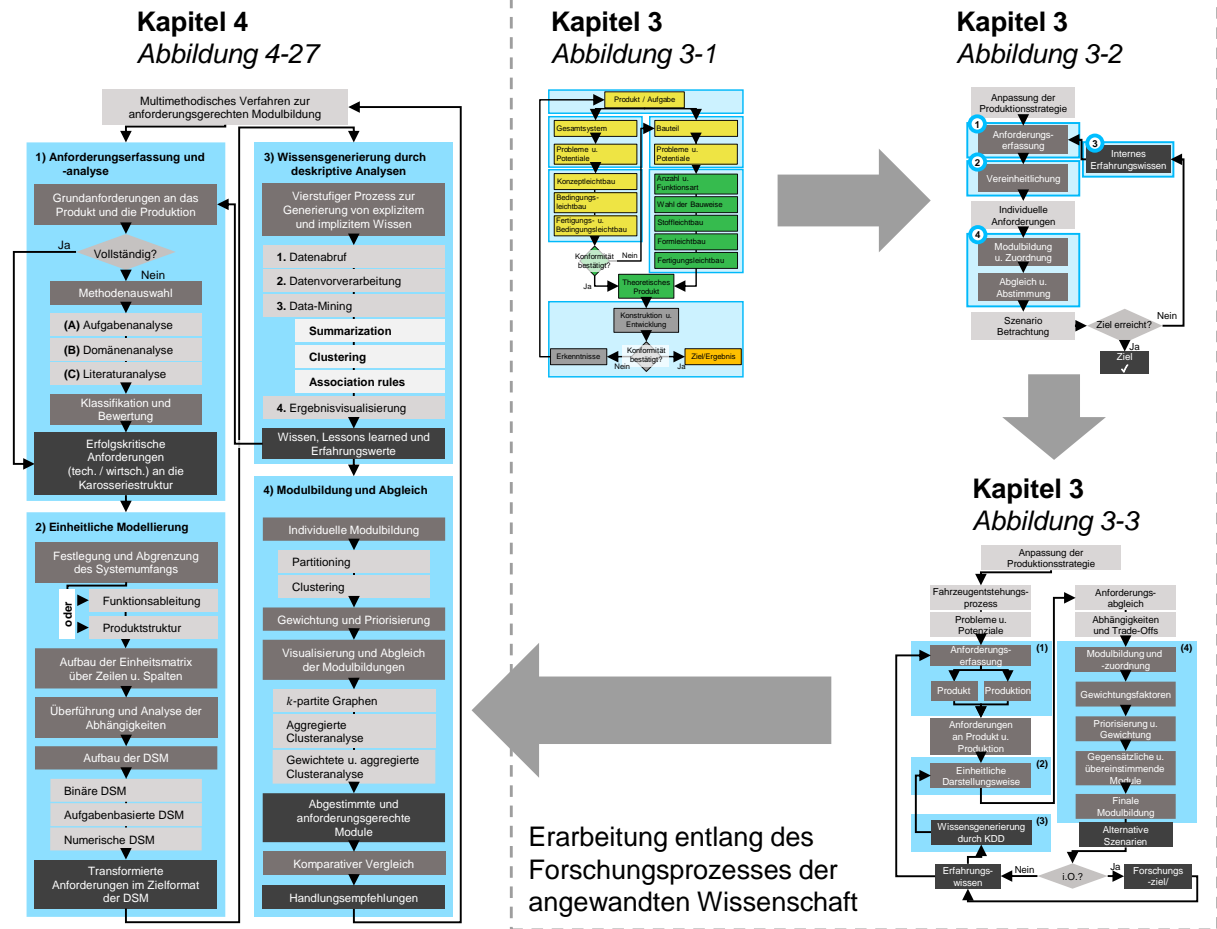


Abbildung 6-1: Fachlich-methodische Entwicklung des multimethodischen Verfahrens mit der wissenschaftlichen Neuerung in der Abbildung 4-27

Zusammenfassend ist herauszustellen, dass unter den vorliegenden Bedingungen eine nachvollziehbare und anpassbare Bildung anforderungsgerechter Module in Karosseriestrukturen realisiert werden kann. Darüber hinaus ist hervorzuheben, dass klassische Entwicklungs- und Planungsmethoden innerhalb des Fahrzeugentstehungsprozesses mit rechnergestützten und IT-spezifischen Methoden verknüpft werden konnten. Durch diese kombinierte Vorgehensweise unterstützen somit generische Algorithmen und Verfahren der Datenanalyse den Problemlösungsprozess mit der Prämisse, die Modularisierung weiterentwickeln zu müssen. Die vollständige Umsetzung der Potenziale ist dabei von einer **durchgängig nachvollziehbaren Datenqualität**, einer ausreichenden **Qualifikation** der Anwender sowie der **Anpassung der Anforderungen an das Problemumfeld** abhängig. Diese erforderlichen Rahmenbedingungen stellen die Limitationen und Grenzen des Verfahrens dar. Insbesondere bei der Anwendung in andere industrielle Bereiche sind diese zu beachten. Eine vollständige Übertragung des multimethodischen Verfahrens an das individuelle Problemumfeld kann damit erst unter der Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen erfolgen.

6.2 Ausblick

Die kritische Würdigung und Reflexion der Ergebnisse zeigen, dass die Anwendbarkeit des multimethodischen Verfahrens an Umfeldbedingungen innerhalb der Automobilindustrie und bezüglich der Karosseriestruktur bestätigt werden konnte. Aufgrund dieser Bedingungen an das Umfeld der Fahrzeugkarosserie sowie der dargestellten Limitationen lassen sich, insbesondere in Bezug auf die Übertragbarkeit des Verfahrens, zukünftige Forschungsaktivitäten und Empfehlungen ableiten.

Da das identifizierte Problem zur Beherrschung komplexer Systeme (z. B. Produkt- und Produktionsstruktur etc.) ebenfalls in den vielfältigen Ebenen der variantenreichen Serienfertigung besteht, ist eine Übertragung des Verfahrens und der Einbezug weiterer Bereiche und Teilsysteme denkbar. Damit können über das entwickelte Verfahren auch vor- und nachgelagerte Stufen im Produktionsprozess genutzt werden, um gewerke- und prozessüberschneidende Module abzuleiten. Somit würden beispielsweise über die zusätzliche Einbindung der Anforderungen an die Umformprozesse im Presswerk übergeordnete Presswerk-Karosseriebau-Module ermöglicht. In diesem Kontext entsteht weiterer Forschungsbedarf bei der Untersuchung hinsichtlich der Ergänzung zusätzlicher und verketteter Produkt- und Produktionsbereiche für die bereichsübergreifende Bildung von Modulen. Aber auch die vereinzelte Übertragung und Ausdehnung des Verfahrens auf weitere Aufbaustufen innerhalb der Karosserie (Z2 und Z3) oder in nicht direkt wertschöpfende Bereiche, wie die Logistik oder Qualitätssicherung, zeichnet sich weiterer Forschungsbedarf ab (vgl. Tabelle 6-1). Damit könnten beispielsweise qualitäts- und kundenrelevanten Komponenten (z. B. lackiertes Exterieur) in kostenintensive Sondertransport-Module zusammengefasst und von regulären Lieferumfängen isoliert werden.

Über die definierten und bereits erfüllten Anforderungskategorien aus dem Stand der Wissenschaft und Technik (vgl. Kapitel 2.4) hinaus wird somit weiterer Forschungsbedarf erkannt und in Tabelle 6-1 dargestellt. Die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit auf weitere Problemfelder innerhalb der variantenreichen Serienproduktion sind daher zu prüfen und gegebenenfalls, um produkt- oder produktionsspezifische Anpassungen zu ergänzen. Dabei ist eine schnellere und einfachere Übertragbarkeit des Verfahrens auf die vor- und nachgelagerten Prozessstufen aufgrund der höheren Ähnlichkeiten (Produktstruktur, Aufbau der Baugruppen etc.) zu erwarten. Für eine Integration der übergreifenden und nicht wertschöpfenden Bereiche sind hingegen vereinzelt stärkere

Anpassungen notwendig. Dennoch lassen sich der grundsätzliche iterative Aufbau und die vier Hauptschritte übertragen und für weitere spezifische Fragestellungen zur Modularisierungsstrategie innerhalb der produzierenden Unternehmen nutzen.

Tabelle 6-1: Erfüllungsgrad der methodischen Anforderungen an das entwickelte Verfahren sowie weiterer Forschungsbedarf

	Produkt		Produktion		Produkt u. Produktion	Weiterer Forschungsbedarf	
	Anforderungskategorien						
	Varianz	Designanpassung	Produktplattformen	Prozessuale Rekonfiguration	Verknüpfung variabler tech. und wirtsch. Anforderungen	Integration der vor- und nachgelagerten Prozessstufen	Bereichsübergreifende Bildung von Modulen (nicht wertschöpfende Bereiche)
Wagner 2023 <i>Multimethodisches Verfahren für anforderungsgerechte Produkt- und Produktionsmodule in Karosseriestrukturen</i>	●	●	●	●	●	◐	◑

◐ = Stärke und Fokus des entwickelten Verfahrens je Anforderungskategorie und weiterer Forschungsbedarfe

Da die vollständige Umsetzung der Potenziale, wie bereits im vorherigen Kapitel festgestellt, eine hohe Datenverfügbarkeit und -qualität bedingt, besteht des Weiteren ein vertiefender Forschungsbedarf in Bezug auf robustere Analyseverfahren. So können über neue und ergänzende Methoden der Datenanalyse die Limitationen des Verfahrens schrittweise verringert werden. Auch durch den verstärkten Einsatz und eine weitere Anpassung der bislang generischen Vorgehensweisen zur Datenanalyse können stärker problemfokussierte Algorithmen erforscht, diskutiert und ausgewählt werden, um interpretationsfreie und damit eindeutige Analyseergebnisse zu erzielen. Durch die Weiterentwicklung der Modularisierung und den dabei folgenden Forschungs- und Handlungsbedarf kann das entwickelte multimethodische Verfahren innerhalb der variantenreichen Serienfertigung umfassender eingesetzt werden. Über ein vertieftes Verständnis hinsichtlich der bestehenden Abhängigkeiten und der Übertragung auf weitere (Schnittstellen-) Bereiche ließe sich eine Verringerung der Gesamtkomplexität im gesamten Produktionsunternehmen durch vollständig abgestimmte Produkt- und Produktionsmodule – auch außerhalb der Karosseriestruktur und der Automobilindustrie erreichen.

7 Zusammenfassung

Die Automobilindustrie steht in den nächsten Jahren vor einer Vielzahl dynamischer Herausforderungen und tiefgreifender Veränderungen. Insbesondere werden die Automobilhersteller mit neuen und veränderlichen Anforderungen an das Automobil als Produkt sowie an das damit einhergehende Produktionssystem konfrontiert. Durch die schwankende Nachfrage an Fahrzeugen, die steigende Produktdifferenzierung sowie den Wandel hin zu alternativen Antriebstechnologien wird zudem die Umsetzung der technischen und wirtschaftlichen Anforderungen zunehmend erschwert. Dies führt neben einer stetigen Anpassung des Produktionssystems, der Organisation und der Personalpolitik zu zeit-, kosten- sowie qualitätsbeeinflussenden Änderungen am Produkt sowie innerhalb der Produktionsprozesse.

Die erforderliche (Neu-) Ausrichtung und Durchführung aller Entwicklungs- und Planungsabläufe besteht dabei aus einer Vielzahl an iterativen und parallelisierten Phasen im Fahrzeugentstehungsprozess. Infolge von kurzfristigen und umfangreichen Anpassungen entsteht beim Durchlaufen dieser Phasen eine hohe Einflusswirkung auf die Ergebnisqualität, auf die Entwicklungs- und Planungskosten sowie auf die Einhaltung definierter Meilensteine im Projektplan. Um die aufkommenden Produkt- und Produktionsanforderungen des volatilen Umfelds der Automobilindustrie vollständig erfüllen zu können und um nachteilige Anpassungen zu vermeiden, müssen diese möglichst frühzeitig erkannt und in die Entwicklungs- und Planungsprozesse integriert werden. Dabei bilden die produktseitige Karosseriestruktur und der produktionsseitige Karosseriebau nicht nur den Startpunkt der Variantenentwicklung, sondern weisen ebenfalls eine hohe Einflusswirkung auf die vor- und nachgelagerten Prozessschritte auf. Daher ist es notwendig, die technischen, organisatorischen sowie die wirtschaftlichen Anforderungen innerhalb des Karosseriebaus zu erkennen, zu bewerten und letztlich zu erfüllen, um so eine Vielzahl an kosten- und änderungswirksamen Abhängigkeiten möglichst von Beginn an abzustimmen und in den Fahrzeugentstehungsprozess zu integrieren.

Diesen Anforderungen kann durch eine gezielte Zusammenfassung und Trennung der festgelegten Komponenten (Produkt- oder Produktion) in einzelne, unabhängige und damit vereinfacht handhabbare Gruppierungen (sog. Module) begegnet werden. Mithilfe der Methode zur Modularisierung wird die Zuordnung der Elemente in Module stärker an die ausgewählten Grundanforderungen angepasst. Dennoch werden durch

bestehende Methoden nur einzelne oder grundlegende Anforderungen erfüllt und dabei nicht auf (gegenläufige) Abhängigkeiten oder Wechselwirkungen geprüft. Eine Untersuchung derzeitiger Modularisierungsstrategien zeigte zudem keine Option auf, wie ein Produkt mit der Produktion zu verknüpfen ist, um abgestimmte und anpassbare Module bilden zu können. Darüber hinaus existiert kaum eine Adaptionmöglichkeit, um auf neue und variable Anforderungen zu reagieren oder erfolgskritische Anforderungen einzeln auszuweisen. Als Konsequenz entstehen aus den vordefinierten Anforderungen lediglich individuelle Einzellösungen der Modulzuordnungen für vereinzelte Karosseriederivate, ohne einen Abgleich oder die Berücksichtigung von Wechselwirkungen vornehmen zu können. Mögliche Potenziale zur Vermeidung von hohen Nacharbeitszeiten und -kosten durch vollständig abgestimmte Module werden damit nicht genutzt. Die identifizierte Forschungslücke liegt daher insbesondere in der Fahrzeugstruktur und in der fehlenden fachlich-methodischen Unterstützung zur Bildung von anpassungsfähigen und abgestimmten Modulen unter Einbeziehung mehrerer unterschiedlicher Anforderungen. Diese Wissenslücke wird durch das in dieser Arbeit entwickelte multimethodische Verfahren für anforderungsgerechte Produkt- und Produktionsmodule in Karosseriestrukturen geschlossen. Durch die Berücksichtigung erfolgskritischer Anforderungen und Abhängigkeiten sowie den Abgleich der resultierenden Zu- und Anordnungen der Elemente in Module kann die Ableitung einer anforderungsgerechten Modulstruktur erfolgen. Diese anpassbaren und anforderungsgerechten Produkt- und Produktionsmodule ermöglichen folglich eine Verringerung der Entwicklungs- und Planungszeiten und somit Gesamtkosten bei gleichzeitiger Steigerung der Planungsgenauigkeit und -sicherheit gegenüber kurzzyklischen Anpassungen.

Das hier entwickelte multimethodische Verfahren verknüpft vier Methodenbausteine in einem iterativen Aufbau. Dabei werden die technisch-organisatorischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Problemumfeld der Karosseriestruktur durch einen methodisch geführten Erfassungsprozess identifiziert und analysiert. Um die neuen Anforderungen nachvollziehbar generieren zu können, werden unterschiedliche Vorgehensweisen der Anforderungserfassung kombiniert. Über die Klassifikation und Priorisierung nach definierten Messgrößen zur Komplexität entsteht darüber hinaus eine konzentrierte Auswahl erfolgskritischer und umsetzungsrelevanter Anforderungen. Durch die einheitliche Darstellung der individuellen Anforderungen eröffnet sich so die Möglichkeit, die bestehenden Wirkungsabhängigkeiten zwischen den Elementen nachvollziehbar zu modellieren. Dazu werden die paarweisen Abhängigkeiten für jede

Anforderung entlang der Zeilen und Spalten einer Matrix auf der Grundlage der Produktstruktur erfasst und organisiert. Die Darstellung in Matrizen ermöglicht, die unterschiedlichen Stärken und Merkmale übersichtlich aufzuarbeiten, in vergleichbare Strukturen zu überführen und identifizierte Interdependenzen untereinander auf Übereinstimmungen und Gegensätzlichkeiten abzustimmen. Über die strukturiert erfassten Anforderungen hinaus erfolgt anschließend die Aufnahme von explizitem Wissen aus ungenutzten Daten und Informationen sowie implizitem Erfahrungswissen der Domänenexperten. Dabei unterstützen die gewonnenen Erkenntnisse über Anpassungen und über funktionale Bedingungen, mögliche Wiederholungsfehler zu vermeiden und eine Übertragung bereits umgesetzter Potenziale vergangener Projekte auf zukünftige Baureihen sicherzustellen. Über deskriptive Analyseverfahren und einen vierstufigen Lösungsansatz zur Wissensgenerierung werden Produkt- und Produktionsdaten aufbereitet und auf unbekannte Wirkungszusammenhänge, Abhängigkeiten und Änderungsverläufe untersucht. Es folgt eine Verknüpfung der konventionellen Planungsmethoden mit den Methoden einer strukturierten Datenanalyse. Aus den Ergebnissen der Analysen lassen sich sowohl unmittelbar ableitbare Handlungsempfehlungen über kritische Änderungsfolgen und -muster als auch übertragbare Wirkungsabhängigkeiten in der Matrizen-Darstellung ableiten.

Um aus diesen Interdependenzen eine Zuordnung der Elemente in Gruppierungen bzw. Module zu entwickeln, werden Elemente mit hoher interner Abhängigkeit in ein gemeinsames Modul zusammengefasst und gegenüber weiteren Modulen mit geringerer Abhängigkeit abgegrenzt. Damit entsteht für jede Anforderung eine individuelle und angepasste Modulzuordnung. Während sich die resultierenden Module neben der Zuordnung der Elemente und Anzahl an Gruppierungen auch durch nicht eindeutige, gegensätzliche und widersprüchliche Abhängigkeiten unterscheiden, erfolgt der Abgleich zu einer Lösungsmenge über Gewichtungen. Dabei werden über grafisch visuelle Verfahren oder eine rechnergestützte Aggregation überschneidende Modulbildungen identifiziert und zusammengefasst. Übereinstimmende und gegensätzliche Module werden hierzu über alle Anforderungen miteinander abgeglichen. Dadurch wird erreicht, dass durchgängig übereinstimmende Module weiterhin erhalten bleiben und nicht eindeutig zugeordnete Elemente und Module unter Einbezug von Gewichtungen und Priorisierungen zu einem Konsens zusammengefasst werden. Das Ergebnis stellt somit eine abgestimmte und anforderungsgerechte Zuordnung der Elemente in Mo-

dule unter Einbindung von Erfahrungswissen der Domänenexperten und Datenanalysen dar. Darüber hinaus ermöglicht die Abgrenzung der Module zueinander eine Differenzierung und Einordnung in individuelle bzw. produktabhängige oder auch produktunabhängige und damit wiederverwendbare Module.

Mit der systematischen Anwendung des multimethodischen Verfahrens kann den zukünftigen und veränderbaren Anforderungen an das Produkt "Fahrzeugarchitektur" und mithin an den Karosseriebau durch anpassungsfähige und vollständig abgeglichenen Module begegnet werden. Aufgrund der Einbeziehung eines derzeit vorliegenden realen Planungsfalls eines Automobilherstellers entstand die Validierung des entwickelten Verfahrens für eine neue und vollelektrische Fahrzeugarchitektur. Es konnte nachgewiesen werden, dass selbst für einen neuen Planungsfall, ohne den Übertrag von bestehenden Modulzuordnungen sowie lediglich unter Einbezug früherer Daten der Konzeptphase, eine anforderungsgerechte Bildung von Modulen möglich ist. Die daraus entwickelte Modulstruktur stellt ein alternatives Szenario auf der Grundlage vollständig abgestimmter Entwicklungs- und Planungsdaten dar. Über einen qualitativen und quantitativen Vergleich der neuen und alternativen Modulzuordnung mit der bisherigen Standardkonfiguration konnte weiterhin ein höherer Umsetzungs- und Erfüllungsgrad der fokussierten Anforderungen erreicht werden. Auch die daraus abgeleiteten technologisch-organisatorischen und wirtschaftlichen Wirkungen bestätigen den qualitativen und quantitativen Mehrwert des multimethodischen Verfahrens. Die Ergebnisse dieser Forschung liefern so einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Modularisierung, indem die Bildung von Produkt- und Produktionsmodulen anforderungs- und damit zielgerechter erfolgen kann.

8 Anhang

8.1 Anhang A1

Tabelle 8-1: Analyseergebnisse zur Anforderungserfassung in Bezug auf die Karosseriestruktur und den Karosseriebau

Anforderung	A00		A01	A02	A03	A04	A05
	Zuordnung	Produkt Produktion					
Primäre Kunden mit Fokus auf die Fahrzeugkarosserie	Konzeptübernahme ähnlicher Modulgruppen	X X	X X	X	X	X	X
	Vereinheitlichung der Materialeigenschaften		X X	X	X	X	X
Hauptkennzahlen und -größen							
Einfluss auf die interne Komplexität							
Beschreibung							

A06	A07	A08	A09	A10	A11	A12	A13
Einheitlicher Einsatz der Verbindungstechnik	Einhaltung der Kennzahl zur Fügeäquivalenz	Einhaltung der Kapazitätsgrenzen der Fügepunkte und -längen	Integration fahrzeugflexibler Spann- und Fixierelemente	Abgeglichene und vollständig definierte Heftpunktfestlegung	Auslegung der Komponenten und Baugruppen für die Lieferantenintegration	Anordnung nach der werks- und baureihenspezifischen Fügefolge	Gleichmäßige Auslastung
X	X	X	X	X	X	X	X
- Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Konstruktion - Digitale Absicherung - Werkeplanung - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Controlling - Konstruktion - Einkauf u. Beschaffung - Prozessplanung	- Konstruktion - Digitale Absicherung - Werkeplanung - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Konstruktion - Digitale Absicherung - Werkeplanung - Einkauf u. Beschaffung - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Digitale Absicherung - Werkeplanung - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Controlling - Konstruktion - Einkauf u. Beschaffung - Intra- u. Interlogistik - Qualitätssicherung	- Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Konstruktion - Werkeplanung - Intra- u. Interlogistik - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Werkeplanung - Prozessplanung
- Fügeverfahren - Einsatz Zusatzmittel - Fügeäquivalenz - Wärmeeinfluss - Anlagenkosten - Fügeparameter (Anpressdruck, Länge, Energiebedarf, ...)	- Kosten je Fügepunkt - Fügemit - Festigkeit	- Anzahl an Fügepunkten - Anzahl an Füge-längen	- Fixierpunkte und -position - NC- Typsteuerung - Universalität	- Maßhaltigkeit	- Lieferantenposition - Dienstleistungstiefe	- Baureihenspezifische Folge - Werkspezifische Folge - Anzahl Geometriestufen - Anzahl Anlagen	- Taktzeit - Automatisierungsgrad - Auslastungsgrad bei Geradeauslauf
A, B, C, D, E	A, B, D, E	A, B, D	A, B, C, D, E	C	A, B, C, D	B, C, E, F	C
Vereinheitlichung der Füge- und Klebeverfahren und Reduzierung variantenspezifischer Sonderverbindungsverfahren und Hilfselemente.	Verhältnis der mechanischen Festigkeit je Kosteneinheit	Einhaltung der gesetzten Fügepunkte- und -längen in Bezug auf die Kapazitätsgrenzen je eingesetzter Füge-technologie	Anzahl und Art der Fixier- und Spanneroperationen	Festlegung der ersten Heftpunkte vor dem Ausschweißvorgang	Entwicklungs- und produktionsseitige Einbindung von System- und Modullieferanten	Fertigungsreihenfolge und Aufbau-stufen der Karosserie	Kapazitätsauslastung aller Produktionsanlagen

A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21
Übernahme und Integration bestehender Produktionsanlagen	Anordnung der Produktionsanlagen an bestehende Gebäudeausrüstungen und das Flächenlayout	Einbindung der Logistik- und Zulieferumfänge	Bündelung der Funktionen nach Vergabeumfängen	Durchgängiges Logistik- und Ladungsträgerkonzept	Integrationsfähigkeit in bestehende Produktlinien (Anlaufphase)	Einhaltung der Umfänge an individuellen Einzelteilen	Einhaltung der ZB-Struktur
X	X	X	X	X	X	X	X
- Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Konstruktion - Digitale Absicherung - Werkeplanung - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Werkeplanung - Intra- u. Interlogistik - Prozessplanung	- Werkeplanung - Einkauf u. Beschaffung - Intra- u. Interlogistik	- Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Controlling - Werkeplanung - Einkauf u. Beschaffung - Intra- u. Interlogistik - Prozessplanung	- Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Controlling - Werkeplanung - Einkauf u. Beschaffung - Intra- u. Interlogistik - Prozessplanung	- Konstruktion - Digitale Absicherung - Werkeplanung - Einkauf u. Beschaffung - Intra- u. Interlogistik - Fahrzeugdesign - Prozessplanung - Betriebsmittelbau - Qualitätssicherung	- Controlling - Konstruktion - Digitale Absicherung - Werkeplanung - Einkauf u. Beschaffung - Intra- u. Interlogistik	- Controlling - Konstruktion - Digitale Absicherung - Werkeplanung - Einkauf u. Beschaffung - Intra- u. Interlogistik
- Integrationfähigkeit - Anteil an Re-Use-Umfängen - Anlagenhochlauf - Gesamtanlagen-effizienz	- Flächenaufteilung und -quotient - Dunkelflächen - Flächenkoeffizienten - Wertschöpfungs- verteilung - In- und Outboundflächen - Medienversorgung	- Lieferantenposition - Dienstleistungstiefe - Skaleneffekte und Kosten	- Ladungsträger- verteilung - Less-Full- Truckload - Lieferantenposition - Dienstleistungstiefe	- Ladungsträger- verteilung - Less-Full- Truckload - Lieferantenposition - Dienstleistungstiefe - Belieferungskonzept	- Fehler je Aufbaustufe und ZB - Anzahl Änderungsanträge je Baureihe, Funktion und ZB	- Anzahl individueller Sachnummern	- Anzahl Baugruppen und Module - Anzahl Haupt-, Groß- und Klein-ZB - Zuordnung der Einzelteile in ZB
A, B, C, D	A, C, D, E	B, D, E	A, B, C, E, G	C, E	A, B, C, D, E	A, D, E, G	A, D, E, G
Übernahme und Integration neuer Produkte in die bestehenden Produktionsanlagen	Aufteilung und Schaffen von Produktionsfläche sowie Anordnung der Produktionsanlagen	Auswahl der Lieferanten für Vergabeumfänge nach Technologiekompetenz und Kapazität	Kompetenz- und Funktionsbündelung für die Vergabe der Baugruppen und Komponenten an Systemlieferanten	Intralogistische Anlieferung und Bandversorgung mit Primär- und Sekundärteilen	Integration neuer Baureihen in bestehende Produktionslinien	Einhaltung der gesetzten Mengen an individuellen Sachnummern	Anzahl an Zusammenbauten, bestehend aus gefügten Einzelteilen

A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29
Angepasste Teilevarianz	Absicherung der Projekt- und Prozesskenntnisse	Ganzheitliche Berücksichtigung von Material-, Fertigungs- und Lohnkosten	Abgleich der Produktreifegrade zur Freigabestufe	Einhaltung der Zellengrenzen und Beibehaltung der Zugänglichkeit	Aufrechterhaltung der Datenaktualität	Einhaltung der Freiheitsgrade am Produkt	Standardisierung
X	X X	X X	X	X	X X	X	X
- Controlling - Konstruktion - Digitale Absicherung - Gewerkeplanung - Einkauf u. - Beschaffung - Intra- u. Interlogistik	- Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Controlling - Konstruktion - Digitale Absicherung - Gewerkeplanung - Einkauf u. - Beschaffung - Intra- u. Interlogistik - Fahrzeugdesign - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Controlling - Konstruktion - Gewerkeplanung - Einkauf u. - Beschaffung - Intra- u. Interlogistik - Betriebsmittelbau	- Konstruktion - Digitale Absicherung - Gewerkeplanung - Intra- u. Interlogistik - Fahrzeugdesign - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Konstruktion - Gewerkeplanung - Intra- u. Interlogistik - Fahrzeugdesign - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Controlling - Konstruktion - Digitale Absicherung - Gewerkeplanung - Einkauf u. - Beschaffung - Intra- u. Interlogistik - Fahrzeugdesign - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Konstruktion - Gewerkeplanung - Fahrzeugdesign - Prozessplanung - Betriebsmittelbau	- Controlling - Konstruktion - Gewerkeplanung - Einkauf u. - Beschaffung - Intra- u. Interlogistik - Fahrzeugdesign - Prozessplanung - Betriebsmittelbau
- Anzahl Derivate und Varianten inkl. Motorisierungen und Ländervarianz	- Anzahl Übernahme an Best-Practice-Lösungen	- Fertigungskosten - Materialkosten - Planungskosten - Änderungskosten - Gemeinkosten	- Produktreifegrad - Terminverlauf und -treue	- Bauraumgestaltung	- Reifegrad - Planungs- und Konstruktionsfreigabestufe - Versionierung	- Anteil Freiheitsgrade zu festen Modulen - Anlagen Auslastung - Pufferkapazitäten - Pufferzonen	- Verblockungsgrad - Gleichteileanteil - Architekturentscheid - Standardisierungsgrad
A, B, C, D, E, G	A, B, C, D, E, G, H	A, B, C, D, E	A, B, C, D, E	B, C, D, E	A, B, C, D, E	A, B, D, E	A, B, C, D, E
Anzahl an Varianten je Derivat und Modell innerhalb einer Produktarchitektur	Gewonnene Erkenntnisse vergangener Fahrzeugprojekte oder während der Projektarbeit	Berücksichtigung der gesamten Kostenstruktur für Produkt und Produktion	Produktreifegrad und Planungssicherheit in Bezug auf die Seriennähe	Zugänglichkeit der Applikatoren, Schweißzangen und Greifern am Produkt durch die Anlage	Aktualität der Planungs- und Entwicklungsdaten	Zusätzliche Kapazitäten, Puffer und frei verfügbarer Planungs- und Entwicklungsspielraum	Übernahmegrad an standardisierten Teilen zwischen Varianten, Modellen und Baureihen

A30	A31	A32	A33
Verkettung der Produktionsanlagen	Einhaltung der gesetzten Zykluszeiten	Nachvollziehbare Änderungszyklen der Kontur, Dimensionen und Gewicht	Beibehaltung der gesetzten Biege- und Torsionssteifigkeiten
X	X	X	X
<ul style="list-style-type: none"> - Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Gewerkeplanung - Prozessplanung - Betriebsmittelbau 	<ul style="list-style-type: none"> - Gewerkeplanung - Prozessplanung 	<ul style="list-style-type: none"> - Fabrikplanung inkl. technischer Gebäudeausrüstung - Konstruktion - Digitale Absicherung - Gewerkeplanung - Intra- u. Interlogistik - Prozessplanung - Betriebsmittelbau - Fahrzeugdesign 	<ul style="list-style-type: none"> - Konstruktion - Digitale Absicherung - Gewerkeplanung - Fahrzeugdesign
<ul style="list-style-type: none"> - Produktionskapazität bei festgelegter Auslastung - Anzahl Produktionsanlagen - Anzahl Leerstationen 	<ul style="list-style-type: none"> - Durchlaufzeit - Zykluszeit - Gesamtzykluszeit - Gesamtanlagen-effizienz 	<ul style="list-style-type: none"> - Hauptmaße LxBxH - Leergewicht - Gewicht Medien und Zusätze - Integration - Antriebspunkte in der frühen Phase 	<ul style="list-style-type: none"> - Struktur- und Torsionssteifigkeit
A, B, D	A, D	A, C, D, E	A, B, C, D, E
Anzahl fest verketteter Produktionsanlagen und verfügbare Arbeitskapazität	Einhaltung der gesetzten Zeitspanne des Arbeitsvorgangs je Produktionsanlage	Gesamtgewicht und Abmaße der zu handhabenden Fahrzeugkarosse je Aufbaustufe	Biege- und Torsionssteifigkeit der Fahrzeugkarosse gegenüber äußeren und inneren Belastungen

8.2 Anhang A2

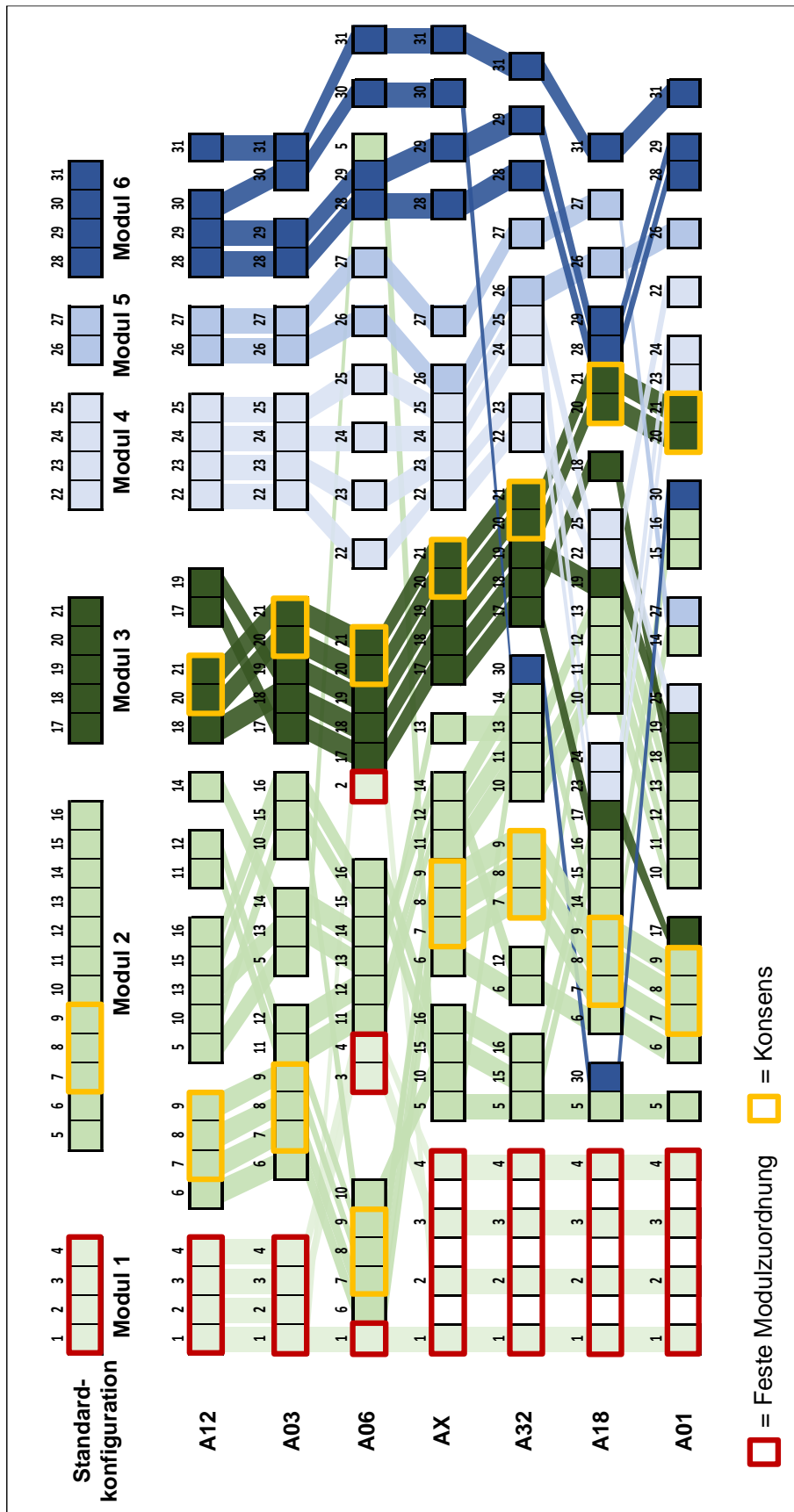


Abbildung 8-1: Abgleich der Modulzuordnungen und Standardkonfiguration der Validierung

9 Literaturverzeichnis

- [1] *Projektmanagement - Projektmanagementsysteme: Teil 5: Begriffe*, DIN 69901-5, Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, 2009.
- [2] D. Spath, „Grundlagen der Organisationsgestaltung“ in *Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 3–29.
- [3] M. Liewald und N. Rose, „Volume Forecasts of Passenger Car Sales and Corresponding Metallic Components of VW Group Until 2030“ in *Proceedings, 22. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss und A. Wagner, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, S. 400–424.
- [4] J. O. Hansen, A. Kampker und J. B. Triebs, *Approaches for flexibility in the future automobile body shop: Results of a comprehensive cross-industry study*. Aachen: Universitätsbibliothek der RWTH Aachen, 2018.
- [5] Automotive World, „The world’s car manufacturers – 2021 edition“, Jg. 2021, S. 2–4.
- [6] D. Spath, Hg., *Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0: [Studie]*. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 2013.
- [7] G. Johnson, K. Scholes und R. Whittington, *Exploring corporate strategy: Text & cases*, 8. Aufl. Harlow: Financial Times Prentice Hall, 2009.
- [8] E. Westkämper und E. Zahn, *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [9] P. P. Datta und R. Roy, „Cost modelling techniques for availability type service support contracts: A literature review and empirical study“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 3, Nr. 2, S. 142–157, 2010.
- [10] M. Bichler, T. Böhm, A. Kampker und J. Triebs, „Challenges for car body shops of electric sports cars“ in *Proceedings, 18. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss und J. Wiedemann, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 507–522.
- [11] N. Wemhöner, „Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau“. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2006.
- [12] A. Kampker, C. Deutskens, H. Heimes, M. Ordnung und A. Haunreiter, „Using E-mobility as an Enabler for a Fast and Lean Product Development to Optimize the Return of Engineering with the Example of Lithium-ion Battery“, *Procedia CIRP*, Jg. 50, Nr. 3, S. 166–172, 2016.

- [13] D. Moon, D. Kim, Y. Lee und Y. Shin, „A Simulation Study on the Effect of Reconfiguration Strategy in an Automotive Body Shop Considering the Change of Product-mix“ in *9th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*, Valletta, Malta, 2020, S. 350–355.
- [14] J. Paralikas, A. Fysikopoulos, J. Pandremenos und G. Chryssolouris, „Product modularity and assembly systems: An automotive case study“, *CIRP Annals*, Jg. 60, Nr. 1, S. 165–168, 2011.
- [15] L. von Bertalanffy, „Vorläufer und Begründer der Systemtheorie“ in *Forschung und Information*, Bd. 12, *Systemtheorie*, R. Kurzrock, Hg., Berlin: Colloquium-Verl., 1972, S. 17–28.
- [16] B. A. Latos *et al.*, *Komplexität in Arbeitssystemen: Analyse und Ordnung von Beschreibungsansätzen aus unterschiedlichen Disziplinen*. Aachen: Universitätsbibliothek der RWTH Aachen, 2017.
- [17] R. Sanchez und J. T. Mahoney, „Modularity, flexibility, and knowledge management in product and organization design“, *Strat. Mgmt. J.*, Jg. 17, S2, S. 63–76, 1996.
- [18] D. Krause und N. Gebhardt, *Methodische Entwicklung Modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt Beherrschbar Entwickeln*. Berlin, Heidelberg: Vieweg, 2018.
- [19] H. Ulrich, *Systemorientiertes Management: das Werk von Hans Ulrich*. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt, 2001.
- [20] S. Pischinger und U. Seiffert, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [21] A. Kampker, D. Vallée und A. Schnettler, *Elektromobilität*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [22] L. Morello, L. R. Rossini, G. Pia und A. Tonoli, *The Automotive Body: Volume I: Components Design*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V, 2011.
- [23] G. Parry, Hg., *Build to order: The road to the 5-day car*. Berlin: Springer, 2008.
- [24] F. Küçükay, *Grundlagen der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.
- [25] F. L. Tesch, „Bewertung der Strukturvariabilität von Pkw-Karosseriederivaten“. Dissertation, Technische Universität München, München.

- [26] H.-P. Wiendahl und B. Klepsch, „Komplementäre Produkt- und Fabrikmodularisierung als Ansatz zur Komplexitätsbewältigung“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 101, Nr. 6, S. 367–373, 2006.
- [27] A. R. Birkert, S. Haage und M. Straub, *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile: Auslegung von Ziehanlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [28] H. Brockmeyer, „Rechnergestützte Methoden zur frühzeitigen Produktbeeinflussung und Produktabsicherung im Karosseriebau“. Dissertation, Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität/ Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg, 2010.
- [29] T. P. Meichsner, „Migrationskonzept für einen modell- und variantenflexiblen Automobilkarosseriebau“. Dissertation, Universität Hannover; Berichte aus dem IPH; Bd. 2007,01, Hannover, 2007.
- [30] F. Meling, „Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik“. Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, München, 2013.
- [31] G. Schuh und S. Gottschalk, „Skalierbare Produktionslinien in der Automobilindustrie“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 99, 7-8, S. 376–380, 2004.
- [32] P. Lettmann, G. Hüttemann und R. Schmitt, „Produkttrouten in frei verketteten Montagesystemen“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 114, Nr. 9, S. 517–520, 2019.
- [33] VDI 2221: 1993-05 Blatt 1, *Verein Deutscher Ingenieure e.V., Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1993.
- [34] H. Burr, „Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau“. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2008.
- [35] W. Walla, „Standard- und Modulbasierte digitale Rohbauprozesskette - Frühzeitige Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforderungen im Karosserierohbau der Automobilindustrie“. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2015.
- [36] F. Klug, „Logistikmanagement im Rahmen des Simultaneous Engineering“ in *Logistikmanagement in der Automobilindustrie*, F. Klug, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 79–128.

- [37] M. Zimmer, *Durchgängiger Simulationsprozess zur Effizienzsteigerung und Reifegraderhöhung von Konzeptbewertungen in der Frühen Phase der Produktentstehung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [38] S. Rudert und J. Trumpfheller, „Vollumfänglich durchdacht: Der Produktentstehungsprozess.“, *Porsche Engineering Magazin*, Nr. 1, S. 10–13, 2015.
- [39] H. Scherer, A. Albers und N. Bursac, „Model Based Requirements Engineering for the Development of Modular Kits“, *Procedia CIRP*, Jg. 60, Nr. 2, S. 145–150, 2017.
- [40] W. Eversheim, Hg., *Simultaneous Engineering: Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie*. Berlin: Springer, 1995.
- [41] H.-P. Wiendahl, *Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. München: Hanser, 2005.
- [42] U. Bracht, D. Geckler und S. Wenzel, „Nutzen der Digitalen Fabrik“ in *Digitale Fabrik*, U. Bracht, D. Geckler und S. Wenzel, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 54–82.
- [43] A. Schloske, „Innovation und Produktentwicklung“ in *Fabrikbetriebslehre 1*, T. Bauernhansl, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 67–102.
- [44] M. Hirz, *Integrated computer-aided design in automotive development: Development processes, geometric fundamentals, methods of CAD, knowledge-based engineering data management*. Berlin: Springer, 2013.
- [45] P. Bonitz, *Freiformflächen in der rechnerunterstützten Karosseriekonstruktion und im Industriedesign*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [46] H. Seeger, „Anfänge der Designwissenschaften“ in *Internationales Transportation-Design*, H. Seeger, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 89–145.
- [47] G. Ellenrieder, T. Gänsicke, J. Sandiano, M. Goede und H. G. Herrmann, „Die Leichtbaustrategien“ in *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, H. E. Friedrich, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 43–118.
- [48] T. Streichert und M. Traub, „Einleitung“ in *Elektrik/Elektronik-Architekturen im Kraftfahrzeug*, T. Streichert und M. Traub, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 1–14.
- [49] M. Liewald, M. Schneider und S. Walzer, „Neue Leichtbaukonzepte in der Blechumformung“, *Lightweight Design*, Jg. 10, Nr. 2, S. 10–15, 2017.

- [50] C. Y. Baldwin und K. B. Clark, *The power of modularity*. Cambridge, Massachusetts, London: The MIT Press, 2000.
- [51] F. Koppenhagen, „Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen“. Dissertation, Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2004.
- [52] H. A. Simon, „The Architecture of Complexity“, *Proceedings of the American Philosophical Society*, Jg. 106, Nr. 6, S. 467–482, 1962.
- [53] K. Ulrich, „Fundamentals of Product Modularity“ in *Management of Design: Engineering and Management Perspectives*, S. Dasu und C. Eastman, Hg., Dordrecht: Springer Netherlands, 1994, S. 219–231.
- [54] F. A. S. Piran, D. P. Lacerda, J. A. V. Antunes, C. F. Viero und A. Dresch, „Modularization strategy: Analysis of published articles on production and operations management (1999 to 2013)“, *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 86, 1-4, S. 507–519, 2016.
- [55] J. Pandremenos, J. Paralikas, K. Salonitis und G. Chryssolouris, „Modularity concepts for the automotive industry: A critical review“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 1, Nr. 3, S. 148–152, 2009.
- [56] J. K. Gershenson, G. J. Prasad und Y. Zhang, „Product modularity: Definitions and benefits“, *Journal of Engineering Design*, Jg. 14, Nr. 3, S. 295–313, 2003.
- [57] C.-C. Huang und A. Kusiak, „Modularity in design of products and systems“, *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A*, Jg. 28, Nr. 1, S. 66–77, 1998.
- [58] C. Baldwin und K. Clark, „Modularity in the Design of Complex Engineering Systems“ in 2007, S. 175–205.
- [59] U. Weidemann, „Montagecluster zur Strukturierung der Fahrzeugendmontage“. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2018.
- [60] D. Krause, T. Vietor, D. Inkermann, M. Hanna, T. Richter und N. Wortmann, „Produktarchitektur“ in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, B. Bender und K. Gericke, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, S. 335–393.
- [61] F. Belkadi *et al.*, „Modular design of production systems tailored to regional market requirements: A Frugal Innovation perspective“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 51, Nr. 11, S. 96–101, 2018.
- [62] B. J. Pine, *Maßgeschneiderte Massenfertigung: Neue Dimensionen im Wettbewerb*. Wien: Wirtschaftsverl. Ueberreuter, 1994.

- [63] T. Krusche, J. Leyers, T. Oehmke und T. Parr, „Bewertung von Modularisierungsstrategien für unterschiedliche Fahrzeugkonzepte am Beispiel des Vorderwagens“, *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 106, Nr. 10, S. 928–933, 2004.
- [64] J. F. Lampón, V. Frigant und P. Cabanelas, „Determinants in the adoption of new automobile modular platforms“, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Jg. 30, Nr. 4, S. 707–728, 2019.
- [65] A. Takeishi und T. Fujimoto, „Modularisation in the auto industry: Interlinked multiple hierarchies of product, production and supplier systems“, *IJATM*, Jg. 1, Nr. 4, S. 379, 2001.
- [66] Y. Queudeville, „Entwicklung einer Methodik zur Modularisierung von Druckgusswerkzeugen“. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2015.
- [67] VDI 2223: 2004-01, *Verein Deutscher Ingenieure e.V., Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [68] VDI 2222: 1997-06 Blatt 1, *Verein Deutscher Ingenieure e.V., Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1997.
- [69] VDI 2222: 1982-02 Blatt 2, *Verein Deutscher Ingenieure e.V., Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1982.
- [70] J. Webster und R. T. Watson, „Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review“, *MIS Quarterly*, Jg. 26, Nr. 2, 2002.
- [71] G. Michalos, S. Makris, N. Papakostas, D. Mourtzis und G. Chryssolouris, „Automotive assembly technologies review: Challenges and outlook for a flexible and adaptive approach“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 2, Nr. 2, S. 81–91, 2010.
- [72] H. ElMaraghy und T. AlGeddawy, „Cladistics for Products and Manufacturing“ in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, L. Laperrière und G. Reinhardt, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 194–204.
- [73] M. K. Starr, „Modular production – a 45-year-old concept“, *International Journal of Operations & Production Management*, Jg. 30, Nr. 1, S. 7–19, 2010.
- [74] M. V. Martin und K. Ishii, „Design for variety: Developing standardized and modularized product platform architectures“, *Res Eng Design*, Jg. 13, Nr. 4, S. 213–235, 2002.
- [75] A. Cabigiosu, F. Zirpoli und A. Camuffo, „Modularity, interfaces definition and the integration of external sources of innovation in the automotive industry“, *Research Policy*, Jg. 42, Nr. 3, S. 662–675, 2013.

- [76] R. N. Langlois, „Modularity in technology and organization“, *Journal of economic behavior & organization : JEBO*, Jg. 49, Nr. 1, S. 19–37, 2002.
- [77] N. Chiriac, K. Hölttä-Otto, D. Lysy und E. Suk Suh, „Level of Modularity and Different Levels of System Granularity“, *Journal of Mechanical Design*, Jg. 133, Nr. 10, S. 69, 2011.
- [78] J. Weber, *Automotive Development Processes: Processes for Successful Customer Oriented Vehicle Development*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [79] W. Liu und Y. Zeng, „Conceptual Modeling of Design Chain Management towards Product Lifecycle Management“ in 2009, S. 137–148.
- [80] J. P. MacDuffie, „Modularity-as-Property, Modularization-as-Process, and ‘Modularity’-as-Frame: Lessons from Product Architecture Initiatives in the Global Automotive Industry“, *Global Strategy Journal*, Jg. 3, Nr. 1, S. 8–40, 2013.
- [81] U. Lindemann, M. Maurer und T. Braun, *Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [82] M. Muffatto und M. Roveda, „Developing product platforms“, *Technovation*, Jg. 20, Nr. 11, S. 617–630, 2000.
- [83] S. K. Fixson, „Product architecture assessment: A tool to link product, process, and supply chain design decisions“, *Journal of Operations Management*, Jg. 23, 3-4, S. 345–369, 2005.
- [84] T. AlGeddawy und H. ElMaraghy, „Reactive design methodology for product family platforms, modularity and parts integration“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 6, Nr. 1, S. 34–43, 2013.
- [85] K. Baylis, G. Zhang und D. A. McAdams, „Product family platform selection using a Pareto front of maximum commonality and strategic modularity“, *Res Eng Design*, Jg. 29, Nr. 4, S. 547–563, 2018.
- [86] C. Brüggemann *et al.*, „Modularisierung von Karosseriestrukturen“, *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 108, Nr. 10, S. 864–871, 2006.
- [87] H. E. Friedrich, Hg., *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [88] A. Al-Zaher und W. ElMaraghy, „Design of reconfigurable automotive framing system“, *CIRP Annals*, Jg. 62, Nr. 1, S. 491–494, 2013.
- [89] K. Hölttä-Otto, *Modular product platform design*. Espoo: Helsinki University of Technology, 2005.

- [90] F. Rossi, S. Arfelli, S. J. Hu, T. A. M. Tolio und T. Freiheit, „A systematic methodology for the modularization of manufacturing systems during early design“, *Flex Serv Manuf J*, Jg. 31, Nr. 4, S. 945–988, 2019.
- [91] H. A. ElMaraghy, „Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms“, *Int J Flex Manuf Syst*, Jg. 17, Nr. 4, S. 261–276, 2005.
- [92] R. Henderson und K. B. Clark, „Architectural innovation: The reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms“, *Fundamentals of business strategy*, S. 182–202, 2008.
- [93] A. Kampker, A. Hollah, J. Triebs und B. Löffler, „Modularer Karosseriebau durch prozess- und bauteilintegrierte Vorrichtungsfunktionen“, *ATZ Prod*, Jg. 6, Nr. 1, S. 10–15, 2019.
- [94] T. Frandsen, „Evolution of modularity literature: A 25-year bibliometric analysis“, *International Journal of Operations & Production Management*, Jg. 37, Nr. 6, S. 703–747, 2017.
- [95] T. AlGeddawy und H. ElMaraghy, „Optimum granularity level of modular product design architecture“, *CIRP Annals*, Jg. 62, Nr. 1, S. 151–154, 2013.
- [96] M. Jacobs, S. K. Vickery und C. Droge, „The effects of product modularity on competitive performance“, *International Journal of Operations & Production Management*, Jg. 27, Nr. 10, S. 1046–1068, 2007.
- [97] V. Schindler, Hg., *Forschung für das Auto von Morgen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [98] J. H. Mikkola, „Capturing the Degree of Modularity Embedded in Product Architectures“, *J Product Innovation Man*, Jg. 23, Nr. 2, S. 128–146, 2006.
- [99] M. Bejlegaard, W. ElMaraghy, T. D. Brunoe, A.-L. Andersen und K. Nielsen, „Methodology for reconfigurable fixture architecture design“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 23, Nr. 2, S. 172–186, 2018.
- [100] P. Gu und S. Sosale, „Product modularization for life cycle engineering“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 15, Nr. 5, S. 387–401, 1999.
- [101] F. I. Kubota, J. Hsuan und P. A. Cauchick-Miguel, „Theoretical analysis of the relationships between modularity in design and modularity in production“, *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 89, 5-8, S. 1943–1958, 2017.
- [102] J. Göpfert, *Modulare Produktentwicklung: Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation*. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag, 1998.

- [103] J. Ponn und U. Lindemann, *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [104] T. U. Pimmler und S. D. Eppinger, „Integration Analysis of Product Decompositions“ in *ASME 1994 Design Technical Conferences collocated with the ASME 1994 International Computers in Engineering Conference and Exhibition and the ASME 1994 8th Annual Database Symposium*, Minneapolis, Minnesota, USA, 1994, S. 343–351.
- [105] G. Schuh, Hg., *Leitfaden zur Baukastengestaltung: Ergebnisse des Forschungsprojekts Gestaltung innovativer Baukasten- und Wertschöpfungsstrukturen (GiBWert) ; ... innerhalb des Rahmenkonzeptes "Forschung für die Produktion von morgen"*. Stuttgart: VDMA Verl., 2015.
- [106] G. Erixon, *Modular Function Deployment - A Method for Product Modularization*. Stockholm, 1998.
- [107] J. Kroker, „Schnittstellensystematik für modulare Fahrzeugkarosserien“. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2005.
- [108] A. Shamsuzzoha, P. Helo und T. Kekale, „Literature overview of modularity in world automotive industries“ in *Technology*, Cape Town, South Africa, 2008, S. 1595–1602.
- [109] Duden, *"Methodik" auf Duden online*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Methodik> (Zugriff am: 3. Juni 2022).
- [110] J. Pfahler, B. Stamp, P. Stritt und M. Liewald, „Energiebilanzierung in frühen Phasen der Bauteilentwicklung“, *Lightweight Des*, Jg. 3, Nr. 4, S. 35–41, 2010.
- [111] F. Henning und E. Moeller, Hg., *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München, Wien: Hanser, 2011.
- [112] D. Zowghi und C. Coulin, „Requirements Elicitation: A Survey of Techniques, Approaches, and Tools“ in *Engineering and Managing Software Requirements*, A. Aurum und C. Wohlin, Hg., Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, S. 19–46.
- [113] K. M. M. Hölttä-Otto und M. P. Salonen, „Comparing Three Different Modularity Methods“ in *ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, Illinois, USA, 2003, S. 533–541.
- [114] J. Neuhausen, „Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion“. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2001.

- [115] F. Biesinger, B. Kraß und M. Weyrich, „A Survey on the Necessity for a Digital Twin of Production in the Automotive Industry“ in *2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT)*, 2019, S. 1–8.
- [116] M. Liewald, „The Future in Metal Forming Production Goes Digital !“, *Applied Science and Engineering Progress*, Jg. 13, Nr. 3, 2020.
- [117] U. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro und P. Smyth, „From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases“, *AI Magazine*, Jg. 17, Nr. 3, S. 37, 1996
- [118] A. Sharafi, *Knowledge Discovery in Databases: Eine Analyse des Änderungsmanagements in der Produktentwicklung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [119] E. Wagner, B. Keller, H.-F. Jacobi und D. Spath, „Synchronization of car body requirements for the design of new product and production modules: A multi-methodological approach“, *Procedia CIRP*, Jg. 109, S. 60–65, 2022.
- [120] N. P. Suh, *Axiomatic design: Advances and applications*. New York, Oxford: Oxford University Press, 2001.
- [121] P. Zave und M. Jackson, „Four dark corners of requirements engineering“, *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, Jg. 6, Nr. 1, S. 1–30, 1997.
- [122] B. Nuseibeh und S. Easterbrook, „Requirements engineering: a roadmap“ in *ICSE - Future of SE Track*, S. 35–46.
- [123] S. Tiwari und S. Rathore, „A Methodology for the Selection of Requirement Elicitation Techniques“, 2017.
- [124] H. F. Hofmann und F. Lehner, „Requirements engineering as a success factor in software projects“, *IEEE Softw.*, Jg. 18, Nr. 4, S. 58–66, 2001.
- [125] M. Weber und J. Weisbrod, „Requirements engineering in automotive development-experiences and challenges“ in *Proceedings IEEE Joint International Conference on Requirements Engineering*, 2002, S. 331–340.
- [126] Z. Wang, W. Yang, Z. Le und F. Zhao, „A Design Method for Future Automobiles“ in *Lecture Notes in Electrical Engineering, Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 109–121.
- [127] J. Klasing, „Das ULSAB-AVC-Projekt“, *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 104, Nr. 12, S. 1128–1131, 2002.
- [128] M. Bornschlegel, „Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau“, Meisenbach, 2019.

- [129] M. T. Michaelis und H. Johannesson, „From Dedicated to Platform-Based Co-Development of Products and Manufacturing Systems“ in *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, H. A. ElMaraghy, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 196–202.
- [130] M. A. Omar, *The automotive body manufacturing systems and processes*. Chichester: Wiley, 2011.
- [131] S. Arzanpour, J. Fung, J. K. Mills und W. L. Cleghorn, „Flexible fixture design with applications to assembly of sheet metal automotive body parts“, *Assembly Automation*, Jg. 26, Nr. 2, S. 143–153, 2006.
- [132] H.-J. Franke, Hg., *Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung: Mit 33 Tabellen*. München, Wien: Hanser, 2002.
- [133] S. D. Eppinger und T. R. Browning, *Design structure matrix methods and applications*. Cambridge, Mass., London: MIT Press, 2012.
- [134] T. R. Browning, „Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions“, *IEEE Trans. Eng. Manage.*, Jg. 48, Nr. 3, S. 292–306, 2001.
- [135] A. Picot und O. Baumann, „Modularität in der verteilten Entwicklung komplexer Systeme: Chancen, Grenzen, Implikationen“, *Journal für Betriebswirtschaft*, Jg. 57, 3-4, S. 221–246, 2007.
- [136] D. Hofmann, „Verknüpfungsmodell zuverlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme“. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2013.
- [137] C. Blees, „Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien“. Dissertation, Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2011.
- [138] C. Gröger, „Industrial analytics – An overview“, *it - Information Technology*, Jg. 64, 1-2, S. 55–65, 2022.
- [139] E. Wagner, B. Keller, P. Reimann, C. Gröger und D. Spath, „Advanced analytics for evaluating critical joining technologies in automotive body structures and body shops“, *Procedia CIRP*, Jg. 112, S. 442–447, 2022.
- [140] K. J. Cios und W. Pedrycz, *Data mining: A knowledge discovery approach*. New York, NY: Springer, 2007.
- [141] D. L. Olson, *Descriptive Data Mining*. Singapore: Springer Singapore, 2017.
- [142] K. Dröder und T. Vietor, Hg., *Technologies for economical and functional light-weight design: Conference proceedings 2018*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019.

- [143] T. Wuest, D. Weimer, C. Irgens und K.-D. Thoben, „Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications“, *Production & Manufacturing Research*, Jg. 4, Nr. 1, S. 23–45, 2016.
- [144] S. García, J. Luengo und F. Herrera, *Data Preprocessing in Data Mining*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [145] T. A. Runkler, *Data Mining*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010.
- [146] D. Pyle, *Data preparation for data mining*. San Francisco, Calif.: Morgan Kaufmann, 1999.
- [147] J. P. Rohweder, G. Kasten, D. Malzahn, A. Piro und J. Schmid, „Informationsqualität — Definitionen, Dimensionen und Begriffe“ in *Daten- und Informationsqualität*, K. Hildebrand, M. Gebauer, H. Hinrichs und M. Mielke, Hg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008, S. 25–45.
- [148] C. C. Aggarwal, *Data Mining*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [149] H. Petersohn, „Data Mining: Verfahren, Prozesse, Anwendungsarchitektur“. Habilitationsschrift, Universität Leipzig, Leipzig, 2004.
- [150] J. Han, *Data mining: Concepts and techniques*, 3. Aufl. Waltham, MA: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2012.
- [151] P. Zschech, K. Heinrich, R. Horn und D. Höschele, „Towards a Text-based Recommender System for Data Mining Method Selection“ in *25th Americas Conference on Information Systems (AMCIS)*, Cancún, México: Association for Information Systems 2019, 2019.
- [152] B. Agard und A. Kusiak, „Data Mining for Subassembly Selection“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Jg. 126, Nr. 3, S. 627–631, 2004.
- [153] F. Beekmann und P. Chamoni, „Verfahren des Data Mining“ in *Analytische Informationssysteme*, P. Chamoni und P. Gluchowski, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 263–282.
- [154] V. Chandola und V. Kumar, „Summarization - Compressing Data into an Informative Representation“ in *Fifth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM'05)*, Houston, TX, USA, 2005, S. 98–105.
- [155] T. Cleff, *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2015.
- [156] B. Andreopoulos, A. An, X. Wang und M. Schroeder, „A roadmap of clustering algorithms: finding a match for a biomedical application“, *Briefings in bioinformatics*, Jg. 10, Nr. 3, S. 297–314, 2009.

- [157] S. Lloyd, „Least squares quantization in PCM“, *IEEE Transactions on Information Theory*, Jg. 28, Nr. 2, S. 129–137, 1982.
- [158] M. J., „Some methods for classification and analysis of multivariate observations“ in *In 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1967, S. 281–297.
- [159] H. K. Kanagala und V. V. Jaya Rama Krishnaiah, „A comparative study of K-Means, DBSCAN and OPTICS“ in *2016 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, 2016, S. 1–6.
- [160] C. Beierle und G. Kern-Isberner, „Maschinelles Lernen“ in *Computational Intelligence, Methoden wissensbasierter Systeme*, C. Beierle und G. Kern-Isberner, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 99–160.
- [161] F. Beekmann, „Stichprobenbasierte Assoziationsanalyse im Rahmen des knowledge discovery in Databases“. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Essen, 2003.
- [162] D. A. Gebala und S. D. Eppinger, „Methods for Analyzing Design Procedures“ in *Proceedings of the ASME Third International Conference in Design Theory and Methodology*, Miami, USA, 1991, S. 227–233.
- [163] A. Yassine und D. Braha, „Complex Concurrent Engineering and the Design Structure Matrix Method“, *Concurrent Engineering*, Jg. 11, Nr. 3, S. 165–176, 2003.
- [164] F. Borjesson und K. Hölttä-Otto, „A module generation algorithm for product architecture based on component interactions and strategic drivers“, *Res Eng Design*, Jg. 25, Nr. 1, S. 31–51, 2014.
- [165] K. Hölttä-Otto, N. A. Chiriac, D. Lysy und E. Suk Suh, „Comparative analysis of coupling modularity metrics“, *Journal of Engineering Design*, Jg. 23, 10-11, S. 790–806, 2012.
- [166] P. J. Newcomb, B. Bras und D. W. Rosen, „Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle“, *Journal of Mechanical Design*, Jg. 120, Nr. 3, S. 483–490, 1998.
- [167] D. E. Whitney, Q. Dong, J. Judson und G. Mascoli, „Introducing Knowledge-Based Engineering Into an Interconnected Product Development Process“ in *ASME 1999 Design Engineering Technical Conferences*, Las Vegas, Nevada, USA, 1999, S. 351–360.
- [168] A. Jose und M. Tollenaere, „Modular and platform methods for product family design: literature analysis“, *J Intell Manuf*, Jg. 16, Nr. 3, S. 371–390, 2005.

- [169] T.-L. Yu, A. A. Yassine und D. E. Goldberg, „An information theoretic method for developing modular architectures using genetic algorithms“, *Res Eng Design*, Jg. 18, Nr. 2, S. 91–109, 2007.
- [170] F. Bendix, R. Kosara und H. Hauser, „Parallel sets: visual analysis of categorical data“ in *IEEE Symposium on Information Visualization, 2005. INFOVIS 2005*, Minneapolis, MN, USA, 2005, S. 133–140.
- [171] T. Alqurashi und W. Wang, „Clustering ensemble method“, *Int. J. Mach. Learn. & Cyber.*, Jg. 10, Nr. 6, S. 1227–1246, 2019.
- [172] A. Lancichinetti und S. Fortunato, „Consensus clustering in complex networks“, *Scientific reports*, Jg. 2, S. 336, 2012.
- [173] J. Wu, H. Liu, H. Xiong, J. Cao und J. Chen, „K-Means-Based Consensus Clustering: A Unified View“, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, Jg. 27, Nr. 1, S. 155–169, 2015.
- [174] T. Li und C. Ding, „Weighted Consensus Clustering“ in *Proceedings of the 2008 SIAM International Conference on Data Mining*, 2008, S. 798–809.
- [175] S. Monti, P. Tamayo, J. Mesirov und T. Golub, „Consensus Clustering: A Resampling-Based Method for Class Discovery and Visualization of Gene Expression Microarray Data“, *Machine Learning*, Jg. 52, Nr. 1, S. 91–118, 2003.
- [176] Y. Ren, C. Domeniconi, G. Zhang und G. Yu, „Weighted-Object Ensemble Clustering“ in *2013 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*, Dallas, TX, USA, 2013, S. 627–636.
- [177] A. Banerjee, A. K. Pujari, C. Rani Panigrahi, B. Pati, S. Chandan Nayak und T.-H. Weng, „A new method for weighted ensemble clustering and coupled ensemble selection“, *Connection Science*, Jg. 33, Nr. 3, S. 623–644, 2021.
- [178] O. Ezzat *et al.*, „A DSM Clustering Method for Product and Service Modularization“ in *IFIP Advances in Information and Communication Technology, Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future*, F. Ameri, K. E. Stecke, G. von Cieminski und D. Kiritsis, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 375–382.



In der sich stetig verändernden Automobilindustrie sehen sich Hersteller mit einer Vielzahl von Herausforderungen konfrontiert: volatile Nachfragen, steigende Produktvielfalten und der Übergang zu alternativen Antriebstechnologien. Um die vielfältigen technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Anforderungen an die Karosserie und den Karosseriebau vollständig zu bewältigen, wurde in dieser Arbeit ein multimethodisches Verfahren entwickelt. Dieses multimethodische Verfahren basiert auf der systematischen Identifizierung und Analyse der Anforderungen sowie auf der Nutzung von Expertenwissen und Datenanalysen. Es ermöglicht die Bildung von Modulen, die den individuellen Bedürfnissen entsprechen und gleichzeitig interne Abhängigkeiten sowie Restriktionen berücksichtigen. Die erfolgreiche Anwendung an einer neuen vollelektrischen Fahrzeugarchitektur sowie die Steigerung des Erfüllungsgrades der Anforderungen um bis zu 14 % unterstreichen die Wirksamkeit dieses Verfahrens. Dies führt zu einer höheren Umsetzungsqualität und wirtschaftlichem Nutzen im Vergleich zu den bisherigen Modularisierungsansätzen.