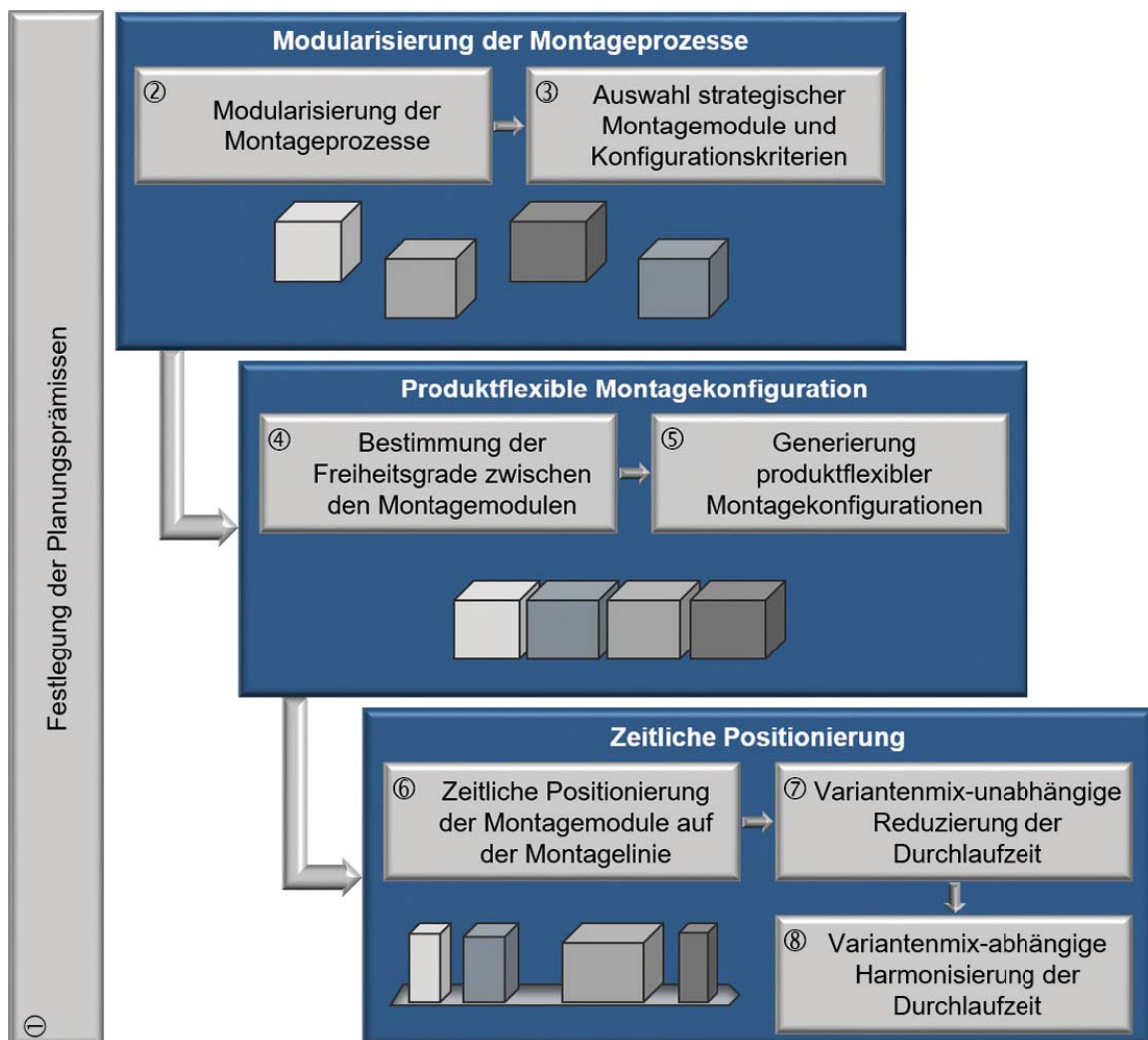


CHRISTIAN KÜBER

# Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage

Am Beispiel der Automobilindustrie



**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Christian Küber

**Methode zur Planung modularer, produkt-  
flexibler Montagekonfigurationen in der  
variantenreichen Serienmontage – am Beispiel  
der Automobilindustrie**

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-00, Telefax 07 11 9 70-13 99  
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

**STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG****Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl  
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart  
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart  
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)  
der Universität Stuttgart

Titelbild: © Christian Küber

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-1232-3

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2017

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart  
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2017

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-25 00  
Telefax 07 11 9 70-25 08  
E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)  
URL <http://verlag.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 DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper



**Methode zur Planung  
modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen  
in der variantenreichen Serienmontage  
-am Beispiel der Automobilindustrie-**

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

**Christian Küber**

aus Wangen im Allgäu

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.  
Engelbert Westkämper

Mitberichter: Prof. Dr. rer. pol. habil. Hans-Georg Kemper

Tag der mündlichen Prüfung: 14.06.2017

Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering  
Universität Stuttgart

2017



---

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit bei der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) an der Universität Stuttgart und einem Forschungspartner der Automobilindustrie.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper. Die zahlreichen Fachgespräche und seine Denkanstöße haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Zudem bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. pol. habil. Hans-Georg Kemper für sein großes Engagement als Mitberichter.

Besonders herzlich möchte ich mich bei Herrn Hans-Friedrich Jacobi für die regelmäßigen Feedbackgespräche sowie seine außerordentliche Unterstützung während der Korrekturphase bedanken.

Ich danke auch Herrn Dr.-Ing. Bernd Keller für seine Unterstützung und die fachlichen Diskussionen. Gleichmaßen möchte ich meinen Dank meinen Arbeitskollegen für die freundschaftliche Zusammenarbeit aussprechen.

Weiter möchte ich mich bei den Mitarbeitern und Doktoranden der GSaME sowie bei den Mitarbeitern des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, des Fraunhofer IPA und des Forschungscampus ARENA2036 bedanken.

Mein herzlichster Dank gilt meinen Eltern Barbara und Josef Küber. Sie waren zu jeder Zeit und in allen Lebenssituationen bedingungslos für mich da. Ich hatte bei all meinen Entscheidungen ihre volle Unterstützung. Dadurch haben sie maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Ebenso gilt mein besonderer Dank meiner Schwester Nikola.

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern und meiner Schwester.



---

## **Kurzzusammenfassung**

Die Automobilindustrie sieht sich mit der Herausforderung eines wachsenden Produktportfolios und neuer Fahrzeugtechnologien konfrontiert. Dadurch ist zukünftig die Nachfrageentwicklung kaum noch prognostizierbar und folglich auch nicht das fahrzeugspezifische Nachfragevolumen. Besondere Bedeutung ergibt sich daraus für das Gewerk der Montage, in dem ein Großteil der Fahrzeugvarianz entsteht. Indem mehr als ein Fahrzeug variantenmix-unabhängig auf einer gemeinsamen Linie montierbar ist, kann die Kapazität der Montagelinie für unterschiedliche Fahrzeuge bedarfsorientiert genutzt werden. Nachweislich existieren Freiheitsgrade in der Anordnung von Montagemodulen, die Arbeitsvorgänge zum Verbau einer Baugruppe bzw. eines Bauteils beinhalten. In der heutigen Montageplanung werden diese jedoch nicht methodisch genutzt. Darin besteht die Forschungslücke. Die entwickelte Planungsmethode nutzt die Freiheitsgrade zwischen zuvor definierten, fahrzeug- und linienübergreifenden Montagemodulen für die Konfiguration fahrzeugflexibler Endmontagelinien.

---

## Short Summary

In the future, the automotive industry has to manage a further increasing product portfolio and new vehicle technologies. In consequence, the vehicle-specific demand volume is not predictable anymore. Thereby especially the assembly lines are affected, because they realize the biggest outcome of the vehicle variability. If it is possible to assemble more than one vehicle on the same assembly line without any restrictions in the variation mix, the future challenge could be managed. There exist degrees of freedom between assembly modules, which allow building up alternative assembly configurations. The research gap currently is that in the assembly planning the degrees of freedom are not used methodically, although the planning of vehicle-flexible assembly configurations could be supported. As a result, assembly modules have to be defined. After analyzing the vehicle and the assembly line specific degrees of freedom between these assembly modules, it is possible to configure modular, product-flexible assembly lines, which also allow the integration of new models into existing lines.

---

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	VIII
Tabellenverzeichnis .....	XI
Formelverzeichnis.....	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XIV
1 Einleitung .....	1
1.1 Ausgangssituation .....	3
1.2 Herausforderungen .....	7
1.3 Zielsetzung.....	9
1.4 Forschungskonzeption .....	11
2 Bisherige Lösungsansätze zur Planung produktflexibler Montagelinien.....	14
2.1 Montageplanung in der variantenreichen Serienmontage .....	15
2.1.1 Produkt- und Montagestruktur in der Automobilindustrie .....	15
2.1.2 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit.....	19
2.1.3 Produktionslogistik und interdependente Planungsziele in der Automobilindustrie .....	23
2.1.4 Montageplanung in der Wissenschaft und Anwendung .....	29
2.2 Modularisierung von Produkten und Prozessen .....	32
2.2.1 Gründe für die Produktmodularisierung .....	32
2.2.2 Ansätze zur Modularisierung von Montageprozessen .....	35
2.3 Planung produktflexibler Montagelinien.....	39
2.3.1 Eigenschaften fahrzeugflexibler Montagelinien.....	39
2.3.2 Ansätze zur Planung produktflexibler Serienmontagen .....	40

---

2.4	Reflexion bestehender, wissenschaftlicher Ansätze zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen .....	47
3	Grundlagen zur Planung fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen .....	51
3.1	Eingangsgrößen der Montageplanung .....	51
3.1.1	Strategische und taktische Montageplanung .....	51
3.1.2	Greenfield- und Brownfield-Planung .....	53
3.1.3	Montagenetzwerk und Montagestandorte als Einflussgrößen .....	55
3.2	Steuergrößen der automobilen Endmontage .....	56
3.2.1	Montagezeiten .....	56
3.2.2	Variantenmix .....	60
3.2.3	Effizienzsteigerungen .....	61
3.3	Aufbau und Bewertung von Vorranggraphen .....	63
3.3.1	Vorranggraphen .....	63
3.3.2	Aufbau von Mischgraphen .....	65
3.3.3	Lösungsverfahren zur Bestimmung linearer Montagekonfigurationen .....	66
3.3.4	Bewertung alternativer Montagekonfigurationen .....	68
3.4	Zusammenfassende Betrachtung .....	69
4	Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen .....	71
4.1	Zielbild der Planungsmethode .....	71
4.2	Methodisches Vorgehen bei der Ausplanung produktflexibler, modularer Montagelinien .....	73
5	Detaillierung der Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen .....	78
5.1	Festlegung der Planungsprämissen .....	78

5.2	Modularisierung der Montageprozesse .....	80
5.2.1	Modularisierung der Fahrzeuge und der Montageprozesse.....	81
5.2.2	Verknüpfung von Produkt- und Montagemodulen.....	86
5.2.3	Ermittlung der Montagezeiten für die Montagemodule.....	88
5.3	Auswahl strategischer Montagemodule und Konfigurationskriterien.....	90
5.3.1	Kriterien zur Bestimmung strategischer Montagemodule.....	91
5.3.2	Kriterien zur Bewertung alternativer Montagekonfigurationen.....	92
5.3.3	Optimierungen innerhalb der Montagemodule.....	94
5.4	Bestimmung der Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen.....	95
5.4.1	Fahrzeug- und montagespezifische Bestimmung der Freiheitsgrade .....	96
5.4.2	Überlagerung der Freiheitsgrade aller zu montierenden Fahrzeuge und der Montagelinie .....	101
5.5	Generierung produktflexibler Montagekonfigurationen .....	103
5.5.1	Rechnergestützter Aufbau möglicher Montagekonfigurationen.....	104
5.5.2	Paarweiser Vergleich zur Bewertung alternativer Montagekonfigurationen .....	110
5.5.3	Montagekonfigurationen für eine Green- und Brownfield-Planung .....	113
5.5.4	Bewertung der Montagekonfigurationen .....	116
5.6	Zeitliche Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie .....	119
5.6.1	Fahrzeugspezifische Visualisierung der gesamten Montagedauer und der Montagemodule.....	120
5.6.2	Zuteilung der strategischen und flexiblen Montagemodule .....	121
5.6.3	Grobbandbelegung nach der produktflexiblen Montagekonfiguration .....	124

---

5.6.4	Umgang mit fahrzeugspezifisch unterschiedlichen Gesamtmontagezeiten .....	126
5.7	Variantenmix-unabhängige Reduzierung der Durchlaufzeit ....	127
5.7.1	Erhöhung der AK-Dichte.....	129
5.7.2	Verblockung .....	130
5.7.3	Vertauschung .....	131
5.7.4	Parallelisierung.....	132
5.8	Variantenmix-abhängige Harmonisierung der Durchlaufzeit ...	133
5.8.1	Anpassung der AK-Dichte .....	135
5.8.2	Anpassung des Automatisierungsgrades .....	136
5.8.3	Anpassung der Vormontageumfänge .....	137
5.9	Integration der entwickelten Planungsmethode in die IT-Struktur .....	138
6	Validierung – Konfiguration modularer, fahrzeugflexibler Montagelinien in der Automobilindustrie .....	143
6.1	Erprobung der entwickelten Planungsmethode .....	143
6.1.1	Festlegung der Planungsprämissen .....	145
6.1.2	Modularisierung der Montageprozesse.....	146
6.1.3	Produktflexible Montagekonfigurationen.....	149
6.1.4	Zeitliche Positionierung .....	155
6.2	Reflexion der Planungsergebnisse.....	157
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	161
7.1	Zusammenfassung.....	161
7.2	Ausblick.....	165
	Summary .....	167
	Glossar .....	171
	Literaturverzeichnis.....	176

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Systemebenen der Produktion - Einordnung der Arbeit .....	2
Abbildung 1-2:	Entwicklung des Produktportfolios und der Nachfrage am Beispiel des Kompaktwagensegments der Daimler AG .....	3
Abbildung 1-3:	Nachfrageänderungen am Beispiel des Werks der Daimler AG in Rastatt .....	4
Abbildung 1-4:	Vorteile produktflexibler Montagelinien .....	8
Abbildung 1-5:	Zielsetzung der zu entwickelnden Planungsmethode.....	10
Abbildung 1-6:	Aufbau und Gliederung der wissenschaftlichen Arbeit nach (Ulrich 2001) .....	12
Abbildung 2-1:	Forschungsbereiche zur montagemodulbasierten Konfiguration produktflexibler Montagelinien.....	14
Abbildung 2-2:	Produktstruktur der Automobilindustrie in Anlehnung an (Löffler 2011) .....	16
Abbildung 2-3:	Montagestruktur in der Automobilindustrie .....	18
Abbildung 2-4:	Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an (Wiendahl et al. 2009).....	21
Abbildung 2-5:	Das Strategische Entscheidungsquadrat .....	26
Abbildung 2-6:	Szenarienbasierte Ermittlung der Stückkosten.....	28
Abbildung 2-7:	Verknüpfung der Produkt- und Montagestruktur .....	37
Abbildung 2-8:	Forschungslücke.....	50
Abbildung 3-1:	Technologiekalender in Anlehnung an (Westkämper 2004) und der Einfluss auf die Organisation der Montageplanung .....	52
Abbildung 3-2:	Einfluss der strategischen auf die taktische Montageplanung .....	53
Abbildung 3-3:	Korridor der Flexibilität hinsichtlich der Betriebsnutzungszeit.....	57

---

Abbildung 3-4:	Gerichteter, gewichteter Graph in Anlehnung an (Domschke et al. 2015).....	63
Abbildung 4-1:	Zielbild der zu entwickelnden Planungsmethode .....	72
Abbildung 4-2:	Gesamtdarstellung aller Planungsschritte der entwickelten Methode .....	74
Abbildung 5-1:	Planungsprämissen .....	79
Abbildung 5-2:	Produktmodularisierung zur Reduzierung von Taktzeitspreizungen in der Endmontage.....	82
Abbildung 5-3:	Methode zur Bestimmung von Produkt- und Montagemodulen .....	85
Abbildung 5-4:	Harmonisierung fahrzeugspezifischer Produktmodule in einem Montagemodul.....	87
Abbildung 5-5:	Dependenz zwischen der Produkt- und Prozessebene (Logistik und Montage) .....	88
Abbildung 5-6:	Zuteilung der Arbeitsvorgänge auf Mitarbeiter .....	90
Abbildung 5-7:	Weiterentwicklung von standardisierten Montage- modulen.....	94
Abbildung 5-8:	Adjazenzmatrix zur Bestimmung der Freiheitsgrade.....	98
Abbildung 5-9:	Überlagerung mehrerer Adjazenzmatrizen.....	102
Abbildung 5-10:	Bestimmung der Montagekonfigurationen am Beispiel ausgewählter Montagemodule .....	106
Abbildung 5-11:	Auswirkungen der Anzahl an Montagemodulen und Freiheitsgraden auf die benötigte Rechenleistung .....	107
Abbildung 5-12:	Prozesse einer objektiven, IT-unterstützten Filterung nicht erfolgsversprechender Konfigurationsansätze.....	109
Abbildung 5-13:	Bewertung möglicher Montagekonfigurationen .....	112
Abbildung 5-14:	Sensibilitätsanalyse .....	118



Abbildung 5-15: Montage eines Gesamtfahrzeuges - die Summe der Montagedauer der strategischen und flexiblen Montagemodule .....	122
Abbildung 5-16: Zuteilung der flexiblen Montagemodule zu den strategischen Montagemodulen .....	124
Abbildung 5-17: Stellhebel zur variantenmix-unabhängigen Reduzierung der Durchlaufzeit.....	128
Abbildung 5-18: Stellhebel zur variantenmix-abhängigen Harmonisierung der Durchlaufzeit.....	134
Abbildung 5-19: Verknüpfungen der Daten zwischen der Fahrzeugentwicklung und der Montageplanung.....	139
Abbildung 5-20: Beispiel für die Darstellung der Daten eines Montagemoduls .....	140
Abbildung 5-21: Prototyp einer IT-basierten Grobbandbelegung anhand einer visualisierten Montagekonfiguration .....	141
Abbildung 6-1: Bausteine zur Planung modularer, produktflexibler Montagelinien .....	145
Abbildung 6-2: Zuteilung der flexiblen zu den strategischen Montagemodulen .....	155
Abbildung 6-3: Zeitliche Positionierung der Montagemodule unter Einhaltung der ausgewählten Montagekonfiguration.....	156

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Analyseergebnis zur Einhaltung einer standardisierten Montagekonfiguration .....	6
Tabelle 2-1:	Produktionslogistik - Auswahl alternativer Logistikkonzepte.....	24
Tabelle 2-2:	Bewertung eines Auszugs bisheriger Lösungsansätze.....	48
Tabelle 5-1:	Taktzeitspreizungen in der Hauptmontage durch den Verbau varianter Bauteile in Anlehnung an (Aisenbrey et al.) ....	81
Tabelle 5-2:	Montage- und Logistikkriterien.....	93
Tabelle 5-3:	Beispielhafte Bewertung möglicher Montagekonfigurationen anhand fixer und variabler Kosten.....	111
Tabelle 5-4:	Montagekonfigurationen für eine Green- und Brownfield-Planung .....	113
Tabelle 5-5:	Erhöhung der Freiheitsgrade zur Integration eines Fahrzeuges auf einer bestehenden Montagelinie .....	115
Tabelle 5-6:	Lösungsmenge der Montagekonfigurationen.....	116
Tabelle 5-7:	Identifikation und Bewertung produktflexibler Montagekonfigurationen .....	117
Tabelle 5-8:	Zeitliche Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie.....	120
Tabelle 5-9:	Bewertung möglicher Vorgehensweisen zur Positionierung der flexiblen Montagemodule auf der Montagelinie ....	123
Tabelle 5-10:	Lösungen zum Umgang mit unterschiedlichen Montagezeiten zwischen den Produkten und der Linie.....	126
Tabelle 5-11:	Beispiel zur variantenmix-unabhängigen Erhöhung der AK-Dichte .....	129
Tabelle 5-12:	Beispiel zur variantenmix-unabhängigen Verblockung von Montagemodulen .....	130

Tabelle 5-13:	Beispiel zur variantenmix-unabhängigen Vertauschung von Montagemodulen .....	131
Tabelle 5-14:	Beispiel zur variantenmix-unabhängigen Parallelisierung von Montagemodulen .....	133
Tabelle 5-15:	Beispiel für die variantenmix-abhängige Anpassung der AK-Dichte .....	135
Tabelle 5-16:	Beispiel zur variantenmix-abhängigen Anpassung des Automatisierungsgrades .....	136
Tabelle 5-17:	Beispiel für die variantenmix-abhängige Anpassung der Vormontageumfänge .....	138
Tabelle 6-1:	Überblick der Realdaten für die Validierung.....	144
Tabelle 6-2:	Planungsprämissen für die Validierung .....	146
Tabelle 6-3:	Strategische Montagemodule der Green- und Brownfield-Planung .....	147
Tabelle 6-4:	Montage- und Logistikkriterien.....	148
Tabelle 6-5:	Kriterien-Ausprägungen einzelner Montagemodule (Auszug).....	149
Tabelle 6-6:	Überlagerte Matrix zweier Fahrzeugarchitekturen und einer Montagelinie für die Brownfield-Planung.....	150
Tabelle 6-7:	Konstruktive Fahrzeuganpassungen zur Erzielung der Integrationsfähigkeit .....	152
Tabelle 6-8:	Auszug generierter Montagekonfigurationen .....	154
Tabelle 6-9:	Gegenüberstellung der Planungsdauer des konventionellen und des neu entwickelten Planungsvorgehens (Schätzwerte) .....	159

---

## Formelverzeichnis

Formel 2-1:	Stückkosten zur Bewertung von Alternativen.....	27
Formel 3-1:	Mathematischer Zusammenhang der Steuergrößen in der Montageplanung.....	59
Formel 5-1:	Anzahl zu bestimmender Vorgänger- und Nachfolger- Beziehungen zwischen den Montagemodulen.....	97

---

## Abkürzungsverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
AK	Arbeitskraft
ARENA2036	Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles 2036
AVO	Arbeitsvorgang
BI	Business Intelligence
BNZ	Betriebsnutzungszeit
DLZ	Durchlaufzeit
GSaME	Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
JiS	Just-in-Sequence
JiT	Just-in-Time
Kap.	Kapitel
KVP	kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MM	Montagemodul
MTE	Montagezeit pro Einheit
MTM	Methods-Time Measurement
OEM	Original Equipment Manufacturer (übersetzt: Erstausrüster)
PM	Produktmodul
Sek.	Sekunden
TSP	Traveling Salesman Problem

---

# 1 Einleitung

*„Lernen ist wie Rudern gegen den Strom.  
Hört man damit auf, treibt man zurück.“ (Laozi)*

Die variantenreiche Serienmontage der Automobilindustrie des 21. Jahrhunderts wird durch eine Vielzahl gegenwärtiger und für die Zukunft sich bereits abzeichnender Herausforderungen nachhaltig geprägt. Der Trend eines anwachsenden Produktportfolios bei den Herstellern ist auf den zunehmenden Kundenwunsch nach individuell konfigurierbaren Fahrzeugen zurückzuführen. Verstärkt wird dies durch weltweit abweichende Kunden- und Marktanforderungen. Entwicklungen alternativer Antriebe führen ebenfalls zum Anstieg der angebotenen Fahrzeugmodelle und gleichzeitig werden Substitutionseffekte zwischen verbrennungsmotorischen und elektrischen Antrieben erwartet. Ausgehend von diesen Randbedingungen wird eine zuverlässige Stückzahlprognose zukünftig nicht mehr möglich sein (Wallentowitz *et al.* 2009).

Die bekannte Struktur eines produzierenden Unternehmens (Westkämper *et al.* 2009) gilt auch für die Automobilindustrie (Löffler 2011) und soll zur Einordnung dieser Arbeit dienen. Auf der übergeordneten Ebene des Produktionssystems lässt sich das Produktionsnetzwerk verorten (vgl. Abbildung 1-1). Unterhalb der Ebene der Produktionsstandorte ist im Rahmen der Produktionssegmentierung neben dem Presswerk, dem Rohbau/Karosseriebau und der Oberflächenbehandlung auch die Montage lokalisiert. Die wesentlichen Teiloperationen der Montage sind: Fügen, Justieren, Prüfen, Handhaben und Sonderfunktionen (VDI 2860). Die Endmontage eines Fahrzeuges weist im Herstellungsprozess die höchste Kapitalbindung auf, da die dort zu montieren-

den Umfänge bereits alle wertschöpfenden Prozesse durchlaufen haben. Zudem findet ein Großteil der kundenspezifischen Fahrzeugkonfiguration in der Montage statt (Klug 2010).

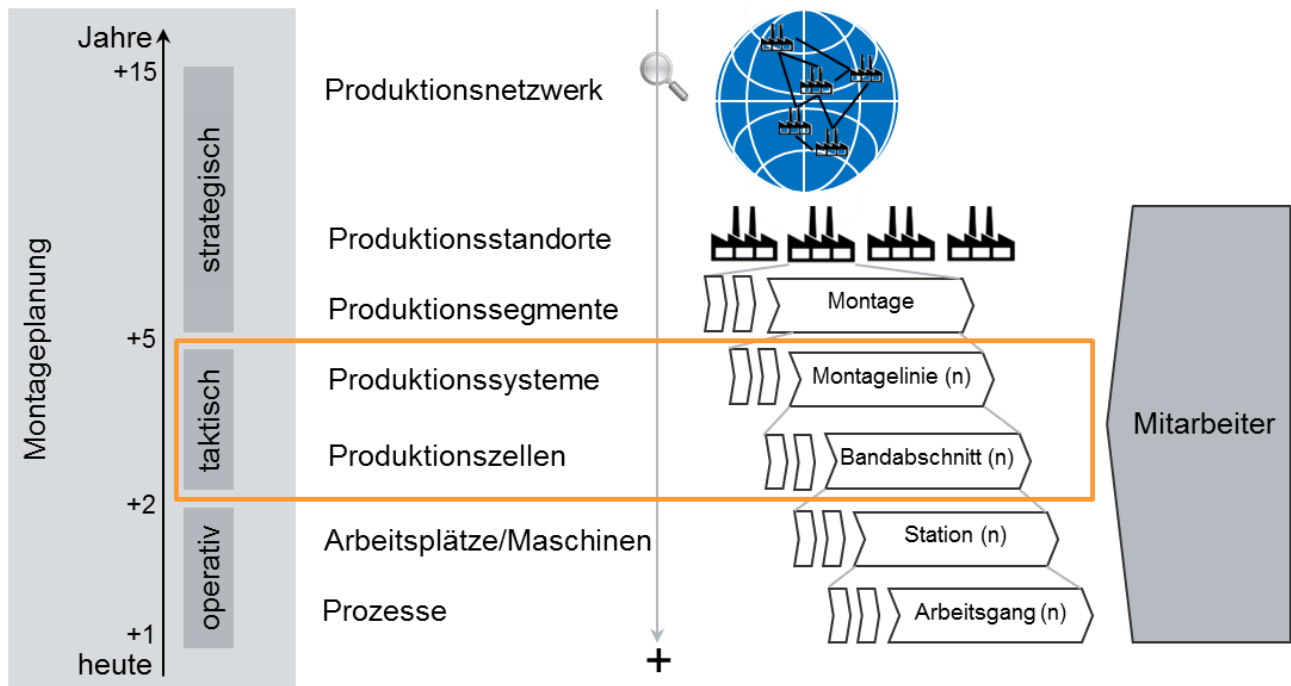


Abbildung 1-1: Systemebenen der Produktion - Einordnung der Arbeit

Mit Bezug zu diesem Einordnungsschema sind nachfolgend die Produktionssysteme und -zellen Gegenstand der weiteren Untersuchung. Organisatorisch ist die Arbeit bei der taktischen Montageplanung angesiedelt und dient hier der Planung neuer bzw. Weiterentwicklung bestehender Endmontagelinien. Die Planung gliedert sich dabei in die Grob- und Feinplanung. Auf der Ebene der Grobplanung, auf der diese Arbeit verortet ist, spielt der Faktor Mensch und damit Themen wie Ergonomie, Laufwege usw. eine untergeordnete Rolle und wird daher im Weiteren nicht weiter betrachtet. Nachdem das Thema anhand der Systemebenen der Produktion und des Planungshorizonts eingeordnet ist, wird im Weiteren die derzeitige Ausgangssituation in der Automobilindustrie beleuchtet. Hierzu zählen die Identifikation der gegenwärtigen Problemfelder

sowie die zukünftigen Herausforderungen und das Aufzeigen der möglichen Problemlösung bzw. das Bewältigen der Herausforderungen.

## 1.1 Ausgangssituation

Eine langfristige Prognose über Nachfrageentwicklungen ist in volatilen Märkten nahezu unmöglich. Neben konjunkturellen Auslösern schwankt die Nachfrage auch zwischen den angebotenen Fahrzeugklassen. Gründe hierfür sind ein erweitertes Portfolio und eine regelmäßige Modellpflege. Dies wird am Beispiel des Kompaktwagensegments der Daimler AG verdeutlicht (vgl. Abbildung 1-2). Von ursprünglich einer Baureihe (A-Klasse) im Jahre 1997 wurde das Produktportfolio innerhalb von 20 Jahren auf sechs angebotene Modelle erweitert. In den Jahren der wirtschaftlichen Krise 2008 bis 2010 sind die Absatzzahlen konjunkturbedingt zurückgegangen.

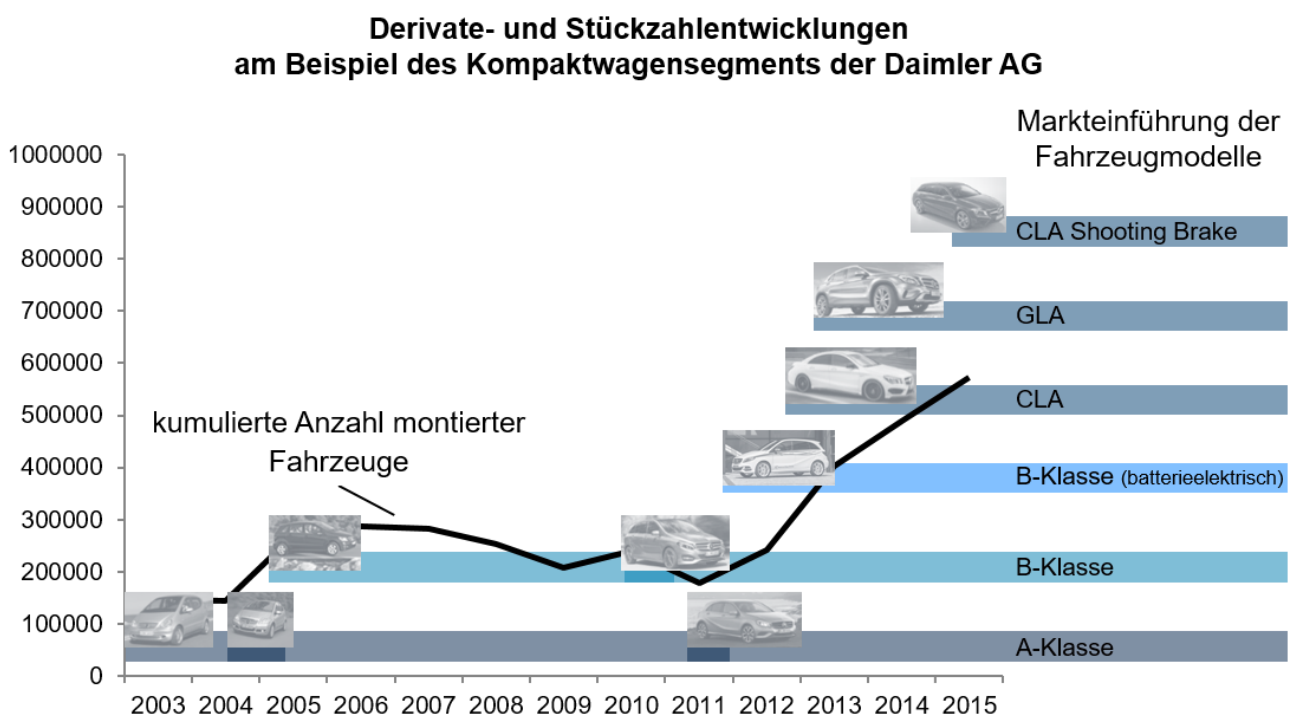


Abbildung 1-2: Entwicklung des Produktportfolios und der Nachfrage am Beispiel des Kompaktwagensegments der Daimler AG



In der variantenreichen Serienmontage kann in der Regel nur eine begrenzte Anzahl an Fahrzeugmodellen auf einer Linie montiert werden. Dies liegt u.a. an fahrzeugabhängig unterschiedlichen Montagezeiten und -umfängen. Abbildung 1-3 verdeutlicht exemplarisch für zwei Montagelinien des Daimler Werks in Rastatt die Zunahme der Fahrzeuge, die auf den Linien montiert werden sowie die Nachfrageschwankung zwischen den Fahrzeugen.

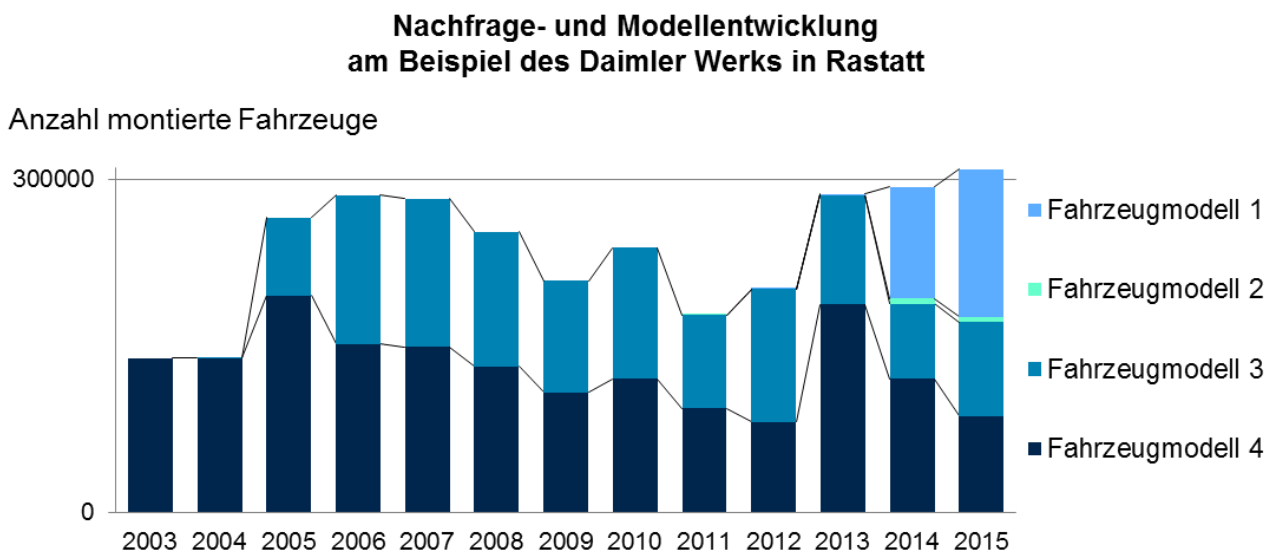


Abbildung 1-3: Nachfrageänderungen am Beispiel des Werks der Daimler AG in Rastatt

Derzeit fußen Montageplanungen auf standardisierten Montagereihenfolgen, d.h. Baugruppen bzw. Bauteile werden in einer festgelegten Reihenfolge in der Hauptlinie montiert. Die definierte Anordnung der Montageprozesse auf der Linie wird in dieser Arbeit als Montagekonfiguration bezeichnet. Damit zukünftige Fahrzeuge ebenfalls auf den bestehenden Linien montierbar sind, wird die Abfolge von Montageprozessen standardisiert und dient als Vorgabe für die Fahrzeugentwicklung. Bei einem Automobilhersteller wurde die bestehende, standardisierte Montagereihenfolge den realen Montagekonfigurationen gegenübergestellt. Das in Tabelle 1-1 dargestellte Analyseergebnis zeigt, dass die Standard-Montagekonfiguration in keiner der untersuchten Montagelinien ein-

gehalten wird. Lediglich die grün hinterlegten Felder repräsentieren Montageprozesse zum Verbau von Baugruppen bzw. Bauteilen, die der standardisierten Montagekonfiguration folgen. Fahrzeugspezifische Bauteile wurden nicht negativ bewertet und sind mit „nicht vorhanden“ hinterlegt. Beispielsweise entfällt der Montageschritt zum Einbau des Softverdecks bei den Fahrzeugen, die nicht als Cabrio angeboten werden. Infolgedessen sind auch die dafür notwendigen Stationen in der Montagelinie nicht vorhanden.

Die Diskrepanz zwischen den realen und der standardisierten Montagekonfigurationen kann zum einen darauf zurückgeführt werden, dass die Montager Reihenfolgen neuer Fahrzeuge von bisherigen abweichen und dadurch eine regelmäßige Anpassung des Standards der Montager Reihenfolge notwendig wird. Gleichzeitig müssten die bestehenden Montagelinien bei jeder Änderung des Standards angepasst werden. Konkret würde das zum Hinzufügen, Eliminieren und Neuordnungen von Montagestationen führen und gegebenenfalls auch Umbaumaßnahmen an der Gebäudestruktur nach sich ziehen. Auch weitere Bereiche wie die Logistik wären davon betroffen. Sofern die Fahrzeuge dennoch auf der bestehen Montagekonfiguration montierbar sind, wird aus wirtschaftlichen und zeitlichen Gründen daher meist von einer Adaption der standardisierten Anordnung der Montageprozesse abgesehen. Infolgedessen wird ein neuer „Standard“ nur in neu zu planenden Montagelinien umgesetzt. Werden neue bzw. zusätzliche Fahrzeugmodelle auf einer bestehenden Montagelinie integriert, erfolgt die Planung deshalb für jede Montagelinie gesondert. Der Mehrwert einer standardisierten Montager Reihenfolge als Vorgabe für die Fahrzeugentwicklung, sodass Fahrzeuge ohne großen Zeit- und Kostenaufwand in die bestehenden Linien integriert werden können, kann dadurch nicht erzielt werden.

Einhaltung der standardisierten Montagekonfiguration in realen Montagelinien					
Montage- linie	standardisierte Montage- konfiguration	Montagelinien Fahrzeug- architektur 1	Montagelinien Fahrzeug- architektur 2	Montagelinien Fahrzeug- architektur 3 u. 4	Montagelinien aller Fahrzeug- architekturen
	Barcode				
	Tür-Demontage				
	FIN				
	Dachsysteme				
	Schrauben LDP			nicht vorhanden	nicht vorhanden
	E-Mulde	nicht vorhanden		nicht vorhanden	nicht vorhanden
	Kabelsatz				
	E/E-Komp.				
	Rückwand				
	Cockpit				
	Softverd. Cabrio	nicht vorhanden		nicht vorhanden	nicht vorhanden
	Batterie				
	Himmel				
	Scheiben				
	E/E-Prüf.				
	Teppich				
	Seitenverkleid.				
	Kantenschutz				
	Unterboden				
	Hochzeit				
	Sitze				
	Frontmodul				
	Räder				
	CW-Teile				
	E/E flashen				
	Fußmatten				
	Tanken/Türenr.				
	Befüllen				
	M.-Erstst.				
	Abfahren				

100% Einhaltung der Standardkonfiguration  
in den Montagelinien

< 100% Einhaltung der Standardkonfiguration  
in den Montagelinien

Tabelle 1-1: Analyseergebnis zur Einhaltung einer standardisierten Montagekonfiguration

Das Analyseergebnis bedeutet aber auch, dass gegenüber der geplanten Standardkonfiguration Wahlmöglichkeiten in der Anordnung von Montageprozessen existieren, die auch als „Freiheitsgrade“ bezeichnet werden können (Bullinger *et al.* 1986). In Tabelle 1-1 werden diese durch die weißen Felder repräsentiert. Da Montagelinien in der Realität meist nicht die standardisierte Montagekonfiguration widerspiegeln (vgl. Tabelle 1-1), bietet es sich an, diese Freiheitsgrade gezielt für die Montageplanung zu nutzen. Das Wissen darüber liegt bei den Planungsexperten zwar vor, wird allerdings nicht methodisch genutzt.

## **1.2 Herausforderungen**

Zukünftig wird das Fahrzeugportfolio aufgrund der steigenden, überwiegend markt-, kunden- und gesetzgetriebenen Differenzierung weiter wachsen und die Nachfrageentwicklung wird kaum noch prognostizierbar sein. Dies verdeutlichen abweichende Zukunftserwartungen. So veröffentlichte die NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT für Deutschland die erwarteten Zahlen zukünftig angemeldeter Elektrofahrzeuge. Für das Jahr 2017 werden 200.000 angemeldete Elektrofahrzeuge vorausgesagt. Für das Jahr 2020 wird ein Anstieg auf 600.000 bis 1.000.000 prognostiziert (Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) 2016). Die kumulierte Nachfrage zwischen 2017 und 2020 variiert für den deutschen Markt damit um 400.000 Fahrzeuge. Eine verlässliche Prognose für die weltweite Nachfrage nach batterieelektrischen Fahrzeugen wird durch die schwankenden Ölpreise und länderspezifischen Anreizsysteme für den Kauf von Elektrofahrzeugen zusätzlich erschwert. Diese Entwicklungen werden auch Auswirkungen auf die Nachfrage nach Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben haben. Die Zeitspanne zwischen einer verlässlichen Prognose und dem Eintreten dieser wird zukünftig nicht

ausreichen, um die Montagelinien im Produktionsnetzwerk auf die veränderten Nachfragestrukturen wirtschaftlich anpassen zu können. Sind Montagelinien nicht fahrzeugflexibel, resultiert eine Nachfrageverschiebung zwischen den Fahrzeugen in einem Delta zwischen Nachfrage und Kapazität der jeweiligen Montagelinie (vgl. Abbildung 1-4).

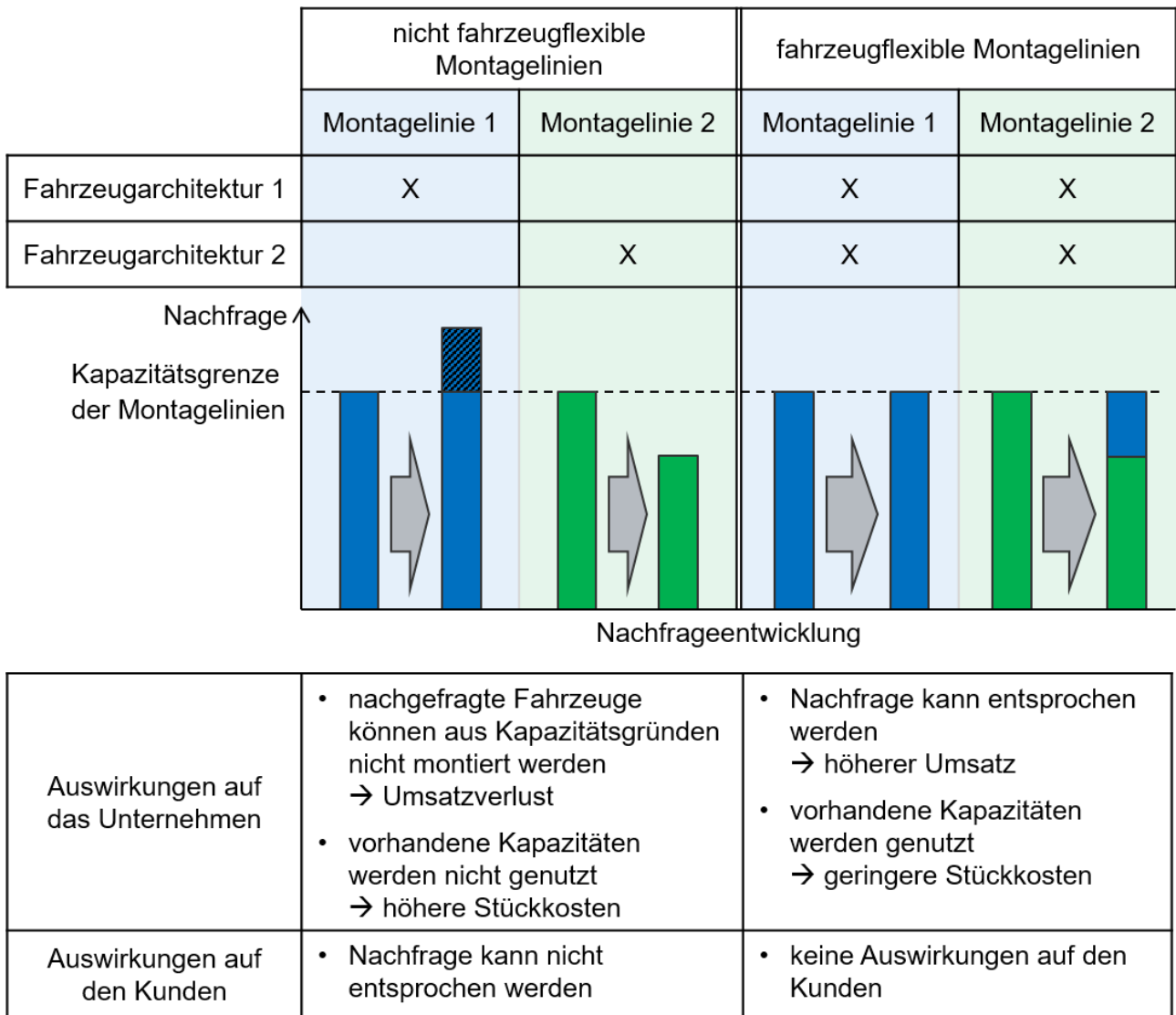


Abbildung 1-4: Vorteile produktflexibler Montagelinien

Übersteigt die Nachfrage die Kapazitäten der fahrzeugspezifischen Montagelinien, kann der Kundennachfrage nicht entsprochen werden. In Konsequenz bedeutet das für Unternehmen entgangene Gewinne. Gleichzeitig sinkt für die

restlichen Montagelinien die Nachfrage gegenläufig unter die Kapazitäten und führt dabei durch die Fixkosten zu einer Steigerung der Stückkosten (Löffler 2011). Dem kann über die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien begegnet werden. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass mehr als ein Fahrzeug, unabhängig vom Variantenmix, gemeinsam auf einer Linie endmontiert werden kann. Der Variantenmix beschreibt das Verhältnis zwischen den Fahrzeugtypen, die auf einer Linie endmontiert werden. Es ist damit der prozentuale Anteil der Fahrzeugtypen an der gesamten Kapazität einer Montagelinie.

Die Voraussetzung für die Planung einer fahrzeugflexiblen Montagekonfiguration ist eine Montagereihenfolge, die für die Linie und die darauf zu montierenden Fahrzeuge deckungsgleich ist. Die Möglichkeit einer standardisierten Montagereihenfolge ist dabei nicht praxistauglich (vgl. Tabelle 1-1). Die Freiheitsgrade in der Anordnung der Montageprozesse könnten für die Planung einer fahrzeugflexiblen Montagelinie herangezogen werden, was heute allerdings nicht methodisch geschieht. Die Forschungslücke besteht folglich darin, dass die Freiheitsgrade nicht methodisch zur Planung fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen genutzt werden.

### **1.3 Zielsetzung**

Die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien, auf denen mehr als ein Fahrzeug variantenmixunabhängig endmontierbar ist, könnte die Antwort auf ein wachsendes Fahrzeugportfolio sowie schwer prognostizierbare Nachfrageentwicklungen sein. Dazu muss eine Planungsmethode entwickelt werden, die nicht wie bisher auf standardisierten Montagekonfigurationen basiert, sondern die Freiheitsgrade zwischen Montageprozessen für die Konfiguration fahrzeugfle-

xibler Linien nutzt. Zum Verbau der Baugruppen und Bauteile in der Endmontage sind entsprechende Montageprozesse notwendig, die zusammengefasst und im Folgenden als Montagemodule bezeichnet werden (vgl. Abbildung 1-5).

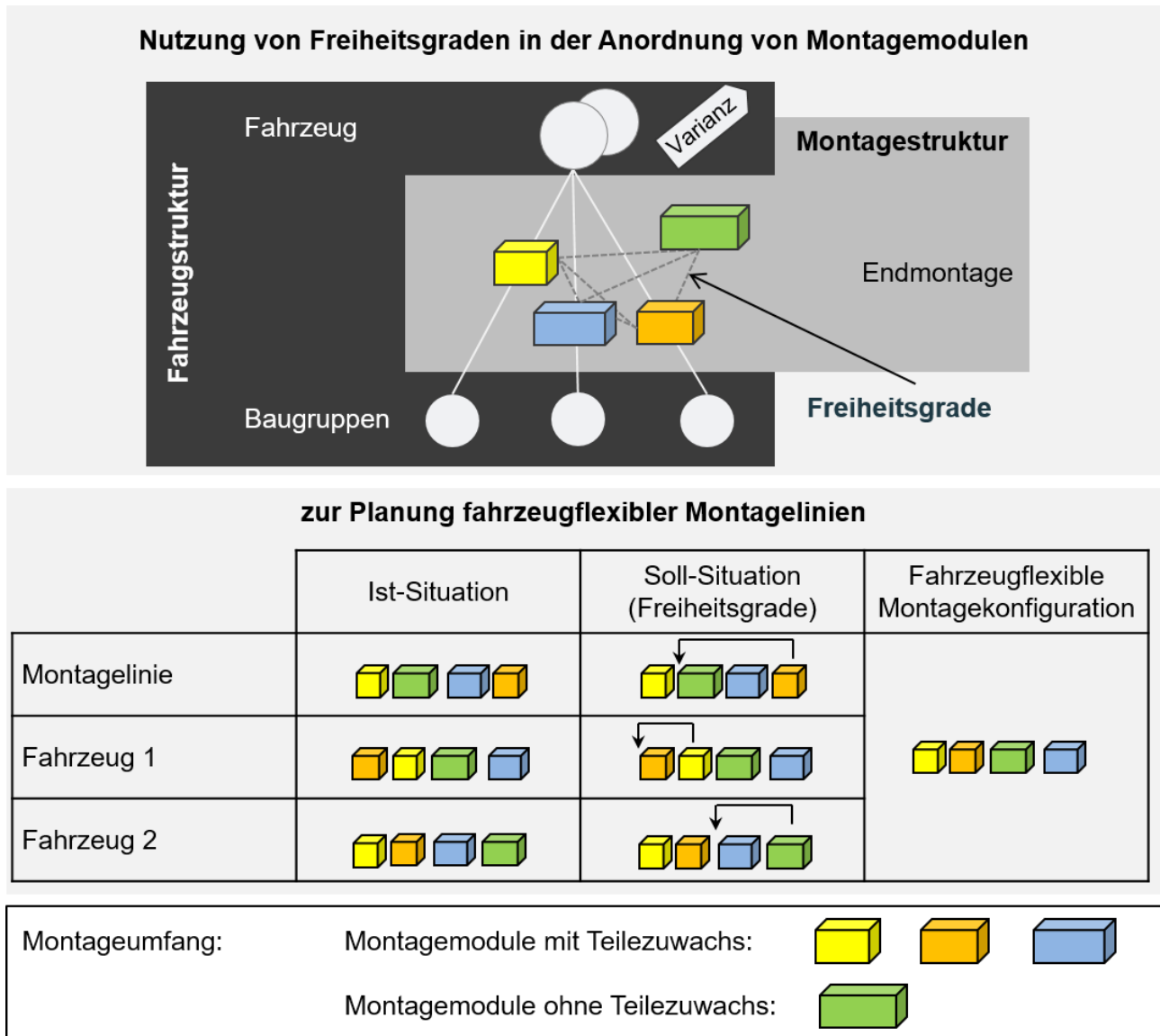


Abbildung 1-5: Zielsetzung der zu entwickelnden Planungsmethode

Neben diesen Montagemodulen mit Teilezuwachs existieren auch solche ohne Teilezuwachs. Hierbei handelt es sich nicht um Montageprozesse zum Verbau einer Baugruppe bzw. eines Bauteils, sondern u.a. für durchzuführende Einstellungen und Prüfungen in der Endmontage.

Im vorgestellten Kontext ist es das Ziel der Arbeit, die Freiheitsgrade zwischen den Montageprozessen methodisch für die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien zu nutzen. Weiter soll untersuchbar sein, ob neue Fahrzeuge in eine bestehende Linie variantenmixunabhängig integriert werden können bzw. wenn es nicht möglich sein sollte, welche Anpassungen dazu erforderlich wären.

Zusammenfassend lässt sich die wissenschaftliche Zielsetzung wie folgt formulieren:

Entwicklung einer Methode zur Nutzung der Freiheitsgrade zwischen Montagemodulen für die Planung fahrzeugflexibler Endmontagelinien.

Die Methode zur Planung fahrzeugflexibler Montagelinien soll einen Beitrag zum Umgang mit einem wachsenden Fahrzeugportfolio und kaum noch prognostizierbaren Nachfrageentwicklungen liefern. Im Weiteren wird auf die der Arbeit zu Grunde liegende Forschungskonzeption eingegangen. Damit soll sichergestellt werden, dass die Erarbeitung der Lösung zur Erfüllung der Zielsetzung den wissenschaftlichen Ansprüchen gerecht wird. Dazu zählt auch der strukturierte Aufbau der Arbeit.

## **1.4 Forschungskonzeption**

Die Struktur der Arbeit ist angelehnt an die Phasendarstellung der angewandten Forschung nach ULRICH in Abbildung 1-6 (Ulrich 2001). Darauf folgend werden die einzelnen Kapitel näher erörtert.



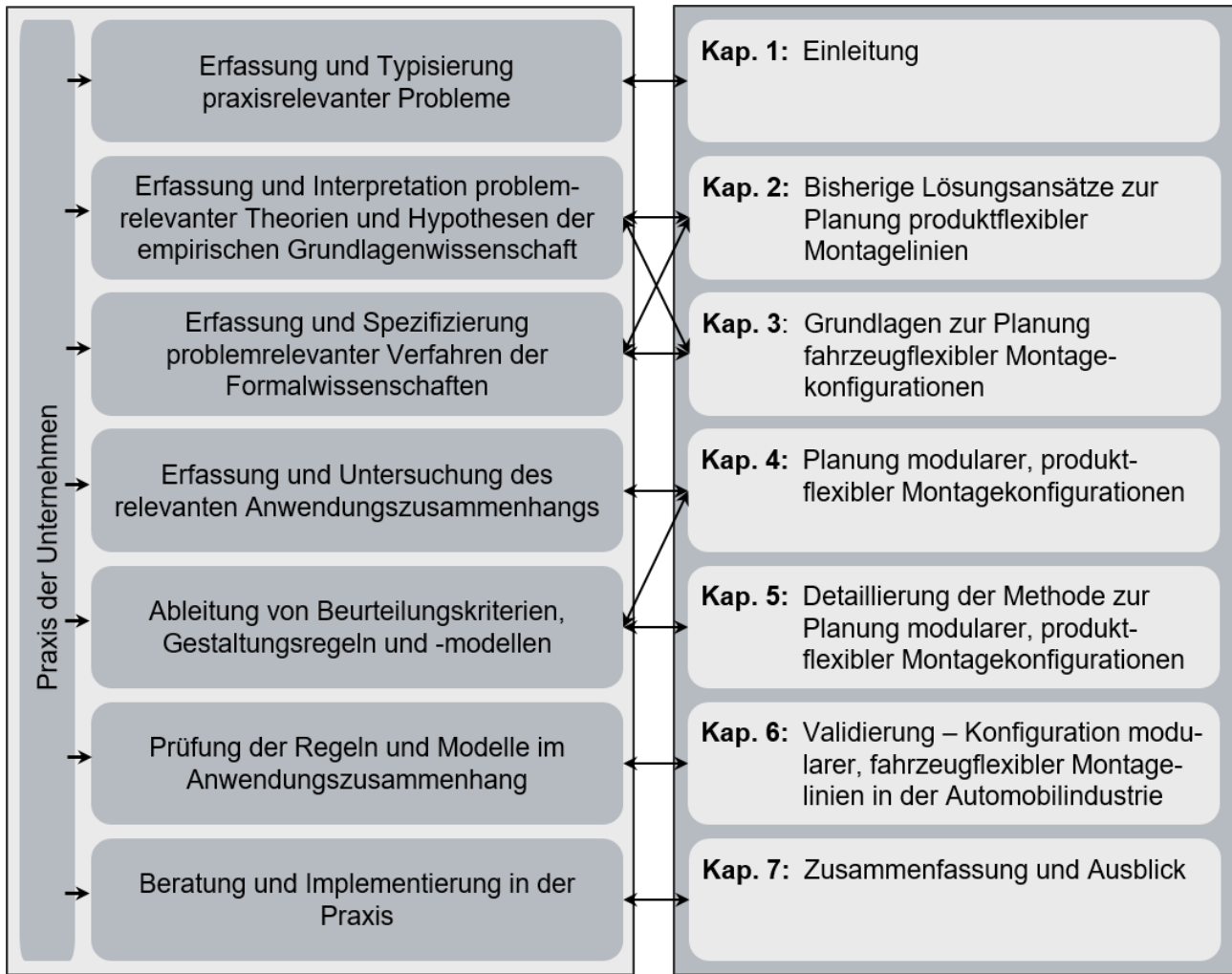


Abbildung 1-6: Aufbau und Gliederung der wissenschaftlichen Arbeit nach (Ulrich 2001)

**Kapitel 1** dient der Erfassung und Typisierung zukünftiger Herausforderungen. Dabei erfolgten zunächst die thematische Einleitung und die Eingrenzung des Betrachtungsraumes. Basierend auf den identifizierten Herausforderungen wurde die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet.

In **Kapitel 2** werden problemrelevante Theorien und Verfahren erläutert. Dabei liegt der Fokus, neben dem Aufzeigen von Methoden zur Montageplanung, auf der Modularisierung von Montageprozessen und der Gestaltung produktflexibler Montagelinien. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit der Reflexion wissenschaftlicher Lösungsansätze.

Die Ausführungen in **Kapitel 3** sind grundlegend für diese Arbeit. Dazu zählen u.a. die Eingangsprämissen für die Planung von Endmontagelinien. Des Weiteren ist es für die Konfiguration fahrzeugflexibler Montagelinien erforderlich, die Steuergrößen der getakteten Automobil-Endmontage, die Potenziale zur Effizienzsteigerung und auch den Aufbau und die Bewertung von Montagekonfigurationen aus Sicht der Graphentheorie zu betrachten.

Das Zielbild der zu entwickelnden Planungsmethode wird in **Kapitel 4** erörtert. Anschließend werden Bausteine der Planungsmethode aus dem Zielbild abgeleitet und in einen methodisch begründeten Planungsablauf eingegliedert.

Eine Detaillierung der Vorgehensweise im Planungsablauf geschieht in **Kapitel 5**. Dabei werden die einzelnen Planungsbausteine Prämissenfestlegung, Modularisierung der Endmontage, Bestimmung und Bewertung möglicher Montagekonfiguration basierend auf zuvor ermittelten Freiheitsgraden, sowie die zeitliche Positionierung der Montageumfänge auf der Montagelinie detailliert.

**Kapitel 6** dient der Validierung der erarbeiteten Methode. Diese wird in einem Automobilkonzern durchgeführt. Die Bausteine der Planungsmethode werden für die Planung einer neuen Linie zur Endmontage zweier unterschiedlicher Fahrzeugarchitekturen bzw. für die Integrationsuntersuchung einer weiteren Fahrzeugarchitektur auf einer bestehenden Montagelinie erprobt.

Abschließend werden in **Kapitel 7** die vorangegangenen Kapitel zusammengefasst dargestellt und zusätzliche Handlungsempfehlungen sowie weiterführende Forschungsfelder erörtert.

## 2 Bisherige Lösungsansätze zur Planung produktflexibler Montagelinien

Zukünftige Herausforderungen in der Automobilindustrie und die daraus resultierenden Anforderungen an die Montageplanung weichen unter Umständen von anderen Branchen ab, sodass es angezeigt ist, die Besonderheiten der automobilen Montageplanung in Kapitel 2.1 herauszustellen. Aus der Zielsetzung dieser Arbeit sind zwei Aspekte abzuleiten: die Modularisierung der Endmontage sowie die Nutzung der Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen zur Konfiguration fahrzeugflexibler Montagelinien. Dazu werden in Kapitel 2.2 und 2.3 bisherige Lösungsansätze erörtert und in Kapitel 2.4 reflektiert. Einen Überblick des Kapitels wird in folgender Abbildung 2-1 gegeben.

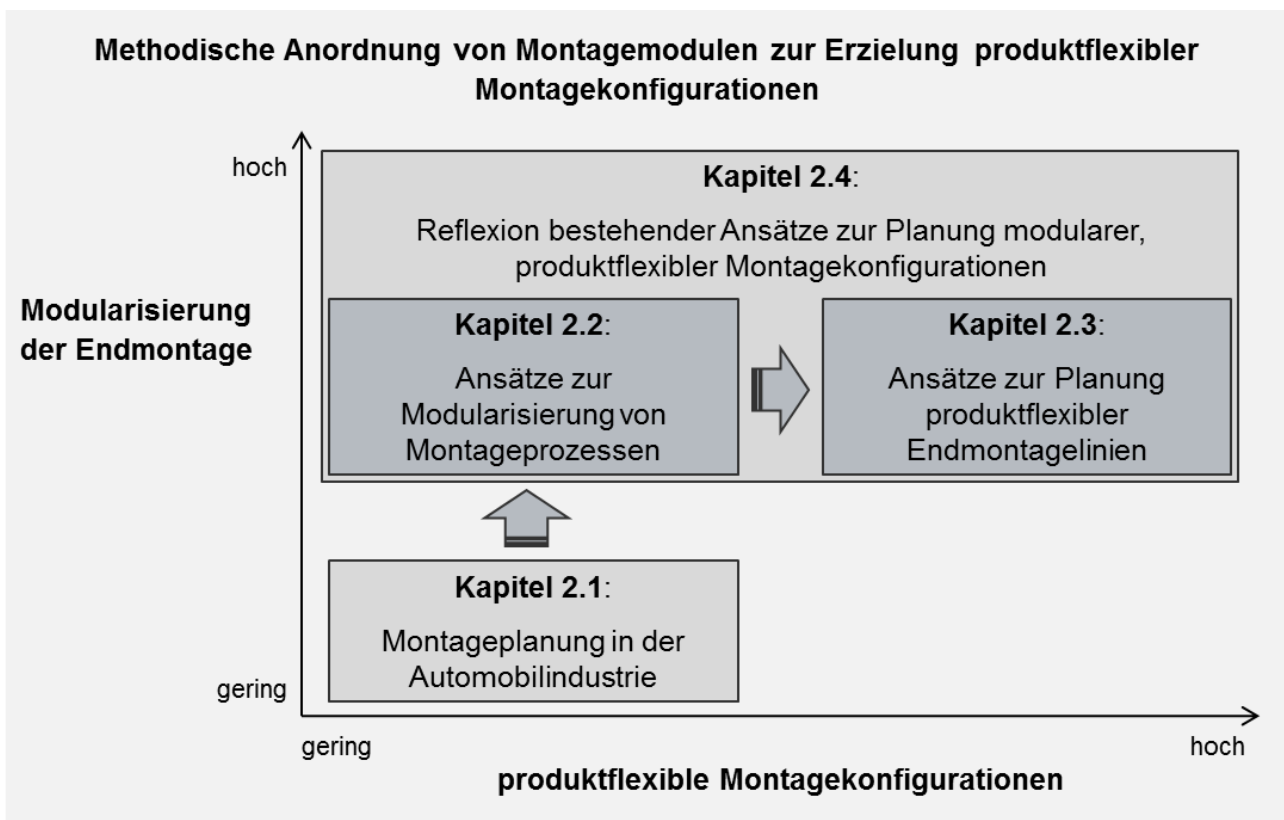


Abbildung 2-1: Forschungsbereiche zur montagemodulbasierten Konfiguration produktflexibler Montagelinien

Zunächst wird auf die Montageplanung in der Automobilindustrie näher eingegangen.

## **2.1 Montageplanung in der variantenreichen Serienmontage**

Ziel der Fabrikplanung ist die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit durch das Vorausdenken der Produktion (Schenk *et al.* 2004). Die gleiche Aussage gilt für die Montageplanung, die Bestandteil der Fabrikplanung ist. Die Produkt- und Montagestruktur bildet dabei die Planungsgrundlage. Die Montageplanung muss in der Lage sein, auf neue Herausforderungen ständig reagieren zu können, weshalb bereits während des Planungsprozesses Flexibilität und Wandlungsfähigkeit als Zielgrößen zu beachten sind. Bevor abschließend auf die taktische Montageplanung eingegangen wird, ist vor dem Hintergrund interdisziplinärer Planungsteams vorgelagert der Umgang mit interdependenten Planungszielen zu erörtern.

### **2.1.1 Produkt- und Montagestruktur in der Automobilindustrie**

Montagesysteme unterscheiden sich in den Ausprägungen und Eigenschaften. Die Automobilindustrie hat sich in den vergangenen Jahrzehnten von der Massenfertigung hin zur variantenreichen Serienfertigung entwickelt. Entgegen des Ford Models T Anfang der 20er Jahre hat ein Kunde heute zahlreiche Möglichkeiten, das Fahrzeug selbst aus standardisierten, vorentwickelten Produktmodulen zu konfigurieren (Lindemann *et al.* 2006).

Da die Fahrzeugentwicklung unabhängig vom Kundenauftrag geschieht, kann eine Reduzierung der unternehmensinternen Produktvielfalt und eine hohe Produktivität erzielt werden (Lindemann *et al.* 2006).

Die **Produktstruktur** weist, wie in Abbildung 2-2 dargestellt, auf der obersten Ebene des Produktportfolios die gesamte Modellpalette aus. Auf den darunterliegenden Produktsegmenten befinden sich die Fahrzeugarchitekturen. Diese sind zwischen den Automobilherstellern unterschiedlich definiert. Einheitlich ist aber, dass darauf unterschiedliche Baureihen aufbauen. Diese umfassen mehrere Modelle, sog. Derivate. Am Beispiel der Daimler AG basieren die in Abbildung 1-2 dargestellten Derivate, die zur Baureihe der A- und B-Klasse zählen, zur frontangetriebenen Fahrzeugarchitektur. Die Derivate können gemäß der Produktstruktur weiter in Komponenten, Baugruppen, Unterbaugruppen bis auf die Ebene der Einzelteile aufgeschlüsselt werden.

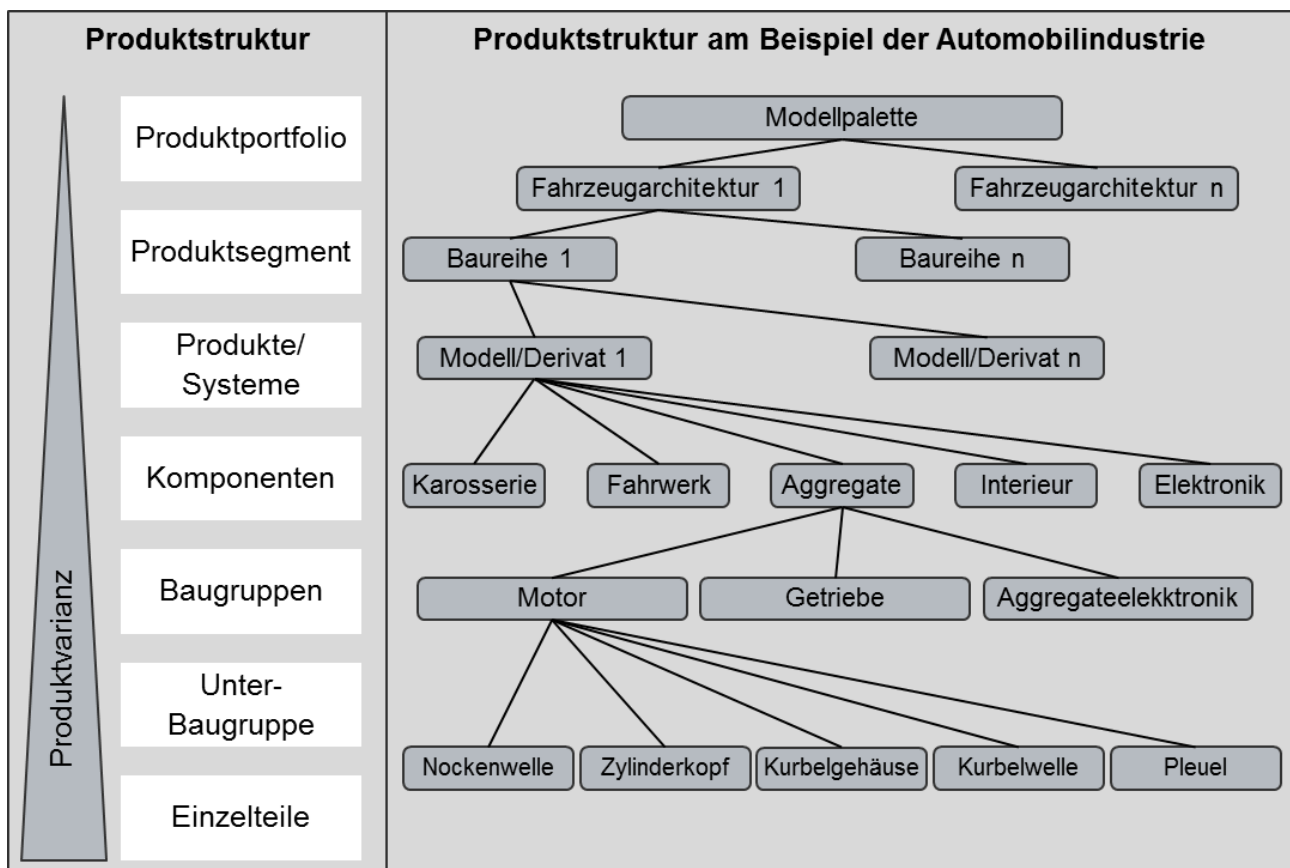


Abbildung 2-2: Produktstruktur der Automobilindustrie in Anlehnung an (Löffler 2011)

Die Teilevarianz wird durch die Zählung der Teilenummern in der Stückliste ermittelt (Löffler 2011). Während der Fahrzeugbestellung legt der Kunde die

zu montierenden und bereits vorentwickelten Varianten innerhalb der Produktstruktur fest. Die Anzahl möglicher Fahrzeugkonfigurationen ist das Ergebnis aus Kombinationsmöglichkeiten der alternativen Umfänge innerhalb der Produktstruktur. Diese stieg in den vergangenen Jahren deutlich an (Golz 2014). Der Kunde legt die endgültige Kombination dabei auf unterschiedlichen Ebenen in der Produktstruktur fest. Die Auswahl eines Motors geschieht beispielsweise auf Baugruppen-Ebene, die Holzfarbe der Türverkleidung wird hingegen auf Einzelteilebene festgelegt. Die theoretisch mögliche Kombinationsanzahl wird aus technischen Gründen oder zur Senkung der Varianz gezielt durch den Hersteller eingeschränkt. So ist beispielsweise bei den Aggregaten die Wahlmöglichkeit zwischen Schalt- und Automatikgetriebe für einige Motorvarianten ausgeschlossen.

Zur Produktstruktur passend ist auch die automobiler **Montagestruktur** zu spezifizieren. Die Struktur der in dieser Arbeit fokussierten End- bzw. Hauptmontagelinie wird in Abbildung 2-3 schematisch dargestellt. Die Bandabschnitte einer Montagelinie resultieren aus linear angeordneten Montagestationen, die über die gleiche Fördertechnik starr miteinander verknüpft sind. Zwischen den Bandabschnitten befinden sich meist Puffer, die zur Entkopplung der Bänder dienen und kurze Bandstillstände ausgleichen. Damit wird vermieden, dass sich Störungen zunächst nicht auf die gesamte Montagelinie, sondern nur auf einen Bandabschnitt auswirken. Ein Arbeitsvorgang (AVO) ist eine Tätigkeit, die sich nicht weiter unterteilen lässt, weshalb dieser „*von einer Person oder einem Betriebsmittel vollständig durchgeführt werden*“ muss (REFA 1990). In einer Arbeitsstation können mehrere Arbeitsvorgänge zusammengefasst werden (Westkämper *et al.* 2006). Die Herausforderung dabei ist, dass die Summe aller durchzuführenden Tätigkeiten je Arbeitskraft (AK) nicht die Taktzeit, die Verweildauer eines Fahrzeugs in einer Montagestation, überschreitet. In der

Automobilindustrie ist die Montage in der Regel als getaktete Fließmontage anzutreffen. Das Fahrzeug kann dabei nach Ablauf der Taktzeit über alle Stationen hinweg zeitgleich in die jeweils nachfolgende Station transportiert oder aber permanent gefördert werden, wodurch die Wartedauer der Mitarbeiter während des Weitertaktens entfällt. Im Rahmen dieser Arbeit wird von einem permanenten Weitertransport ausgegangen, wie es in der automobilen Großserienmontage in der Regel vorzufinden ist. Die Vorteile einer Montagelinie liegen in der festen Stationszuordnung der Bauteile und der Betriebsmittel. Die Material- und Informationsflüsse sind übersichtlich, und die je Station standardisierten Montageabläufe ermöglichen eine hohe Qualität und hohe Stückzahlen. Auch der Flächenbedarf ist gering (REFA 1990; Bullinger *et al.* 2009).

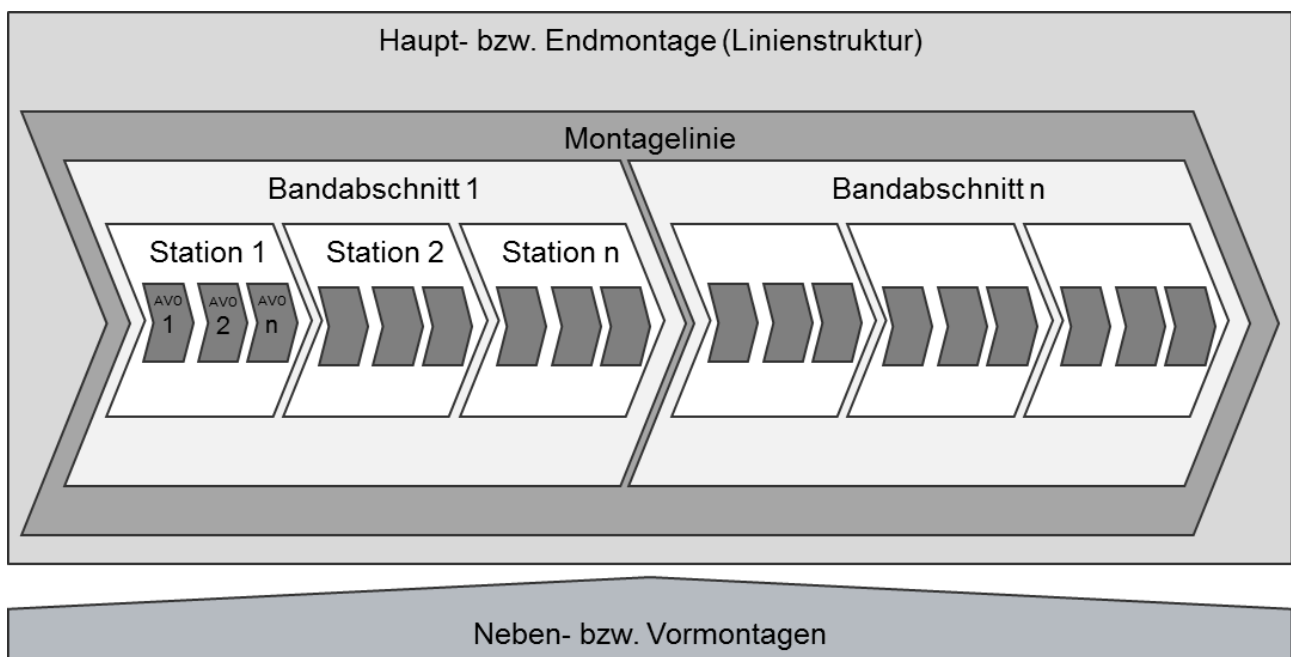


Abbildung 2-3: Montagestruktur in der Automobilindustrie

Produkte, Prozesse sowie Ressourcen, zu denen u.a. die benötigte Mitarbeiterqualifikation und technische Ausstattungen zählen, lassen sich IT-technisch abbilden und miteinander verknüpfen (Jonas 2000; Landherr 2014).

### 2.1.2 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Die Planung von Montagelinien erfordert das Vorausdenken zukünftiger Fahrzeugtechnologien sowie Marktentwicklungen und ist vergleichbar mit dem Impfen von Menschen. Ziel beim Impfen ist eine Ansteckung im Falle eines Kontakts mit einem gefährlichen Erreger zu verhindern. Auch wenn die Wahrscheinlichkeit einer Ansteckung als gering eingeschätzt wird, steigt mit dem Ansteckungsrisiko und den Auswirkungen einer Krankheit auch das Interesse, die Ansteckung zu vermeiden. Zwar können für Montagelinien zukünftige Anforderungen nicht vollumfänglich vorausgedacht werden, dennoch sollten diese weitestgehend dafür immunisiert sein, um mit zukünftigen Herausforderungen umgehen zu können. Eine derartige Immunisierung wird durch das Einbringen von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit erzielt (Küber *et al.* 2016c).

Es existieren zahlreiche Definitionen zum Begriff **Flexibilität** (u.a.: REFA 1990; Westkämper *et al.* 2000; Hernández Morales 2003; Wiendahl 2003; Schenk *et al.* 2004). HERNÁNDEZ versteht Flexibilität als die Fähigkeit, ohne strukturelle Veränderungen elastisch auf marktinduzierte Störungen reagieren zu können (Hernández Morales 2003). SCHENK ET AL. differenzieren bei der Flexibilität zwischen der funktionalen bzw. technologischen, strukturellen, kapazitiven und logistischen Flexibilität (Schenk *et al.* 2004). In dieser Arbeit wird der Begriffsdefinition nach WESTKÄMPER ET AL. gefolgt:

*„Ein System wird als flexibel bezeichnet, wenn es im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs von Merkmalen sowie deren Ausprägungen an veränderte Gegebenheiten reversibel anpassbar ist“* (Westkämper *et al.* 2000).

Bezogen auf diese Arbeit bedeutet die Verwendung des Begriffs Flexibilität, dass eine Montagelinie auf zum Zeitpunkt der Planung bekannte, meist interne Anforderungen reagieren kann. Die statische Flexibilität beschreibt den Korridor, innerhalb dessen Anpassungen möglich sind. Ein Beispiel dafür ist die



Fähigkeit einer Stückzahlerhöhung bzw. -senkung um 30%. Die Änderungsgeschwindigkeit, um Anpassungen innerhalb dieses Flexibilitätskorridors durchführen zu können, repräsentiert die dynamische Flexibilität, beispielsweise die Dauer zur Umsetzung der Stückzahlanpassung. Dieser Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 2-4.

**Wandlungsfähigkeit** bedeutet über diesen Korridor der statischen Flexibilität hinaus reagieren zu können (vgl. Abbildung 2-4), wobei auch für diesen Begriff zahlreiche Definitionen existieren (u.a.: Westkämper *et al.* 2000; Hernández Morales 2003; Schenk *et al.* 2004; Wiendahl *et al.* 2005). HERNÁNDEZ sieht den Unterschied zu Flexibilität darin, dass die Strukturen verändert werden, mit dem Ziel, die Anpassungsfähigkeit zu erhöhen (Hernández Morales 2003). Nach WIENDAHL ET AL. wird die Wandlungsfähigkeit durch interne und externe Auslöser notwendig und bedingt aktive Veränderungen mit geringem Aufwand auf allen Fabrikebenen (Wiendahl *et al.* 2005). SCHENK ET AL. sehen die Wandlungsfähigkeit hingegen dann gegeben, wenn die Anpassungs- und Entwicklungsfähigkeit auch über die Phasen der Fabriklebenszyklen hinaus gegeben sind (Schenk *et al.* 2004). Nach WESTKÄMPER ET AL. ist Wandlungsfähigkeit wie folgt definiert:

*„Ein System wird als wandlungsfähig bezeichnet, wenn es aus sich selbst heraus über gezielt einsetzbare Prozess- und Strukturvariabilität sowie Verhaltensvariabilität verfügt. Wandlungsfähige Systeme sind in der Lage, neben reaktiven Anpassungen auch antizipative Eingriffe vorzunehmen. Diese Aktivitäten können auf Systemveränderungen wie auch auf Umfeldveränderungen hinwirken“* (Westkämper *et al.* 2000).

Dieser Definition folgend bedeutet Wandlungsfähigkeit, dass die Montage auf zukünftige Anforderungen reagieren kann, die zum Planungszeitpunkt noch

nicht bekannt waren. Wandlungsfähigkeit kann anhand der Wandlungsbefähiger Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität, Kompatibilität sowie Neutralität bewertet werden (Wiendahl *et al.* 2009). SCHUH ET AL. sehen die Modularität als wesentlichen Wandlungsbefähiger (Schuh *et al.* 2004). Eine modular aufgebaute Montagelinie erfüllt damit auch Charakteristika der Wandlungsfähigkeit, um auf Änderungen über eine Neuordnung der Montagemodule reagieren zu können.

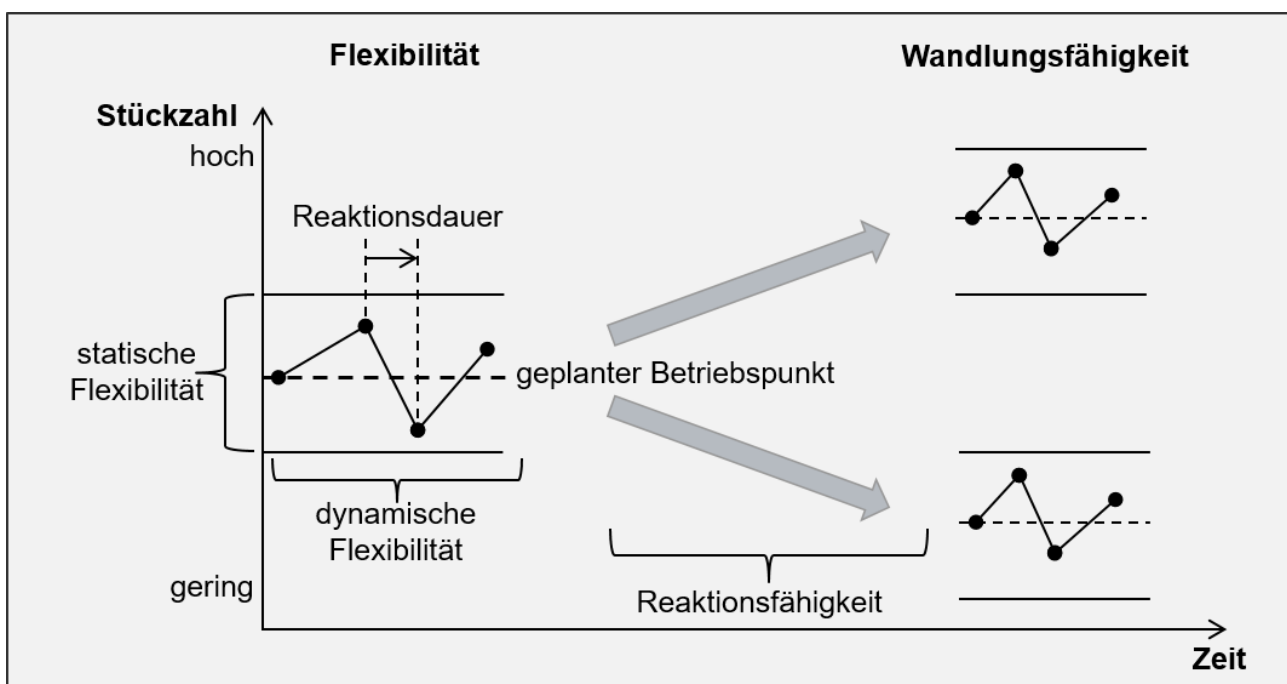


Abbildung 2-4: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an (Wiendahl *et al.* 2009)

Mit Fokus auf die automobile Endmontage ist Flexibilität insbesondere in folgenden drei Fällen notwendig:

- **Volumenflexibilität:** Änderung der kumulierten Nachfragemenge über alle auf einer Linie montierten Fahrzeuge
- **Variantenmixflexibilität:** Änderung des Verhältnisses der nachgefragten Menge zwischen den Fahrzeugmodellen, die auf einer Linie endmontiert werden

- **Produktflexibilität:** Substitution eines bestehenden bzw. Integration eines zusätzlichen Fahrzeugs auf einer Montagelinie

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass Montagelinien häufig für Marktwachstum ausgelegt sind. Die Wirtschaftskrise 2008/2009 hat jedoch gezeigt, dass auch eine Reduzierung der Stückzahlen eingeplant werden muss. Zudem erfordert die Nutzung einer Produktflexibilität auch die Variantenmixflexibilität, jedoch nicht umgekehrt. Denn ändern sich die Fahrzeuge, die auf einer Linie montiert werden, ändert sich in der Regel auch das Mengenverhältnis zwischen den Fahrzeugmodellen. Erreicht wird die Volumen-, Variantenmix- und Produktflexibilität über die organisatorische und technische Flexibilität.

Die **organisatorische Flexibilität** ermöglicht, abhängig von der lokalen Gesetzgebung und den Betriebsvereinbarungen, die Arbeitszeiten über Arbeitszeitmodelle anzupassen. Dadurch kann die zu produzierende Stückzahl erhöht bzw. gesenkt werden (Löffler 2011). Die Qualifikation der Mitarbeiter ist ebenfalls eine Voraussetzung für die organisatorische Flexibilität (Brehm 2003; Roscher 2008; Löffler 2011) und vereinfacht in diesem Fall die Integration zusätzlicher Fahrzeuge. Die Mitarbeiter zeichnen sich durch Lernfähigkeit aus und sind daher auch wandlungsfähig, weshalb Wandlungsfähigkeit primär bei technisch-organisatorischen Systemen zu berücksichtigen ist.

Die **technische Flexibilität** ist begrenzt, da diese bereits im Lastenheft der Montageanlagen festgelegt wird. Die Volumenflexibilität ist entgegen der organisatorischen Flexibilität bei technischen Systemen bereits hineinkonstruiert (Westkämper *et al.* 2000). Das Volumen beschränkt sich durch die maximal mögliche Betriebsnutzungszeit der technischen Montageanlagen sowie die benötigte Dauer zur Durchführung der vorgesehenen Prozesse. Ist die maximale

technische Kapazität nicht ausreichend, muss diese durch zusätzliche Investitionen ausgebaut werden (Löffler 2011). Die Herausforderung ist, bereits zu Beginn den richtigen Grad an notwendiger technischer Flexibilität zu bestimmen, um auf Volumen-, Variantenmix- und Produktänderungen reagieren zu können (Küber *et al.* 2016c).

### **2.1.3 Produktionslogistik und interdependente Planungsziele in der Automobilindustrie**

Während der Planung einer Montagelinie treten alternative Entscheidungsmöglichkeiten auf, die zu bewerten und einzugrenzen sind. Demzufolge ist die Entscheidung für eine Handlungsmöglichkeit immer auch die Entscheidung gegen Alternativen. In interdisziplinären Planungsteams entstehen in der Regel dann Entscheidungsschwierigkeiten, wenn Fachbereiche gegenläufige Zielvorgaben verfolgen. Interdependente Planungsziele bestehen häufig zwischen der Montageplanung und der Produktionslogistik. Um auf diesen Zusammenhang näher eingehen zu können, wird zunächst die Produktionslogistik erörtert.

Die **Produktionslogistik** betrachtet die Lieferung des Materials vom Wareneingang bis zur Materialbereitstellung am Verbauort in der Montage. Die Materialbelieferung erfolgt meist fertigungssynchron nach Just-in-Time (JiT). Durch die stückzahlgenaue Materialbereitstellung kurz vor dem Montagezeitpunkt werden die Lagerdauer und damit auch die Kapitalbindung minimiert. Eine Sonderform von Just-in-Time ist das Just-in-Sequence Prinzip (JiS). Dabei wird das Material in genau der Reihenfolge bereitgestellt, in der die Bauteile am Montageort benötigt werden (Domschke *et al.* 1997; Lotter *et al.* 2012). Die Belieferung der Montageumfänge, unabhängig ob diese aus einer Eigen- oder Fremdfertigung stammen und ob diese innerhalb oder außerhalb der Montagehalle produziert werden, können über unterschiedliche Logistikkonzepte in

Just-in-Sequence oder Just-in-Time geliefert werden. Dieser Zusammenhang veranschaulicht Tabelle 2-1.

<b>WER?</b> Wer montiert die Umfänge vor?	<b>WO?</b> Wo werden die Umfänge vormontiert?	<b>WANN? WIE?</b> Zu welchem Zeitpunkt werden die Umfänge an den Montageort geliefert und dort bereitgestellt? Nach welchem Logistikkonzept erfolgt dies?																														
<ul style="list-style-type: none"> <li>Eigenmontage</li> <li>Fremdmontage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>in der Montagehalle</li> <li>außerhalb der Montagehalle</li> </ul>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2" data-bbox="825 542 1169 645"></th> <th colspan="3" data-bbox="1169 542 1441 600"><b>Zeitpunkt</b></th> </tr> <tr> <th colspan="2" data-bbox="825 600 1169 645"></th> <th data-bbox="1169 600 1257 645">JiS</th> <th data-bbox="1257 600 1345 645">JiT</th> <th data-bbox="1345 600 1441 645">etc.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="825 645 997 701" rowspan="4"><b>Logistik-konzepte</b></td> <td data-bbox="997 645 1169 701">Warenkorb</td> <td data-bbox="1169 645 1257 701">X</td> <td data-bbox="1257 645 1345 701">X</td> <td data-bbox="1345 645 1441 701"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="997 701 1169 745">Route</td> <td data-bbox="1169 701 1257 745">X</td> <td data-bbox="1257 701 1345 745">X</td> <td data-bbox="1345 701 1441 745"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="997 745 1169 790">I-Park</td> <td data-bbox="1169 745 1257 790">X</td> <td data-bbox="1257 745 1345 790">X</td> <td data-bbox="1345 745 1441 790"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="997 790 1169 846">etc.</td> <td data-bbox="1169 790 1257 846"></td> <td data-bbox="1257 790 1345 846"></td> <td data-bbox="1345 790 1441 846"></td> </tr> </tbody> </table>						<b>Zeitpunkt</b>					JiS	JiT	etc.	<b>Logistik-konzepte</b>	Warenkorb	X	X		Route	X	X		I-Park	X	X		etc.			
		<b>Zeitpunkt</b>																														
		JiS	JiT	etc.																												
<b>Logistik-konzepte</b>	Warenkorb	X	X																													
	Route	X	X																													
	I-Park	X	X																													
	etc.																															

Tabelle 2-1: Produktionslogistik - Auswahl alternativer Logistikkonzepte

In der aktuellen Forschung wird für die Intralogistik die rechnerunterstützte Auswahl kostenoptimaler Logistikkonzepte untersucht. Dazu werden aus einer Datenbank alternative Logistikkonzepte vorselektiert, die für den Transport und die Bereitstellung der Bauteile in Frage kommen. Indem über mehrere Stationen hinweg die gleichen Logistikkonzepte bzw. auch unterschiedliche Logistikkonzepte parallel zum Einsatz kommen, sind die Kosten der Logistik beeinflussbar. Darüber hinaus können abhängig von der Konfiguration der Montagestationen kostenoptimale Logistikanbindungen detektiert werden (Popp *et al.* 2015). Dadurch kann auch die Wirtschaftlichkeit neuer Logistikkonzepte untersucht werden, wie zum Beispiel das bei BRÜCKNER ET AL. beschriebene Riegelkonzept (Brückner *et al.* 2015).

**Interdependente Planungsziele** liegen in der Montageplanung neben der Endmontage und Produktionslogistik auch zwischen der Flexibilität bzw. Wandlungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit vor. Diese vier Zielgrößen spannen eine Fläche auf (Küber *et al.* 2016c), in der im Rahmen dieser Arbeit Entscheidungen getroffen werden (vgl. Abbildung 2-5).

Ein Beispiel dafür ist der Einsatz des Logistikkonzeptes Warenkorb, wobei das Material in der Montage fahrzeugspezifisch über vorkommissionierte Sonderladungsträger bereitgestellt wird. Damit können die Laufwege und der Zeitaufwand für den Materialabgriff der Montagemitarbeiter reduziert werden. Allerdings steigen die Logistikkosten durch die zusätzlich notwendige Vorkommissionierung der Warenkörbe durch die Logistikmitarbeiter. Der Vorteil des Warenkorbs sind der reduzierte Zeit- und Kostenaufwand, um bei begrenzter Logistikfläche am Montageband zusätzliche Fahrzeuge auf der Montagelinie integrieren zu können.

SCHUH ET AL. weisen darauf hin, dass nicht die Maximierung der Wandlungsfähigkeit, sondern vielmehr das optimale Verhältnis zwischen dem Nutzen gegenüber den dafür in Kauf zu nehmenden Kosten angestrebt werden sollte (Schuh *et al.* 2004). Zusatzinvestitionen für Flexibilität bzw. Wandlungsfähigkeit sind aus wirtschaftlicher Sicht zweckmäßig, wenn dadurch kostengünstiger auf Veränderungen reagiert werden kann. Demzufolge existiert ein theoretisches Optimum der Wandlungsfähigkeit. Investitionen in Wandlungsfähigkeit rechnen sich erst dann, wenn der Bedarfsfall eintritt, weshalb HERNÁNDEZ Wandlungsfähigkeit auch als Prävention gegenüber turbulenten Bedingungen versteht. Tritt der Bedarfsfall ein, erreicht die wandlungsfähige Fabrik den Break-Even-Point früher als die wandlungsträge Fabrik (Hernández Morales 2003). Der Punkt, an dem die dadurch erzielten Einsparungen die Zusatzinvestitionen übersteigen, soll hier Tipping Point genannt werden. Kann davon ausgegangen werden, dass dieser Tipping Point erreicht wird, sollte in zusätzliche Flexibilität bzw. Wandlungsfähigkeit investiert werden (Küber *et al.* 2016c). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-5 dargestellt und wird anhand von Beispielen verdeutlicht, u.a. auch für das Logistikkonzept Warenkorb.

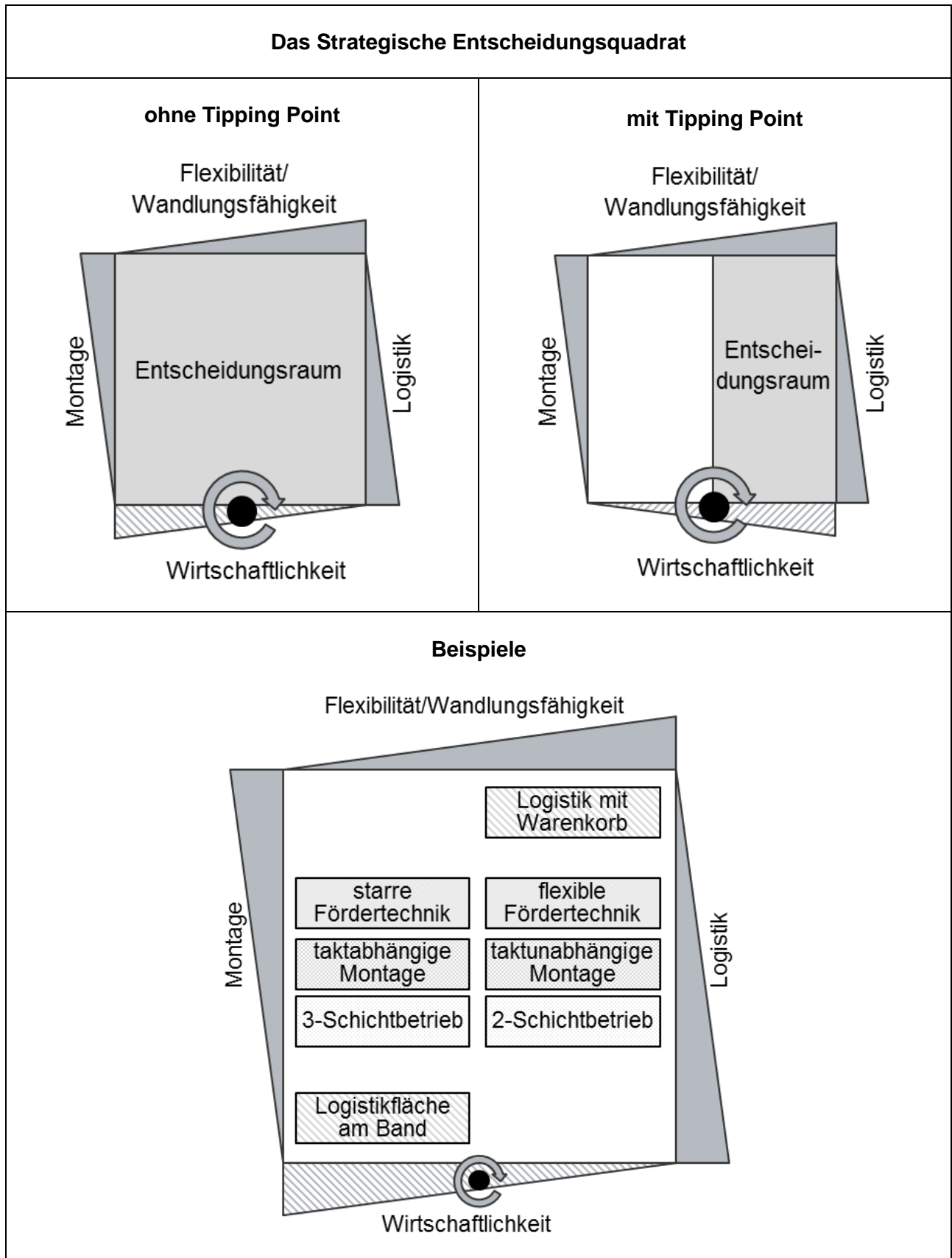


Abbildung 2-5: Das Strategische Entscheidungsquadrat

ZEILE erhebt für die Bewertung alternativer Lösungen die Gesamtkosten, die sich u.a. aus der Summe der montagespezifischen Grundausstattung, Handhabung, Werkzeuge, Teilebereitstellung, Verkettungsabschnitte, Puffer, Werkzeugträger etc. zusammensetzen. Hinzu kommen die Kosten für die Inbetriebnahme sowie die Betriebs- und Instandhaltungskosten (Zeile 1995). Die Fixkosten sind entgegen den variablen Kosten unabhängig von der Anzahl montierter Fahrzeuge und umfassen auch die Investitionskosten. Werden mehr Fahrzeuge produziert, sinkt bei diesen der Fixkostenanteil. Bei der Bewertung alternativer Lösungen anhand der Wirtschaftlichkeit sind deshalb bei den Stückkosten die variablen und fixen Kosten zu berücksichtigen.

Die Gestaltung von Baugruppen und Bauteilen kann Auswirkungen auf die Montage- und Logistikkosten haben. Anstatt Schraubverbindungen kann beispielsweise über die Nutzung von Klipsen die Montagedauer reduziert werden. Zudem entfallen dadurch die Logistikkosten für die Bereitstellung von Schrauben. Deshalb sollten für die Bewertung von Alternativen die Montage-, Logistik-, Material- und Fertigungskosten herangezogen werden (Küber *et al.* 2016c). Dieser Zusammenhang ist in Formel 2-1 dargestellt.

$$\text{Stückkosten}_{\text{Alternative x}} = \frac{\text{Materialkosten} + \text{Fertigungskosten} + \text{Logistikkosten} + \text{Montagekosten}}{\text{Stückzahl}}$$

$$\text{Materialkosten}_{\text{Alternative x}} = \text{Materialkosten}_{\text{fix}} + (\text{Materialkosten}_{\text{variabel}} \cdot \text{Stückzahl})$$

$$\text{Fertigungskosten}_{\text{Alternative x}} = \text{Fertigungskosten}_{\text{fix}} + (\text{Materialkosten}_{\text{variabel}} \cdot \text{Stückzahl})$$

$$\text{Logistikkosten}_{\text{Alternative x}} = \text{Logistikkosten}_{\text{fix}} + (\text{Logistikkosten}_{\text{variabel}} \cdot \text{Stückzahl})$$

$$\text{Montagekosten}_{\text{Alternative x}} = \text{Montagekosten}_{\text{fix}} + (\text{Montagekosten}_{\text{variabel}} \cdot \text{Stückzahl})$$

Formel 2-1: Stückkosten zur Bewertung von Alternativen



Alternative Entscheidungsmöglichkeiten sind dynamisch über den Zeitverlauf zu bewerten. HERNÁNDEZ nutzt für die Bewertung der notwendigen Wandlungsfähigkeit die Szenario-Analyse. Szenarien sind Zukunftsbilder und deshalb kein Garant für eine sichere Prognose, wenngleich das Risiko einer Fehlplanung durch ein Vorausdenken und Plausibilisierung der Zukunftsbilder reduziert wird (Hernández Morales 2003). Eine flexible Montagelinie ist nicht auf einen statischen Betriebspunkt ausgelegt. Zur Unterstützung der Entscheidung sollte daher das Verhalten der Stückkosten für unterschiedliche Szenarien herangezogen werden, wobei auf die Prozesskostenrechnung zurückgegriffen werden kann. Beispielsweise unterstützen definierte Szenarien den Entscheidungsprozess, ob die Materialbereitstellung über Warenkörbe oder auf Logistikflächen am Band erfolgen soll. Abbildung 2-6 zeigt für unterschiedliche Szenarien exemplarisch die Stückkosten alternativer Entscheidungsmöglichkeiten. Jeweils grün hervorgehoben sind die geringsten Stückkosten je Szenario. Wird davon ausgegangen, dass Szenario eins eintreten wird, sollte die Alternative eins ausgewählt werden, ansonsten ist Alternative drei zu bevorzugen.

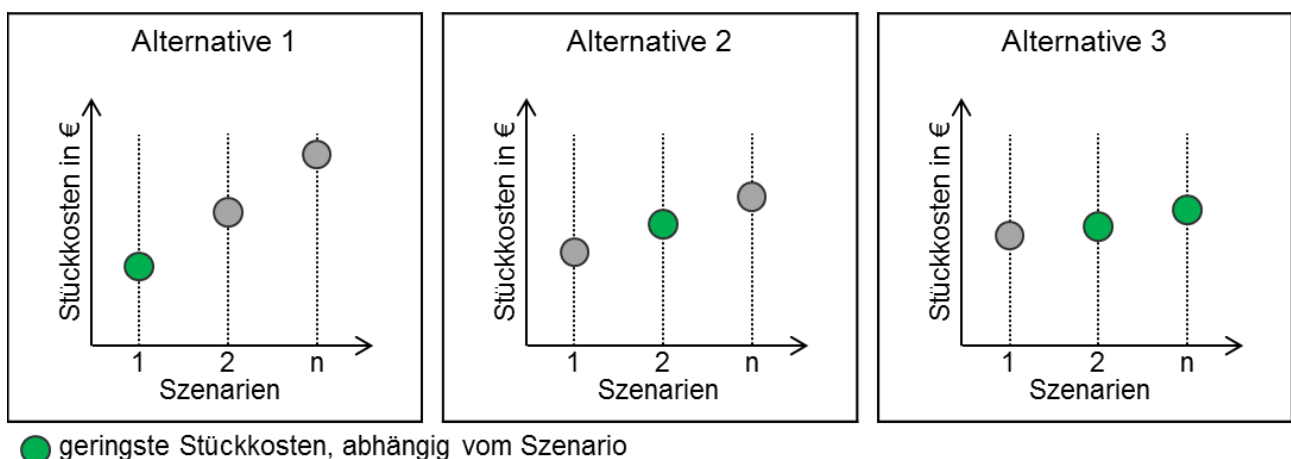


Abbildung 2-6: Szenarienbasierte Ermittlung der Stückkosten

Das Investitionsrisiko steigt mit zunehmendem Planungshorizont (Hernández Morales 2003). Eine Montagelinie besteht in der Regel über mehrere Jahrzehnte, deshalb bedeutet die Planung einer Montagelinie auch eine Planung in die Zukunft.

#### **2.1.4 Montageplanung in der Wissenschaft und Anwendung**

Eine Planung ist die „*gedankliche Vorwegnahme eines angestrebten Ergebnisses einschließlich der zur Erreichung als erforderlich erachteten Handlungsabfolge*“ (VDI 5200). In der Montageplanung sind dabei überwiegend Fügeprozesse (DIN 8593) sowie sekundäre Montageaufgaben wie Handhaben, Messen, Prüfen und Sonderfunktionen zu planen (VDI 2860). Für das Vorgehen bei der Fabrikplanung wird an dieser Stelle auf AGGTELEKY verwiesen (Aggteleky 1990). Die Montageplanung ist Bestandteil der Fabrikplanung und es gilt der gleiche Grundsatz vom Groben ins Feine zu planen. In der Grobplanung werden variante Produktionsabläufe ermittelt und bewertet. Nach der Entscheidung für einen Produktionsablauf werden dessen Subsysteme im Rahmen der Feinplanung detailliert. Hierzu zählen neben den benötigten Prozesszeiten auch die technischen Anforderungen an die Betriebsmittel, Material- und Informationsflüsse der einzelnen Arbeitsstationen (REFA 1990).

#### **Montageplanung in der Wissenschaft**

Die Montageplanung lässt sich nach BULLINGER ET AL. in die Phasen der Konzeption, Ablaufplanung, Montagesystementwurf, Ausarbeitung, Realisierung und Betrieb strukturieren. Die Planungsdaten und -ziele werden in der Konzeptionsphase erhoben und bestimmt. In der darauffolgenden Ablaufplanung werden die Produkte strukturiert und eine Montageablaufstruktur ermittelt. Die Planungsphase des Montagesystementwurfs verfolgt u.a. die Systemanordnung

und Materialbereitstellung. In den darauffolgenden Planungsphasen wird darauf aufbauend die Grobplanung weiter detailliert und in die Feinplanung überführt, sodass eine Realisierung der Planungsergebnisse stattfinden kann. Die anschließende Betriebsphase kann dann der Montagesteuerung zugeordnet werden (Bullinger *et al.* 1986).

Die Phasen unterschiedlicher Planungssystematiken weichen mitunter voneinander ab, so dient nach DEUTSCHLÄNDER eine Analysephase der Bestimmung der Zielgrößen sowie der Ermittlung der Planungsdaten. Die Montageablaufplanung ist Bestandteil der Gestaltungsphase (Deutschländer 1989). KRÜGER integriert eine Flexibilitätsplanungsphase zum Umgang mit veränderten Absatzbedarfen, wobei über vordefinierte Strategiebausteine unterschiedliche Handlungsmöglichkeiten zur Kapazitätsabstimmung bereitgestellt werden (Krüger 2004). NEUMANN fokussiert die kurzfristige, situationsbasierte Anpassung in der Realisierungs- und Betriebsphase (Neumann 2015).

### **Montageplanung in der Automobilindustrie**

In der Automobilindustrie sollte die Fahrzeugentwicklung sicherstellen, dass die Fahrzeuge anhand einer standardisierten Montagereihenfolge auf bestehenden Montagelinien montierbar sind. Die Montagereihenfolge der Fahrzeuge und der Montagelinien weichen allerdings durch die technische Weiterentwicklung der Fahrzeuge häufig voneinander ab. Deshalb erfolgt die Montageplanung zunächst unabhängig von den Montagelinien. Für den Verbau der Baugruppen bzw. Bauteile sind sog. Arbeitsvorgänge (AVO) zu bestimmen. Den nicht weiter unterteilbaren Montageprozessen werden Zeiten und benötigte Betriebsmittel hinterlegt. Abhängig vom Planungszeitpunkt sind entwicklungsseitige Änderungen möglich, dabei sind die davon betroffenen Arbeitsvorgänge zu synchronisieren. In den weiteren Planungsschritten erfolgt die Einplanung des Fahrzeugs auf der Endmontagelinie. Dabei sind in der

Grobplanung zunächst die Baugruppen bzw. Bauteile den Bandabschnitten zuzuordnen, die sog. Grobbandbelegung. Anschließend werden im Rahmen der Feinplanung die Arbeitsvorgänge, die den Baugruppen bzw. Bauteilen hinterlegt sind, den Montagestationen zugeteilt. Da die Anordnung der Montagestationen, insbesondere die fest in die Hallenperipherie installierten Stationen, sich zwischen Montagelinien unterscheiden, hat dies für jede Montagelinie gesondert zu erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass die Zeiten aller kumulierten Arbeitsvorgänge innerhalb einer Montagestation die Taktzeit und damit die Kapazität einer Arbeitskraft bzw. einer technischen Einrichtung nicht überschreiten. Würde die Zuteilung eines zusätzlichen Arbeitsgangs dazu führen, wird dieser der nachfolgenden Montagestation zugeordnet (Boysen 2005). Ansätze zur Austaktung, das sog. Line Balancing, sind u.a. bei REKIEK ET AL. und BOYSEN beschrieben (Rekiek *et al.* 2001; Boysen 2005).

Auf einer Montagelinie erfolgt meist die Montage mehrere Derivate, weshalb darauf zu achten ist, dass vergleichbare Arbeitsgänge fahrzeugunabhängig an der gleichen Montagestation durchgeführt werden. Dadurch müssen die Arbeitskräfte je Station keine fahrzeugspezifisch unterschiedlichen Tätigkeiten durchführen. Sofern das gleiche Material benötigt wird, kann zudem die benötigte Fläche sowie der Aufwand für die Materialbereitstellung und -steuerung gering gehalten werden (Ammer 1985). Die Produktionslogistik erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse der Montageplanung.

Es ist festzuhalten, dass sowohl bei BULLINGER ET AL. als auch bei DEUTSCHLÄNDER zunächst die an die Planung einer Montage gerichteten Ziele und nachgelagert dazu die Montagestruktur bestimmt werden. Gleichermaßen wird eine automobiler Montagelinie geplant. Dabei baut die Feinplanung auf den Ergebnissen der Grobplanung auf. Diese Arbeit ist primär der Grobplanung und dabei der Montageablaufstruktur sowie dem Montagesystementwurf zuzuordnen.

## **2.2 Modularisierung von Produkten und Prozessen**

Die Anzahl von mehreren tausend Arbeitsvorgängen und deren Vorgänger-Nachfolger-Beziehung untereinander führen dazu, dass für die Grobplanung die Arbeitsvorgänge einer automobilen Montagelinie zusammenzufassen sind. Die Summe aller Arbeitsvorgänge, die zum Verbau einer Baugruppe bzw. eines Bauteils in der Endmontage notwendig sind, werden in dieser Arbeit als Montagemodule bezeichnet. Eine Montagekonfiguration ist in diesem Zusammenhang die lineare Anordnung dieser Montagemodule und entspricht der Grobbandbelegung innerhalb der Grobplanung. Der Begriff der Module ist nicht einheitlich belegt (Klepsch 2004). Die Modularisierung dient nach KOPPENHAGEN der Komplexitätsreduzierung. Produktmodule sollten dabei sowohl funktional wie auch physisch voneinander entkoppelt und unabhängig sein. Dazu werden Systeme zielgerichtet hierarchisiert. In den daraus entstehenden Subsystemen sind die inneren Beziehungen stärker als zu anderen Subsystemen (Kopenhagen 2014). Dadurch ist die Bündelung von Sonderausstattungen bzw. -funktionen möglich. Bei einigen Autoren findet sich eine rechnerunterstützte Kopplung von Produkten, Prozessen und Ressourcen. Dabei wird häufig zunächst das Produkt betrachtet und davon auf die notwendigen Montageprozesse geschlossen. Daher wird zunächst die Modularisierung von Produkten fokussiert.

### **2.2.1 Gründe für die Produktmodularisierung**

Neben den unterschiedlichen Derivaten führen auch Sonderausstattungen zu unterschiedlichen Prozesszeiten. Die Verbauquote gibt an, wie häufig ein Bauteil bzw. eine Baugruppe verbaut wird. Dies führt zu fahrzeugspezifisch unterschiedlichen Arbeitsumfängen innerhalb der Montagestationen. Die Folge sind sog. Taktzeitspreizungen. Dabei liegt die benötigte Montagedauer zur Durchführung der Arbeitsvorgänge in einer Montagestation fahrzeugabhängig unter

bzw. über der Taktzeit (Aisenbrey *et al.*). Im Vergleich zu anderen Automobil-Gewerken liegen in der Montage die größten Zeitspreizungen vor, da dort die Sonderausstattungen verbaut werden. LÖFFLER sieht die Fahrzeugmodularisierung und die Verlagerung der Fahrzeugvarianz in Vormontagen deshalb als eine Voraussetzung, um Fahrzeuge flexibel auf unterschiedlichen Hauptlinien montieren zu können (Löffler 2011). Automobilkonzerne verwenden häufig Plattformen und Produktmodule, wobei Plattformen in der Regel ebenfalls aus Modulen bestehen. Bei SCHMIEDER ET AL. findet sich ein Überblick zu den Plattform- bzw. Modularisierungsstrategien in der Automobilentwicklung (Schmieder *et al.* 2005).

Die Modularisierung „*ist eine Aufteilung einer bestehenden Produktarchitektur in nach bestimmten Kriterien gebildete Einheiten (Module) mit spezifizierten Schnittstellen in Abhängigkeit von der Unternehmensstrategie*“ (Schmieder *et al.* 2005). Die Baugruppen sind so abzugrenzen, dass diese als ein einzelnes Bauteil gehandhabt werden können, möglichst wenige Schnittstellen mit anderen Bauteilen umfassen und variantenunabhängig gleiche Einbaubedingungen aufweisen. Dadurch lassen sich Taktzeitspreizungen reduzieren (Lotter *et al.* 2012). Zudem kann durch die Modularisierung von Produkten in physisch und funktional abgetrennte Produktmodule die Funktionsüberprüfung bereits vor dem Verbau erfolgen, wodurch ein möglicher Nacharbeitsaufwand in der Hauptlinie entfällt (Bullinger *et al.* 1986; Lotter *et al.* 2012; Kopenhagen 2014).

BROCKE beschreibt ein Konzept zur Beherrschung von Komplexität durch das Strukturieren der Fahrzeuge und geht dabei auf den modularen Baukasten der VW AG ein. Unter Modularisierung wird dabei die Aufteilung eines Fahrzeuges in Subsysteme verstanden, sodass räumlich zusammengehörige Baugruppen auf einmal am Einbauort montiert werden können. Dazu zählen u.a. die Türen,

Achsen usw. Die Bildung der Fahrzeugmodule erfolgt dabei primär marktorientiert. Durch das mehrfache Verbauen von Gleichteilen in einem Fahrzeug bzw. in mehreren Fahrzeugen lassen sich Skaleneffekte realisieren (Brocke 2011). Dies wird auch als Verblockung bezeichnet. Zudem kann der Lagerbestand durch eine verringerte Teileanzahl reduziert und durch die Unabhängigkeit der Fahrzeugmodule können diese vollständig an einen Zulieferer übergeben werden (Schmieder *et al.* 2005).

KLEPSCH geht einen Schritt weiter und trennt die Außenhaut vom Fahrzeug. Diese wird bandlackiert, sodass das Gewerk Oberfläche entfällt. Weiter erfolgt das vollständige Vormontieren der Rohbaumodule Heck, Dach, Vorbau und Zelle, wodurch die Trennung zwischen Rohbau und Montage aufgelöst wird. Diese Großmodule sind vollständig prüfbar und werden zusammen mit den anderen Großmodulen in der Endmontage gefügt und um die restlichen Montageumfänge ergänzt. Abschließend werden die farbgebenden Außenhautumfänge aufgeklebt. Aus Gründen der Crashesicherheit, der unangemessenen Aushärtedauer der Kleber und des kostenaufwändigen Korrosionsschutzes an den Fügekanten sind derartige Großmodule bisher nicht umgesetzt (Klepsch 2004). Erste Ansätze finden sich beim BMW i3, bei dem die Farbgebung über vorlackierte Kunststoffblenden realisiert wird. Die Farbgebung wurde dadurch teilweise aus dem Gewerk Oberfläche in die Endmontage verschoben.

Es ist festzuhalten, dass durch vorgeprüfte Fahrzeugmodule der Nacharbeitsaufwand in der Endmontage verringert werden kann. Zudem führt eine Verschiebung der varianten Montageumfänge in die Vormontage zu vergleichbaren Montageprozessen und damit reduzierten Zeitspreizungen in der Endmontage. Weiter lassen sich durch den Verbau von gleichen Fahrzeugmodulen in unterschiedlichen Fahrzeugen Skaleneffekte realisieren. Neben den Fahrzeugen sind allerdings auch die Montageprozesse zu betrachten.

## 2.2.2 Ansätze zur Modularisierung von Montageprozessen

Durch die Modularisierung der Endmontage hat eine Fahrzeugänderung nur Auswirkungen auf das Montagemodul, in dem dieses montiert wird, sofern sich die Änderungen nicht über die Schnittstellen hinaus fortsetzen (Klepsch 2004). Durch die Verknüpfung der Produkt- und Montagesysteme, wie bei LANDHERR beschrieben, können die Auswirkungen von Adaptionsmaßnahmen auf beide Systeme bewertet werden. Die Betrachtung alternativer Anpassungen ermöglicht die Auswahl der geeignetsten Konfiguration des Produktions- und Montagesystems (Landherr 2014).

Aus Gründen der steigenden Spezialisierung werden häufig Fertigungs- und Montageaufgaben fremdvergeben (Westkämper *et al.* 2006). Das hat Einfluss auf die Modularisierung von Montagelinien. KLAUKE ET AL. koppeln die Montagemodule an die dazugehörigen Vormontagen und Logistikbereiche zu sog. Fertigungsmodulen. Diese Fertigungsmodule können als eine autonome Fertigung im Werk mit eigenem Qualitätsregelkreis gesehen werden. Durch die direkte Zuordnung der Logistikbereiche zu den Fertigungsmodulen werden Puffer zur Endmontage minimiert und kurze Informationsflüsse realisiert. Bei der Layoutgestaltung der Montage erfolgt dann die Anordnung dieser Fertigungsmodule. Die Lieferanten werden dabei in den Fertigungsmodulen und damit in die Montagehalle integriert, wodurch sich die Transportstrecke und -zeit reduziert. Wahlweise können für die Fertigungsmodule auch externe Betreiber eingesetzt werden (Klauke *et al.* 2005). Der Lieferant kann somit vollständige Fahrzeugmodule vormontieren und diese direkt in der Montage des OEMs verbauen. Die sich daraus ergebenden Vorteile sind eine schnellere Reaktion bei Qualitätsproblemen, höhere Produktflexibilität durch geringe Vorlaufzeiten und minimierte Logistikwege (Wildemann 1998). Diese Entwicklung ist bei einigen Automobilherstellern zu erkennen, wie bei der VW AG und im Smart-Werk in



Hambach (Schmieder *et al.* 2005). Bei der Zusammenarbeit mit externen Unternehmen ist darauf zu achten, dass die Daten, trotz der Nutzung unterschiedlicher IT-Systeme, ohne Informationsverlust austauschbar sind. Das gilt auch für unterschiedliche intern verwendete IT-Systeme, wie u.a. in der Fahrzeugentwicklung und der Montageplanung (Lachenmaier *et al.* 2015).

Im Rahmen des EU-Verbundprojektes Modular Plant Architecture wurde eine Methode zur systematischen Modularisierung von Produktionssystemen entwickelt. Dabei wurde angestrebt, dass sich identifizierte, zeitliche Veränderungen auf möglichst wenige Module beschränken (Schuh *et al.* 2004).

Produkte können anhand einer Erzeugnisstruktur abgebildet werden. Auf oberster Ebene steht dabei das Endprodukt, das in den Ebenen darunter bis auf die Ebene der Einzelteile aufgetrennt wird (vgl. Abbildung 2-2). Die Anzahl der Ebenen variiert und ist schlussendlich abhängig vom Produkt. So können auf der Ebene der Baugruppen auch Einzelteile aufgeführt sein, die für den Verbau der Baugruppen notwendig sind. Um von einer Ebene in der Erzeugnisstruktur auf die nächst höhere zu gelangen, sind Montageprozesse notwendig (Bullinger *et al.* 1986). Damit erklärt sich auch die Verknüpfung zwischen der Erzeugnis- und der Montagestruktur (vgl. Abbildung 2-7). Kundenanforderungen werden idealerweise während der Produktentwicklung berücksichtigt. Die digitale Produktentwicklung ist IT-basiert mit den Produktionsprozessen verknüpfbar (Lasi 2009). Das Produkt eines Kundenauftrags kann bis zu den Einzelteilen aufgeschlüsselt werden und ist damit direkt an die Fertigung geknüpft. Aus der Montage der auftragsspezifischen Einzelteile resultiert dann das Endprodukt (Landherr 2014). Aus der Erzeugnis- und Aufbaustruktur lassen sich die Vormontagen und Endmontage ableiten (Zeile 1995).

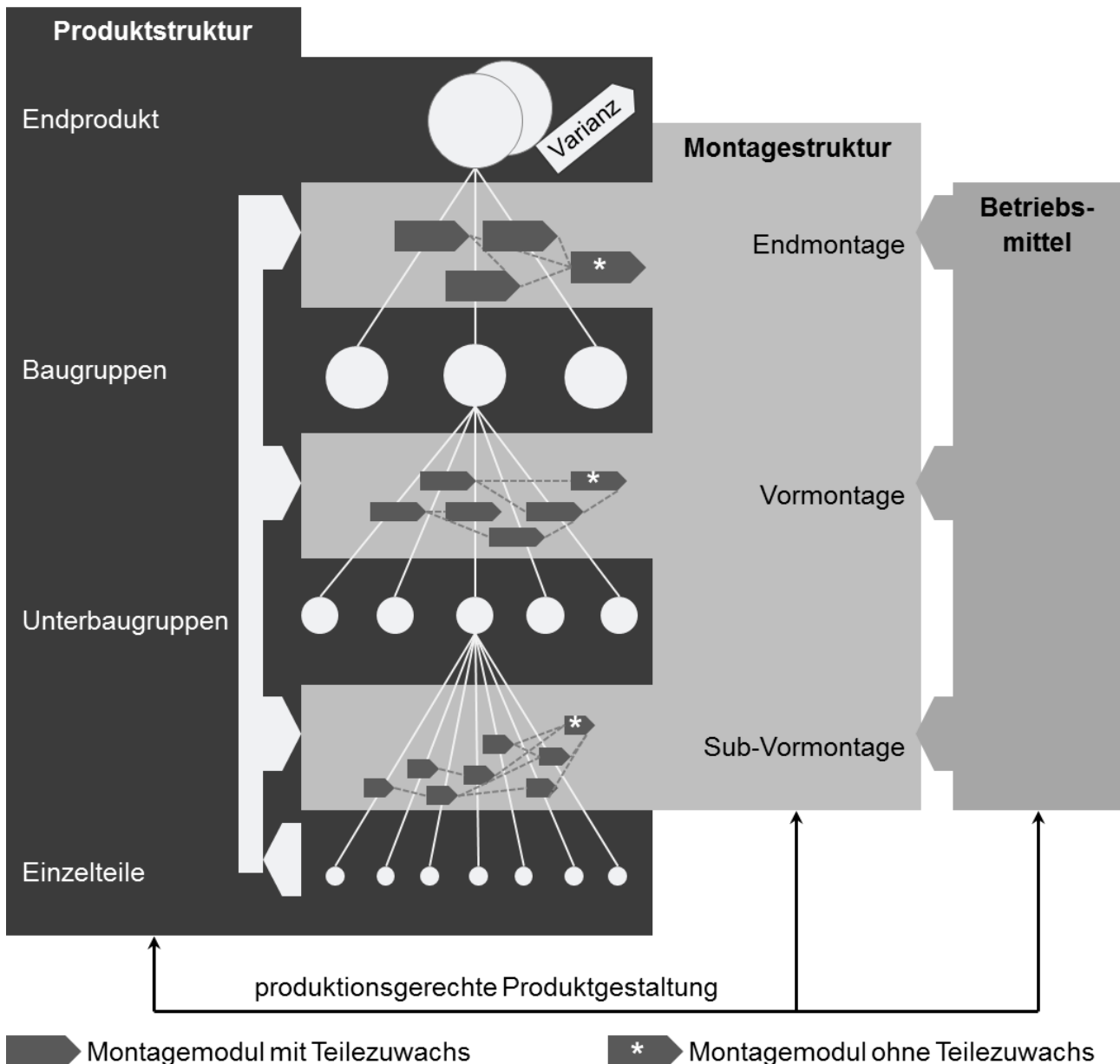


Abbildung 2-7: Verknüpfung der Produkt- und Montagestruktur

SEIDEL und JONAS leiten die Montageablaufstruktur ebenfalls aus der Erzeugnisstruktur ab und orientieren sich dabei am Teilezuwachs, sodass zusätzlich auch die Verbindungstätigkeiten hinterlegt werden können (Seidel 1998; Jonas 2000). Neben Tätigkeiten mit Teilezuwachs existieren auch Tätigkeiten ohne Teilezuwachs (Ammer 1985). Letztere können also nicht direkt aus der Produktstruktur abgeleitet werden. Beispiele aus der automobilen Endmontagelinie sind das Prägen der Fahrzeugidentifikationsnummer, aber auch Prüf- und

Justiertätigkeiten. NEUHAUSEN verknüpft Produkte und Produktionsprozesse ebenfalls über deren Struktur. Durch gezielte Veränderungen der Beziehungen zwischen den Produkten und Prozessen werden diese Abhängigkeiten reduziert, sodass eine Änderung möglichst wenig Einfluss auf die anderen Systemelemente hat. Wechselwirkungen zwischen nicht als veränderbar anzusehende Produktmerkmalen und den Produktkomponenten können konstruktiv beeinflusst werden (Neuhausen 2002).

ZEILE beschreibt das Vorgehen zur Zusammenfassung von Teileverrichtungen zu Stationen anhand von Ähnlichkeiten. Dazu zählen u.a. eine ähnliche Automatisierbarkeit, Fügeichtung, Fügebewegung und Erzeugnisstruktur. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Teilverrichtungszeit werden diese zu Stationen zusammengefasst. Eingesetzt wird dieses Vorgehensmodell vor allem, wenn mehrere Erzeugnisse mit unterschiedlichen Montageabläufen montiert werden, dazu jedoch teure Betriebsmittel notwendig sind und ein hoher Automatisierungsgrad angestrebt wird (Zeile 1995). Den Schwerpunkt der Prozessplanung der Montage legt FUSCH auf das Zuordnen von Arbeitsinhalten sowie das Austakten. Zusätzlich wird die Kapazität bestehender Montageanlagen bewertet und wenn nötig, werden diese neu beschafft (Fusch 2004).

STEINBAUER sieht für die Planung einer Kleinserienmontage eine der Montagekonfiguration vorgelagerte, montageorientierte Produktgestaltung als notwendig (Steinbauer 2012). Auch FELDMANN entwickelte eine Planungsmethode, bei der abhängig von den Konstruktionsdaten parallel die Montage geplant wird (Feldmann 1997). Ebenso weist GRUNWALD darauf hin, dass die Produktentwicklung und die Montageplanung integriert sein sollten. Dabei gilt, dass mit zunehmendem Konkretisierungsgrad der Produkte ein höherer Absicherungsgrad der Montagevorgänge erzielbar ist (Grunwald 2002).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Montagemodule aus der Produktstruktur abgeleitet werden können, wobei die Montageplanung in die Fahrzeugentwicklung integriert sein sollte. Die Fahrzeugmodule, und damit einhergehend auch die zum Verbau notwendigen Montageprozesse, weisen häufig fahrzeugspezifische Unterschiede auf.

## **2.3 Planung produktflexibler Montagelinien**

Dem wachsenden Produktportfolio und nicht prognostizierbaren Nachfrageentwicklungen können durch die Planung und Realisierung fahrzeugflexibler Montagelinien begegnet werden. Das bedeutet, dass mehr als ein Fahrzeug, unabhängig vom Variantenmix, auf einer gemeinsamen Linie montierbar ist. Zunächst sind die Eigenschaften fahrzeugflexibler Montagelinien zu spezifizieren, um daran anknüpfend bisherige Planungsansätze aufzuzeigen.

### **2.3.1 Eigenschaften fahrzeugflexibler Montagelinien**

Auf einer Solitärlinie wird im Gegensatz zu einer fahrzeugflexiblen Montagelinie nur eine begrenzte Anzahl an Derivaten der gleichen Baureihe und Fahrzeugarchitektur montiert. Durch die Spezialisierung auf einen geringen Teil des Produktportfolios und damit auf Fahrzeuge mit einem hohen Ähnlichkeitsgrad, zeichnet sich eine Solitärlinie durch hohe Wirtschaftlichkeit aus (Löffler 2011). Eine Untersuchung zu Flexibilitätsstrategien in der Endmontage findet sich bei ROSCHER. Obwohl eine Solitärlinie im idealen Betriebspunkt effizient ist, wird auf Volumenänderungen durch häufiges Neuaustakten reagiert. Dies wirkt sich negativ auf die Nutzung von Lerneffekten aus. Fahrzeugflexible Montagelinien erlauben eine Kapazitätsverschiebung und damit eine bessere Reaktionsmöglichkeit auf Nachfrageverschiebungen zwischen den Fahrzeugen. Eine Neuaustaktung ist dadurch seltener notwendig. Gegenüber Solitärlinien können

fahrzeugflexible Montagelinien demnach nachweislich besser auf Nachfrageänderungen reagieren, wodurch sich die Anzahl benötigter Montagelinien im Produktionsnetzwerk und folglich auch die Investitionskosten reduzieren lassen. Zudem übertragen sich Lernkurveneffekte bisheriger Fahrzeuge teilweise auf Neuanläufe, wodurch in fahrzeugflexiblen Montagelinien gegenüber Solitärlinien weniger Mitarbeiter benötigt werden. Allerdings ist bei fahrzeugflexiblen Montagelinien das Investitionsrisiko erhöht, da bereits zum Planungszeitpunkt die Flexibilität installiert wird. Diese Investitionen werden bei Solitärlinien hingegen möglichst weit in die Zukunft geschoben. Weiter ist auch das Betriebskostenrisiko höher. Steigt die Nachfrage für ein oder mehrere Fahrzeuge stärker als der Nachfragerückgang bei anderen auf der Linie montierten Fahrzeugen, müssen deutlich früher Arbeitszeitmodelle angepasst bzw. Neuaustattungen vorgenommen werden. Das führt zu Anpassungskosten und Effizienzverlusten (Roscher 2008).

LÖFFLER untersucht die Zusammenführbarkeit von Fahrzeugen anhand des sog. Ähnlichkeitsgrades. Dazu werden die Geometrien, die Dimensionen und das Gewicht der Fahrzeuge betrachtet. Weiter sind die Bauweise und die technologische Ausstattung und damit das Produktkonzept entscheidend. Auch der jeweilige Fertigungsaufwand, die Ausstattungslinien sowie die konstruktiv festgelegten Montageabläufe sollten ähnlich sein (Löffler 2011).

Kaum prognostizierbare Nachfrageentwicklungen rechtfertigen die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien. Ein geringer Ähnlichkeitsgrad zwischen den Fahrzeugen erschwert dabei die Montageplanung.

### **2.3.2 Ansätze zur Planung produktflexibler Serienmontagen**

Die Montagestruktur repräsentiert die fahrzeugspezifische Reihenfolge, die aus logischer und zeitlicher Sicht für die Montage einzuhalten ist (Bullinger et

al. 1986). Dabei existieren Montagetätigkeiten, die direkt hintereinander durchzuführen sind sowie Tätigkeiten, die nicht zwingend aufeinanderfolgen müssen und damit Freiheitsgrade in der Anordnung aufweisen. Montageablaufstrukturen beschreiben diese Abfolgen und können über Vorranggraphen dargestellt werden (Bullinger et al. 1986; Zeile 1995). *„Ein Vorranggraph ist eine netzplanähnliche Darstellung von Teilaufgaben der Montage, wobei die Teilaufgaben als Knoten und die Abhängigkeitsbeziehungen als Verbindungslinien (Kanten) zwischen den Knoten dargestellt werden. Die Teilaufgaben werden zum Zeitpunkt der frühesten Ausführbarkeit eingetragen. Das Ende der von einem Knoten ausgehenden Kante verdeutlicht den Zeitpunkt, zu dem die Teileverrichtung spätestens ausgeführt sein muss“* (Westkämper et al. 2006). Für rechnerbasierte Systeme eignet sich die Speicherung solcher Vorranggraphen mittels einer Matrix (Zeile 1995). FÖRSTER strukturiert Teilflusssysteme in der Fertigung nach Linien-, Punkt- und Netzstrukturen und verwendet dazu Verbindungsmatrizen zur Darstellung der Abhängigkeiten der Vor- und Nachfolgerprozesse (Förster 1983).

Vorranggraphen können wahlweise durch eine schrittweise Demontage des Produktes oder aber auf Ebene der Einzelteile aufgebaut werden (Westkämper et al. 2006). DEUTSCHLÄNDER beschreibt den Aufbau von Vorranggraphen mittels Kontaktflächen- und Fügepartneranalyse, wozu CAD-Daten herangezogen werden (Deutschländer 1989). SEIDEL empfiehlt die zunächst mehrfach durchzuführende Montage und Demontage eines Erzeugnisses. Dadurch lassen sich alternative Verbaureihenfolgen aufzeigen, die nachgelagert zusammenzuführen sind. Die Generierung eines annähernd vollständigen Vorranggraphen erfolgt durch die Wiederholung des Vorgehens, bis keine Veränderungen mehr auftreten (Seidel 1998). AMMER beschreibt als einer der ersten

die rechnergestützte Generierung von Montageablaufstrukturen und Darstellung dieser als Vorranggraphen. Der Grobvorranggraph wird dabei erzeugt, indem Einzelteile in der Produktstruktur eliminiert und nachgelagert jeweils für das Zusammenführen von Baugruppen Tätigkeit als Knoten gesetzt werden. Jeder Tätigkeitsknoten entspricht dabei einem Montageumfang (Ammer 1985). Diese Bottom-Up-Ansätze bauen nicht auf bestehenden Montagelinien auf.

Dieser Prozess kann auch umgekehrt nach einem Top-Down-Ansatz auf Grundlage bestehender Montagelinien erfolgen. ALTEMEIER greift für die Ermittlung der Freiheitsgrade innerhalb eines Vorranggraphen auf die bestehende lineare Anordnung der Arbeitsvorgänge über alle Fahrzeugvarianten zurück. Unter der Annahme, dass Arbeitsvorgänge mit unterschiedlichen Fahrzeugsprachen keinen Vorrangrestriktionen unterliegen, werden diese danach aufgetrennt. Anschließend werden sich variantenbedingt substituierende Arbeitsvorgänge gesplittet und als variante Arbeitsvorgänge gekennzeichnet. Zudem lassen sich durch den Vergleich früherer Montagereihenfolgen weitere Freiheitsgrade identifizieren (Altemeier 2009).

Ebenfalls basierend auf der Montagereihenfolge eines Referenzfahrzeugs erzeugt WEYAND einen Prozessgraphen, der fahrzeugübergreifend gilt und dabei variantenspezifische Unterschiede ausweist. So können existierende Prozesse in der Montagereihenfolge für bestimmte Varianten nicht genutzt werden, sodass andere Prozesse notwendig sind. Zudem kann der Fall auftreten, dass gegenüber einer Referenzvariante ein zusätzlicher Prozess notwendig bzw. ein bestehender Prozess nicht benötigt wird. Über die Verbraurate und der daraus abgeleiteten Häufigkeit, mit der ein derartiger Montageprozess durchlaufen wird, lässt sich deren Bedeutung ableiten. Die Tätigkeiten sind variantenspezifisch auf die Stationen aufzuteilen und auszutakten. Eine Neuaustak-

tung einer Montagestation ist notwendig, wenn das Volumen über Parallelstationen, Anpassungen der Anzahl an Montagemitarbeitern sowie einen veränderten Automatisierungsgrad angehoben bzw. gesenkt wird (Weyand 2010). Das EU-Projekt MYCAR (Flexible Assembly Processes for the Car of the Third Millennium) baut auf dem bei WEYAND beschriebenen Vorgehen auf. Anhand der Varianz durch die Überlagerung verschiedener Prozess- und Ressourcengraphen wird der Entscheidungsprozess für bzw. gegen die Integration eines Fahrzeuges auf einer bestehenden Linie unterstützt.

Der varianteninduzierten Planungskomplexität kann nach ZENNER mit einem durchgängigen Variantenmanagement begegnet werden, wobei die Produkt-, Prozess- und Ressourcenvarianten zu beachten sind. Über den Aufbau einer generalisierten Produktstruktur erfolgt die Verknüpfung der Daten der Produkt- und technischen Produktionsplanung (Zenner 2006). BRUNNER nutzt variantenübergreifend gültige Produkt- und Montagestrukturen. Unter Berücksichtigung des Automatisierungsgrades werden die Arbeitsvorgänge innerhalb des Montagevorranggraphen zu Montagemodulen zusammengefasst. Innerhalb dieser Montagemodule ist eine Standardisierung der Prozesse und Betriebsmittel möglich (Brunner 2016). RUDOLF empfiehlt die wissensbasierte Montageplanung. So sind bereits in der Produktstruktur Informationen zu hinterlegen, die Baugruppen und Einzelteile variantenspezifisch beeinflussen, beispielsweise der Verbau motorabhängig unterschiedlicher Batterien. Weiter können variantenspezifisch unterschiedliche Prozesszeiten hinterlegt werden. Darüber lassen sich Auswirkungen von Produktänderungen auf die Prozesse transparent darstellen (Rudolf 2007).

Ansätze zur Fließbandabstimmung für Einprodukt-Fälle scheiden für Mehrprodukt-Fälle aus. BOYSEN setzt daher auf den Aufbau eines Mischgraphen. Dabei



erfolgt die Austaktung nicht fahrzeugspezifisch, sondern mehrere Montageabläufe werden in eine Einprodukt-Fließfertigung überführt. Dazu wird die prognostizierte Fahrzeugnachfrage mit der jeweils fahrzeugspezifischen Montagedauer multipliziert und anschließend die Summe dieser Werte durch die Gesamtanzahl an Fahrzeugen dividiert. Das ermöglicht die Bestimmung einer durchschnittlichen Montagedauer. Weiter erfolgt auf einer zunächst durchgeführten Produktionsprogrammplanung die Reihenfolgenplanung (Boysen 2005). DÖRMER nutzt ebenfalls die Produktionsprogramm- und Reihenfolgenplanung zur Reduzierung der aus unterschiedlichen, fahrzeugspezifischen Montagezeiten resultierenden Unter- bzw. Überlastungen in den Montagestationen (Dörmer 2013). Eine nicht prognostizierte und damit in der Montageauslegung nicht berücksichtigte Nachfrageverschiebung zwischen varianten Fahrzeugen würde zu einer Unter- bzw. Überlastung führen, sodass die geforderte Fahrzeugflexibilität nicht gewährleistet wäre. Dazu finden sich bei PRÖPSTER Maßnahmen zur kurzfristigen Austaktung (Pröpster 2016) und bei WEIß eine Methode zur Berücksichtigung des Driftverhaltens bereits in der taktischen Planung einer automobilen Endmontagelinie (Weiß 2000). KLUGE entwickelt Szenarien für die Stückzahlentwicklungen über den Produktlebenszyklus. Darauf aufbauend erfolgt die Definition unterschiedlicher Kapazitätsbereiche, die den Umgang mit den Stückzahlschwankungen über die Zeit ermöglichen. Die finale Austaktung erfolgt durch den Planer (Kluge 2011).

Werden die Knoten eines Vorranggraphen in eine lineare Anordnung überführt, wie es zur Beschreibung einer Montagelinie notwendig ist, können alternative Lösungen generiert werden. Existieren alternative Montagereihenfolgen, so sind diese anhand definierter Zielgrößen zu bewerten. LANDHERR weist darauf hin, dass die Bewertung alternativer Systemkonfigurationen als Kompromiss der mitunter konkurrierenden Zielgrößen zu verstehen ist. Daher sollten die

ausgewählten Ziele und deren Gewichtung im Vorfeld situationsbezogen definiert werden, um darüber die Vergleichbarkeit der alternativen Systemkonfigurationen sicherzustellen (Landherr 2014). IT-gestützt können neben der Zuordnung der Fahrzeugmodule weitere Informationen hinterlegt werden, wie die benötigten Betriebsmittel, Hilfsmittel, benötigte Zeiten, die Materialversorgung und Qualifikationen der Arbeitskräfte (Seidel 1998; Landherr 2014).

Der im Sonderforschungsbereich 467 entwickelte Algorithmus zur dynamischen Fabrikstrukturierung verfolgt einen beschleunigten Planungsprozess sowie die Nutzung der Konfigurationen zur Layoutoptimierung nach Durchlaufzeit, Wege und Umrüstkosten. Zudem werden Abhängigkeiten zwischen den Planungsobjekten und Gebäuderestriktionen berücksichtigt. Nach der Rekombination einer Startkonfiguration erfolgt die Ermittlung der Lösungsgüte. Dies wird bis zur Erreichung einer hohen Lösungsgüte wiederholt. Eine veränderte Nachfrage wirkt sich auf das Produktionsprogramm und damit auch auf die Materialflüsse aus, wodurch eine Anpassung der Fertigungsstruktur aus wirtschaftlicher Sicht zweckmäßig sein kann. Der Planungstisch eignet sich zur Unterstützung des Planungsprozesses. Dabei sind das Hallenlayout sowie die sich darin befindenden Maschinen, Arbeitsplätze und Materialbelieferungen und -bereitstellungen visualisiert. Diese können im Projektteam für die Konfiguration von Alternativen genutzt werden (Westkämper 2002).

Im Forschungscampus ARENA2036 (Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles) wird die lineare Anordnung von Montagemodulen aufgelöst. Abhängig von der Fahrzeugkonfiguration müssen dadurch nicht alle Montagemodule durchlaufen werden bzw. die Reihenfolge des Durchlaufs der Montagemodule ist fahrzeugspezifisch wählbar. Für ein festgelegtes Produktionsprogramm würden sich für die Montagemodule unterschied-

liche Taktzeiten ergeben. Da die zukünftig nachgefragten Fahrzeugkonfigurationen jedoch nicht prognostizierbar sind, muss die Kapazität der Montagemodule aus Gründen der Wirtschaftlichkeit anpassbar sein.

SEIDEL weist darauf hin, dass die frühzeitige Betrachtung der Montageablaufstrukturen bereits während der Konstruktionsphase der Fahrzeuge erfolgen sollte und sich daraus die Vorteile des Simultaneous Engineering ergeben (Seidel 1998). FUSCH sieht die Integrationsfähigkeit von Fahrzeugen auf bisherigen Montagelinien dadurch gegeben, dass diese einen kompatiblen Montagevorranggraphen aufweisen und damit sichergestellt ist, dass der Montageablauf und der Materialfluss einheitlich sind. LOTTER ET AL. gehen dabei einen Schritt weiter und fordern, dass für flexible Montageabläufe bereits bei der Konstruktion Zwangsfolgen in der Montage von Baugruppen möglichst zu vermeiden sind (Lotter *et al.* 2012).

Festzuhalten ist, dass beim Aufbau von Montagevorranggraphen zwischen Top-down- und Bottom-up-Ansätzen zu differenzieren ist. Letztere bieten den Vorteil, dass nicht auf bestehenden Planungsergebnissen aufgebaut wird. Das stellt sicher, dass Montagelinien für zukünftige, von aktuellen Fahrzeugen abweichende Montagereihenfolgen bestimmbar sind. Zudem wird die Identifikation einer disruptiven, von bestehenden Montagekonfigurationen abweichenden Lösung möglich. Die Austaktung im Rahmen der Feinplanung erfolgt entweder fahrzeugspezifisch oder für eine festgelegte Fahrzeugnachfrage, wodurch die Variantenmixflexibilität eingeschränkt wird. Zudem wird die Fahrzeugentwicklung in der Pflicht gesehen, einen standardisierten Montageablauf zu gewährleisten.

## **2.4 Reflexion bestehender, wissenschaftlicher Ansätze zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen**

Langfristig werden sich in der Automobilindustrie die Unternehmen durchsetzen, die auch in einem turbulenten Umfeld Fahrzeuge wirtschaftlich montieren und damit Mobilität anbieten können. Begründet in einem weiter wachsenden Fahrzeugportfolio und kaum prognostizierbaren Nachfrageentwicklungen wird die Forderung an die Montageplanung nach fahrzeugflexiblen Montagelinien zukünftig zunehmen. Das betrifft die Planung neuer ebenso wie den häufigsten Planungsfall der Weiterentwicklung bestehender Montagelinien. Eine Voraussetzung für die Konfiguration fahrzeugflexibler Montagelinien ist die vorgelagerte Modularisierung der Montageprozesse, da auf der Ebene der Arbeitsvorgänge eine Planung komplexitätsbedingt nicht möglich ist.

In der Literatur sind Ansätze zur Fahrzeugmodularisierung ebenso wie zum Aufbau modularer Montagelinien zu finden. Auch die Vorteile einer fahrzeugflexiblen Montagelinie wurden bereits untersucht und nachgewiesen. Jedoch konnte kein Ansatz identifiziert werden, der die Modularisierung der Montageprozesse und die Freiheitsgrade in der Anordnung dieser Montagemodule gezielt für die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien nutzt. Dies gilt sowohl für die Neuplanung als auch für die Weiterentwicklung bestehender Montagelinien. In Tabelle 2-2 werden themenrelevante Arbeiten der Zielsetzung dieser Arbeit gegenübergestellt. Wird ein Teil der Zielsetzung in der jeweiligen Arbeit nicht thematisiert, ist dies mit „nicht erfüllt“ bewertet. Finden sich in den Ansätzen zwar themenrelevante Überlegungen, die sich allerdings nicht auf die variantenreiche Serienmontage der Automobilindustrie übertragen lassen, gelten diese als „teilweise erfüllt“. Mit „erfüllt“ sind die Arbeiten bewertet, die Lösungsansätze für die hier vorliegende Zielsetzung liefern. Diese Arbeiten wurden dann auch in den vorangegangenen Kapiteln 2.2 und 2.3 erörtert.

**Zielerfüllung existierender Methoden zur Planung von Montagelinien**

<b>Autoren</b>	Modularisierung von Montageprozessen	methodischer Aufbau von Montagelinien	Planung fahrzeug-/variantenmixflexibler Montagelinien	Berücksichtigung von Restriktionen bestehender Montagesysteme
(Altemeier 2009)	○	◐	◐	◐
(Ammer 1985)	●	○	○	○
ARENA2036	●	○	●	○
(Boysen 2005)	○	●	●	○
(Brocke 2011)	●	○	○	○
(Brunner 2016)	●	○	◐	◐
(Fusch 2004)	○	○	◐	●
(Jonas 2000)	◐	◐	○	○
(Klepsch 2004)	●	○	○	○
(Kluge 2011)	○	◐	◐	○
(Landherr 2014)	●	○	◐	◐
MyCar	○	◐	●	○
(Neuhausen 2002)	●	○	◐	○
(Rudolf 2007)	○	◐	●	○
(Seidel 1998)	●	◐	○	○
(Weiß 2000)	○	●	●	○
(Weyand 2010)	○	◐	●	○
(Zeile 1995)	●	◐	◐	○

○ nicht erfüllt

◐ teilweise erfüllt

● erfüllt

Tabelle 2-2: Bewertung eines Auszugs bisheriger Lösungsansätze

Es konnte kein Planungsansatz ermittelt werden, der die Freiheitsgrade in der Anordnung zuvor bestimmter Montagemodule für die Planung neuer fahrzeugflexibler Montagelinien bzw. die Integration zusätzlicher Fahrzeuge auf bereits bestehenden Montagelinien nutzt. Bei REFA wird empfohlen, die Grobplanung nur anhand von repräsentativen Werkstücken durchzuführen, die sich durch einen zeitlich hohen Produktionsanteil und eine charakteristische Arbeitsvorgangfolge auszeichnen. Zur Strukturierung der Vielzahl an Reihenfolgenbeziehungen in der Montage hat sich der Vorranggraph bewährt (REFA 1990). Fußend auf den Verbindungsmatrizen nach SCHMIGALLA untersuchte FÖRSTER Flusssysteme in der Fertigung (Schmigalla 1970; Förster 1983). Diese umfassen die Informationen eines Montagevorranggraphen und infolgedessen auch mögliche Montageabfolgen. In der Montageplanung sollten mehrere alternative Montagefolgen bewertet werden (Westkämper *et al.* 2006). Begründet in der großen Anzahl alternativer Montageabläufe ist dies mit einem großen Aufwand verbunden und wird daher in der Regel vermieden (Landherr 2014). Gleichzeitig sieht RUDOLF bei der wissensbasierten Montageplanung weiteren Forschungsbedarf in „*einer automatisierten Erzeugung von Montagevorranggraphen und deren Überprüfung im Planungsprozess*“ (Rudolf 2007).

Eine Modularisierung der Montagelinie ist notwendig, da die Anzahl von mehreren tausend Arbeitsvorgängen und deren gegenseitigen Vorgänger- und Nachfolger-Beziehungen die Planung einer automobilen Endmontage unmöglich machen. Zwischen diesen Montagemodulen bestehen nachweislich Freiheitsgrade, die zum aktuellen Zeitpunkt nicht methodisch für die Planung fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen genutzt werden. Diese Forschungslücke, verdeutlicht durch Abbildung 2-8, soll mit Hilfe dieser Arbeit geschlossen werden.

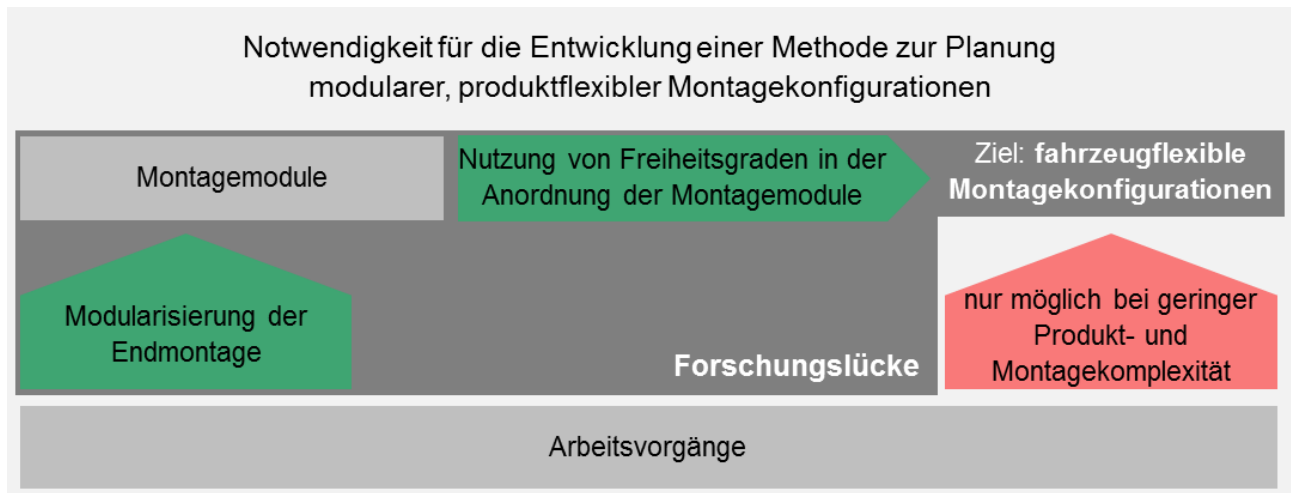


Abbildung 2-8: Forschungslücke

Im Weiteren sind die Grundlagen zur Planung fahrzeugflexibler Montagelinien zu schaffen, um anschließend die notwendigen Bausteine zur Planung modularer, fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen bestimmen und erarbeiten zu können.

---

### **3 Grundlagen zur Planung fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen**

Die Eingangsgrößen der Montageplanung leiten sich u.a. aus strategischen Vorgaben ab, die wiederum den Planungsprozess beeinflussen. Zusätzlich werden Steuergrößen der Endmontage erörtert, die aktuelle und zukünftige Montagelinien tangieren und daher bereits während der Planung zu berücksichtigen sind. Zudem bildet die Graphentheorie die Grundlage für die Betrachtung von Montagevorranggraphen.

#### **3.1 Eingangsgrößen der Montageplanung**

Die Montageplanung wird neben den Fahrzeugen auch durch das Planungsszenario und die standortspezifischen Rahmenbedingungen beeinflusst.

##### **3.1.1 Strategische und taktische Montageplanung**

Bei der Montageplanung ist zu differenzieren zwischen der operativen (1-2 Jahre), der taktischen (2-5 Jahre) und der strategischen Planung (5-15 Jahre). Mit zunehmendem Planungshorizont steigt die Planungsunsicherheit und sinkt die Planungsgenauigkeit (Westkämper *et al.* 2016).

##### **Strategische Montageplanung**

Ziel der strategischen Planung ist die Vorbereitung des Unternehmens auf zukünftige, häufig von extern induzierte Herausforderungen (Domschke *et al.* 1997). Dazu ist die Montage so auszurichten, dass die Wertschöpfung langfristig sichergestellt werden kann. Darunter wird der Transformationsprozess zwischen Input und Output verstanden, für den der Kunde bereit ist zu zahlen. Aus der Unternehmensstrategie leitet sich die Produktentwicklungsstrategie und davon beeinflusst, die Produktionsstrategie ab, weshalb der Planungshorizont nicht zuletzt auch von der Lebensdauer der Fahrzeuge, Technologien



und technischen Einrichtungen abhängt (Westkämper *et al.* 2016). Für den zielorientierten Umgang mit zukünftigen Herausforderungen hat WESTKÄMPER den Technologiokalender entwickelt (vgl. Abbildung 3-1). Zu den Produkten werden auch zukünftig zu erwartende Produkt- und Produktionstechnologien berücksichtigt, strukturiert und zeitlich synchronisiert. Aus Produktionssicht lassen sich daraus Entwicklungen und damit einhergehende Investitionsnotwendigkeiten in den Werken des Produktionsnetzwerkes ableiten (Westkämper 2004).

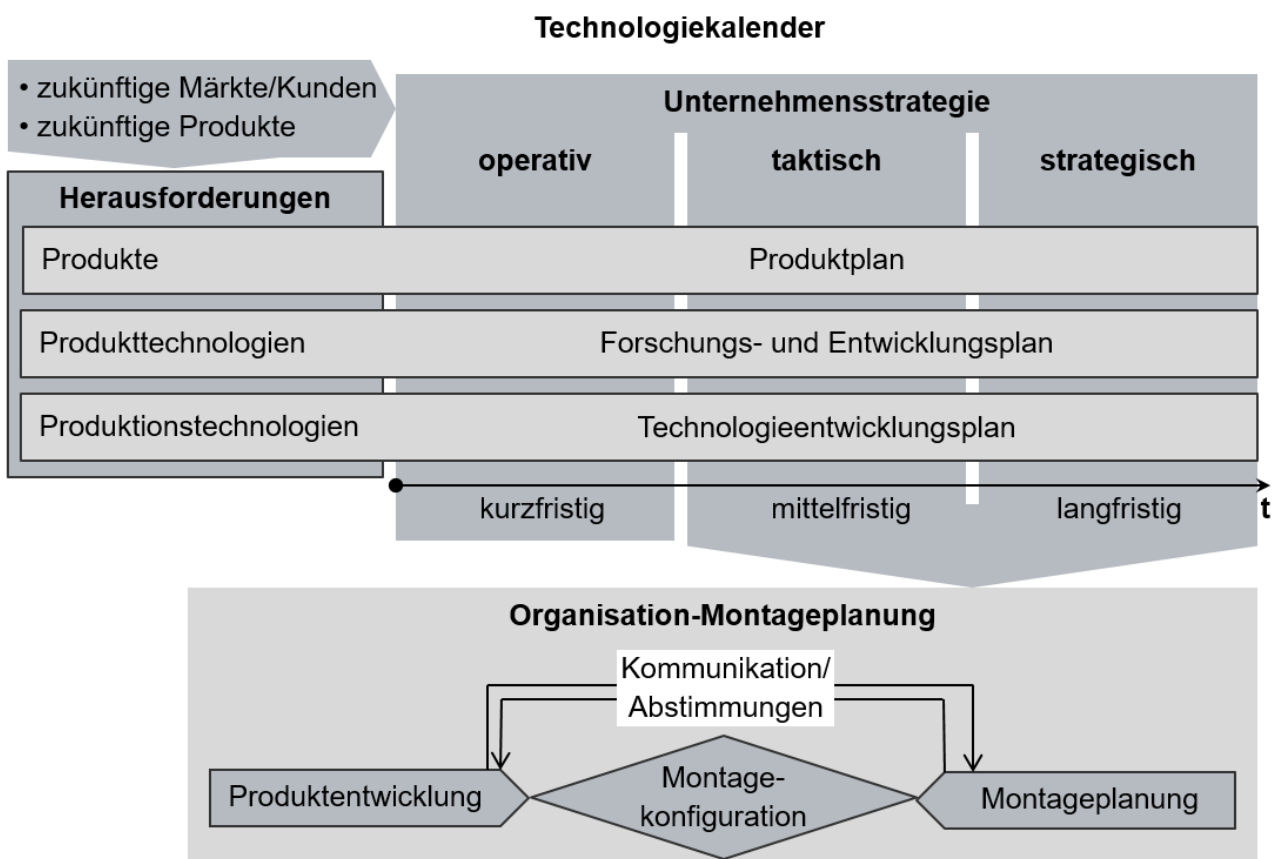


Abbildung 3-1: Technologiokalender in Anlehnung an (Westkämper 2004) und der Einfluss auf die Organisation der Montageplanung

Das Simultaneous Engineering sieht eine permanente Abstimmung zwischen der Fahrzeugentwicklung und der Montageplanung vor (vgl. Abbildung 3-1). Dadurch können, dem Ansatz der montagegerechten Produktgestaltung folgend, Änderungen frühzeitig angestoßen werden (Jonas 2000).

## Taktische Montageplanung

Die taktische Montageplanung umfasst neben dem Ausplanen einer Linie auch die Bearbeitung von Prüfaufträgen. Dazu zählt auch die Untersuchung, ob zusätzliche Derivate oder Fahrzeugarchitekturen auf einer bestehenden Montagelinie integrierbar sind bzw. welche fahrzeug- und montageseitigen Anpassungen dafür vorgenommen werden müssten. Da eine Montagelinie mehrere Jahrzehnte betrieben wird, sind die Anforderungen der strategischen Montageplanung bei der taktischen Montageplanung zu berücksichtigen und auch umzusetzen. Die Eingangsgrößen für die taktische Montageplanung lassen sich aus strategischen Zielbildern ableiten, die eine in der Zukunft liegende Idealmontage beschreiben. Abbildung 3-2 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

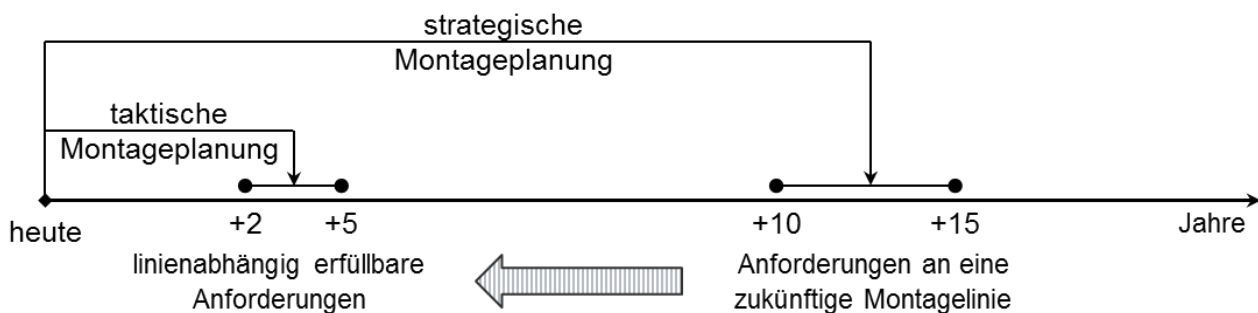


Abbildung 3-2: Einfluss der strategischen auf die taktische Montageplanung

Eine neu geplante Montagelinie sollte die strategischen Anforderungen erfüllen. Eine bestehende Montagelinie kann durch die Gegebenheiten meistens nicht alle strategischen Ziele erfüllen, dennoch sollte diese in Richtung einer Idealmontage weiterentwickelt werden.

### 3.1.2 Greenfield- und Brownfield-Planung

Nach der VDI 5200 ist zwischen vier Planungsfällen zu differenzieren: Neuplanung, Umplanung, Rückbau und Revitalisierung (VDI 5200). Für diese Arbeit

sind die Neuplanung im sog. Greenfield sowie die Umplanung im sog. Brownfield entscheidend.

### **Greenfield-Planung**

Bei einer Planung im Greenfield wird eine Montagelinie vollständig neu aufgebaut. Dies ist notwendig, wenn das Produktionsnetzwerk langfristig nicht über ausreichende Stückzahlkapazitäten verfügt oder ein neues Fahrzeug nicht wirtschaftlich in bestehenden Montagelinien hergestellt werden kann. Die Auswahl eines dafür geeigneten Standortes ist abhängig von vielen Produktionsfaktoren, u.a. der Verfügbarkeit von qualifizierten Mitarbeitern, die Nähe zu Lieferanten, aber auch die Fläche, die Infrastruktur, die lokalen Arbeitslöhne und das lokale Arbeitsrecht, was maßgeblich Einfluss auf die möglichen Arbeitszeitmodelle hat. Da keine bestehenden Strukturen und Anlagen vorhanden sind, unterliegt eine Greenfield-Planung nur wenigen Restriktionen. Die Vorteile bei diesem Planungsfall bestehen darin, die bisher gemachten Erfahrungen bei bestehenden Montagelinien in die Neuplanung mit einfließen zu lassen. Somit erfüllen neue Montagelinien in der Regel den aktuell gültigen Montagestandard, wie u.a. die standardisierte Montagekonfiguration.

### **Brownfield-Planung**

Die meisten Planungen erfolgen allerdings im Brownfield, wobei von einer existierenden Montagelinie ausgegangen werden muss. Deshalb sind die vorhandenen Produktionsfaktoren und Restriktionen während der Planung zu berücksichtigen. Hierzu zählen u.a. Gebäuderestriktionen und fest in die Hallenperipherie installierte Anlagentechnik. Ein Beispiel ist die Montagestation „Hochzeit“, in der das Fahrwerk mit der Karosserie verheiratet wird. Diese stellt in der Regel eine hoch automatisierte und fest in die Montagelinie installierte Anlage dar, weshalb die Planung der Montage häufig in vor und nach der „Hochzeit“ aufgeteilt wird. Erschwerend kommt hinzu, dass jede Neuplanung

eine Weiterentwicklung des Montagestandards darstellt, sodass sich die Montagelinien im Produktionsnetzwerk meist unterscheiden. Daher muss die Planung im Brownfield für jede Montagelinie spezifisch erfolgen. Ziel dabei ist, mit möglichst wenigen Anpassungsmaßnahmen und damit einhergehend minimalen Kosten, zusätzliche oder sich substituierende Fahrzeuge auf die bestehende Montagelinie zu integrieren und diese dennoch kostengünstig und dem Qualitätsstandard folgend montieren zu können.

### **3.1.3 Montagenetzwerk und Montagestandorte als Einflussgrößen**

Abhängig vom Lohnniveau wird zwischen Ländern mit hohen und niedrigen Löhnen differenziert, sog. High- und Low-Cost-Countries. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist der Automatisierungsgrad in High-Cost-Countries meist höher. Dient die Automatisierung der Gewährleistung der Produkt- bzw. Prozessqualität und/oder den Arbeitsbedingungen, insbesondere der Ergonomie, so ist diese unabhängig vom Lohnniveau an allen Standorten gleich zu wählen.

Eine entscheidende Frage ist, ob alle oder nur ausgewählte Montagelinien im Produktionsnetzwerk als fahrzeugflexible Montagelinien ausgelegt werden sollten. Eine Solitärlinie ist in einem bestimmten Betriebspunkt am wirtschaftlichsten. Eine fahrzeugflexible Montagelinie erreicht diese geringen Stückkosten zwar nicht, reagiert jedoch deutlich schwächer auf Nachfrageverschiebungen zwischen den Fahrzeugen. Ein theoretisches Gedankenkonstrukt ist, dass eine fahrzeugflexible Montagelinie unwirtschaftlich sein darf, wenn dadurch die Solitärlinien konstant im gewinnoptimalen Betriebspunkt betrieben werden können und dadurch die Wirtschaftlichkeit des gesamten Produktionsnetzwerkes steigt. Dies ist abhängig vom existierenden Produktionsnetzwerk und der strategischen Weiterentwicklung des Netzwerkes zu bewerten.

## 3.2 Steuergrößen der automobilen Endmontage

Beim Betrieb einer automobilen Endmontagelinie sollte ein Montagesystem auf veränderte Anforderungen anpassbar sein. Zu den Steuergrößen zählen dabei die Montagezeiten, der Variantenmix sowie Maßnahmen zur Effizienzsteigerung. Während der Montageplanung wird der Flexibilitätskorridor festgelegt, in dem eine Steuerung zukünftig möglich sein soll. Deshalb ist dieser maßgebend für die Planung einer Endmontagelinie.

### 3.2.1 Montagezeiten

Die Montagezeiten beeinflussen die Montageplanung und die Gestaltung der Montagelinie. So gibt die **Betriebsnutzungszeit** (BNZ) über einen definierten Zeitraum die Stundenanzahl an, in der Fahrzeuge montiert werden. Die maximal mögliche Betriebsnutzungszeit pro Jahr ist demzufolge 365 Tage mit jeweils 24 Stunden. Allerdings gibt es Einschränkungen. Die Flexibilität der technischen Kapazität ist nach oben durch notwendige Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten und nach unten durch die Deckung der Fixkosten begrenzt. Bei der organisatorischen Kapazität resultiert die obere Grenze des Flexibilitätskorridors aus den verfügbaren Arbeitskräften und bestehenden Arbeitszeitmodellen. Da ein Personalabbau ebenfalls nicht ohne weiteres möglich ist, sind die Personalkosten als fix anzusehen, weshalb bei der organisatorischen Flexibilität nach unten zudem eine Fixkostengrenze besteht (Löffler 2011). Die theoretisch mögliche Betriebsnutzungszeit wird demzufolge durch die technische und organisatorische Flexibilität eingeschränkt (vgl. Abbildung 3-3).

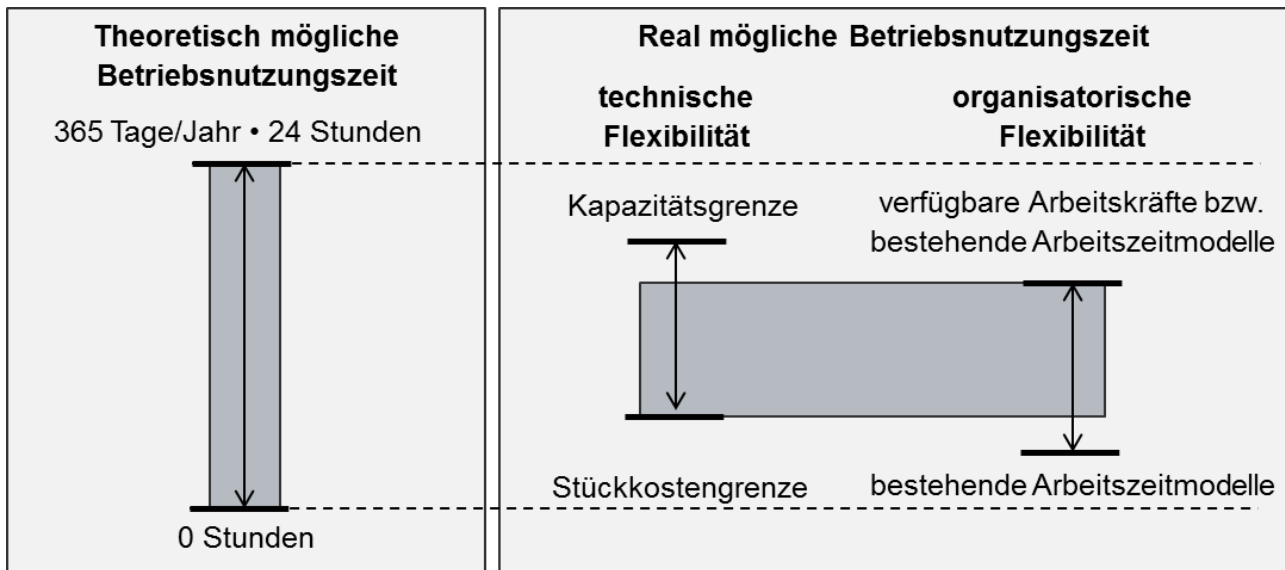


Abbildung 3-3: Korridor der Flexibilität hinsichtlich der Betriebsnutzungszeit

Bei der fahrzeugspezifischen **Montagezeit pro Einheit (MTE)** ist zwischen der konstruktiv bedingten und der realen Dauer der Montage für ein Fahrzeug zu differenzieren. Die konstruktiv bedingte Montagedauer berechnet sich aus der Summe aller konstruktiv notwendigen Montagetätigkeiten. Allerdings repräsentiert diese nicht die real benötigte Montagedauer eines Fahrzeuges, dazu muss der Verschwendungsanteil mitberücksichtigt werden. Beispiele dafür sind Laufwege, Kommissionieren und redundante Prüfvorgänge. Für die rechnerische Zeitermittlung zur Durchführung einer Montagetätigkeit kommen verschiedene Verfahren zur Anwendung, u.a. die in deutschen Unternehmen am häufigsten genutzte Methode „Methods Time Measurement (MTM)“. Die Basis dabei sind mit Zeiten hinterlegte, elementare Grundbewegungen, wie u.a. Biegen, Beugen, Bücken. Die manuellen Tätigkeiten werden in diese aufgeteilt und mit den Normzeiten hinterlegt, die in tabellarischer Form festgeschrieben sind. Die ermittelte Zeit zur Durchführung einer Tätigkeit wird Istzeit genannt. Ist ein eingearbeiteter und geübter Mitarbeiter in der Lage die Tätigkeit über eine Schicht durchschnittlich innerhalb der Istzeit zu erfüllen, so hat dieser einen Leistungsgrad von 100%. Der Leistungsgrad schwankt jedoch zwischen

den Mitarbeitern. Die Zeiten sind daher für unterschiedliche Mitarbeiter mit unterschiedlichem Leistungsgrad zu erheben. Die durchschnittlich benötigte Zeit ist die Normalzeit. In der Montageplanung werden diese Zeitwerte als Sollzeiten gesehen. Erweitert um Verteil- und Erholzeitzuschläge lassen sich so die Vorgabezeiten ermitteln (Lotter *et al.* 2012).

Die **Durchlaufzeit** (DLZ) beschreibt die gesamte Dauer, die sich ein Fahrzeug während des Montagebetriebs auf der Montagelinie befindet. Wird diese reduziert, sinkt auch der Auftragsbestand (Domschke *et al.* 1997). Begründet im geringen Automatisierungsgrad der Automobilmontage geschieht dies primär über die Erhöhung der Anzahl an Arbeitskräften in den Montagestationen, die sog. AK-Dichte. Eine Erhöhung der AK-Dichte entspricht einer Parallelisierung von Arbeitsvorgängen, da mehrere Mitarbeiter in einer Montagestation parallel Montagetätigkeiten durchführen. Würde beispielsweise nur eine Person ein vollständiges Fahrzeug montieren, so wäre die Durchlaufzeit gleich der fahrzeugspezifischen Montagezeit. Montieren allerdings zwei Arbeitskräfte das Fahrzeug gleichzeitig, so kann die Durchlaufzeit halbiert werden (vgl. Formel 3-1). Bezogen auf eine Montagestation ist darauf zu achten, dass sich die Mitarbeiter in der Durchführung ihrer Tätigkeiten nicht gegenseitig behindern. Dem wird begegnet, indem der mögliche Arbeitsraum an einem Fahrzeug in Arbeitsbereiche aufgeteilt wird, die sog. Fahrzeugansprachen. Sind mehrere Personen in einer Montagestation beschäftigt, sollten die Tätigkeiten so aufgeteilt werden, dass je Fahrzeugansprache nicht mehrere Mitarbeiter gleichzeitig tätig sind.

Der **Montagetakt** ist die Dauer, bis alle Fahrzeuge auf der Montagelinie synchron an die jeweils nachgelagerte Station übergeben werden (Zeile 1995). Durch eine x-fache Parallelisierung einer Montagestation kann dort die Taktzeit um das x-fache erhöht werden. Allerdings steigen dadurch auch die Investi-

tionskosten durch die mehrfache Anschaffung der Betriebsmittel etc. (Boysen 2005). In der letzten Montagestation verlässt bei jedem Takt ein vollständig montiertes Fahrzeug die Montagelinie. Eine Reduzierung des Montagetaktes führt demzufolge zu einer Erhöhung der in einer Stunde fertigmontierten Fahrzeuge, die sog. Jobs per Hour. Bei gleicher durchschnittlicher AK-Dichte führt die Reduzierung der Taktzeit zum Bedarf zusätzlicher Stationen, weshalb die Mitarbeiter gegebenenfalls für veränderte Montagetätigkeiten zu schulen sind und bisheriges Erfahrungswissen neu aufgebaut werden muss. Meist können die Montagetätigkeiten einer Montagestation zugeordnet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Dauer der kumulierten Tätigkeiten eines Mitarbeiters die Taktzeit nicht überschreitet. Über ein Balkendiagramm kann die Dauer von Tätigkeiten abgebildet werden. Bezogen auf eine Zeitachse entspricht die Länge eines Balkens dabei der Zeit, die für die Durchführung der Tätigkeit benötigt wird (Bullinger *et al.* 1986). Da sich das Montageband mit einer konstanten Geschwindigkeit fortbewegt, kann die Montagezeit der Fahrzeuge auch in die Länge der Montagelinie umgerechnet werden (vgl. Formel 3-1).

$$DLZ [min] = MTE [min] \div Anzahl\_AK$$

$$Stationslänge [m] = Bandgeschwindigkeit \left[ \frac{m}{min} \right] \cdot Takt [min]$$

$$Stationsanzahl = MTE [min] \div (Takt [min] \cdot \emptyset\_AK\_Dichte)$$

$$Montagelinie [m] = Stationslänge[m] \cdot Stationsanzahl$$

$$Montagefläche [m^2] = Montagelinie [m] \cdot Montagebreite [m]$$

Formel 3-1: Mathematischer Zusammenhang der Steuergrößen in der Montageplanung

Insbesondere bei einer Planung im Brownfield liegt in der Regel eine Flächenrestriktion vor. Aber auch im Greenfield bedeutet ein geringerer Flächenbedarf



weniger Investitionen. Mit den Fahrzeugabmessungen steigen auch die erforderlichen Stationsabmessungen und damit die benötigte Montagefläche. Auch eine Erhöhung der Jobs per Hour durch eine kürzere Taktzeit führt dazu, dass mehr Montagestationen benötigt werden, was wiederum einen zusätzlichen Investitionsbedarf zur Folge hat. Die Planungsvariablen sind voneinander abhängig. Über die Beschreibung von Referenzfabriken können diese Variablen gezielt standardisiert werden, um eine systematische Planung zu ermöglichen. Die Standardisierung hat dabei analytisch und wirtschaftlich begründet zu erfolgen.

### **3.2.2 Variantenmix**

Vor Planungsbeginn einer Montagelinie ist festzulegen, welche Fahrzeuge zu berücksichtigen sind. Damit wird auch die fahrzeugspezifische Gesamtmontagedauer, Varianz und erwartete Stückzahlen sowie Produktneuerungen definiert (Bullinger *et al.* 1986). Der Variantenmix beschreibt den Anteil einzelner Fahrzeugmodelle an der gesamten Kapazität der Montagelinie. Trotz Modularisierung der Fahrzeuge sind fahrzeug- und variantenbedingte Montagezeitunterschiede nicht vollständig vermeidbar.

Die Montagelinie kann nach dem Fahrzeug mit der längsten Montagedauer ausgelegt werden. Dadurch ist eine Überlastung der Mitarbeiter, unabhängig von der Fahrzeugreihenfolge, ausgeschlossen (Boysen 2005). Aus Effizienzgründen wird davon in der Praxis aber abgesehen, da in der Regel nicht nur maximal ausgestattete Fahrzeuge bestellt werden. Zum Ausgleich von Störungen und Unter- bzw. Überlastungen sind Puffer nutzbar. Diese führen allerdings zu einem erhöhten Flächenbedarf und auch die Durchlaufzeit steigt (Zeile 1995; Boysen 2005). Deshalb sollten Puffer möglichst vermieden werden.

Anhand des Variantenmix lässt sich die durchschnittliche Montagedauer berechnen. Gleichzeitig ist dann allerdings auch die Reihenfolge der Produkte festzulegen, um eine Überlastung der Mitarbeiter zu vermeiden (Domschke *et al.* 1997). Durch die Nivellierung werden dazu die Fahrzeuge mit längerer und kürzerer Montagezeit gezielt nacheinander eingesteuert, um eine schwankende Auslastung und damit eine erhöhte Belastung der Mitarbeiter zu vermeiden. Diese Reihenfolge wird auch Modellmix oder Produktmix genannt (Liker 2007). Bei der Erstellung des Produktionsprogramms sind den Fahrzeugen bereits Kundenaufträge und damit die Fahrzeugkonfigurationen hinterlegt. Unter Berücksichtigung der Modellmix-Kriterien erfolgt die Festlegung der Reihenfolge, nach der diese Fahrzeuge in die Montagelinie eingesteuert werden, die sog. Perlenkette. Damit ist auch festgelegt, welche Bauteile bzw. Baugruppen zu welchem Zeitpunkt an der Hauptmontage benötigt werden. Aus diesem Grund werden die vorgelagerten Wertschöpfungs- sowie Logistikprozesse über die Perlenkette gesteuert.

Ist der Variantenmix festgelegt und die Montagelinie für eine durchschnittliche Montagedauer geplant, führt eine Änderung der nachgefragten Stückzahlen und damit der Mengenrelation zu einer Über- oder Unterlast der Mitarbeiter. Deshalb muss das System neu geplant werden (Domschke *et al.* 1997).

### **3.2.3 Effizienzsteigerungen**

In der Montagelinie existieren neben wertschöpfenden Prozessen, die aus Kundensicht einen Mehrwert darstellen, auch nicht wertschöpfende Tätigkeiten. Diese gilt es zu minimieren, wofür Lean Management zahlreiche Methoden bietet (Liker 2007). Prozessschwankungen führen dazu, dass die Dauer zur Durchführung eines Prozesses länger ausgelegt wird als notwendig. Durch die

Minimierung der Prozessschwankungen lässt sich auch die Prozessdauer reduzieren. Six Sigma eignet sich für solche Optimierungen (Thun 2002). Im Rahmen von Lean Six Sigma werden die Methoden und das Vorgehen von Lean Management und Six Sigma kombiniert angewandt.

Bei wiederholt durchgeführten Montagetätigkeiten, wie dies in einer getakteten Montagelinie der Fall ist, treten bei Mitarbeitern Lernkurveneffekte ein. Die Durchführung der Tätigkeiten erfolgt in kürzerer Zeit und ohne Qualitätsverluste. Ist bei Nachfolgefahrzeugen bereits eine Vorqualifizierung der Arbeitskräfte vorhanden, überlagern sich die Lernkurven (Roscher 2008; Löffler 2011). Die Modularisierung der Fahrzeuge und die damit verbundene häufigere Durchführung identischer Montageprozesse führt zu einer Steigerung des Lernkurveneffektes (Thun 2002).

Sowohl bei der Reduzierung von nicht wertschöpfenden Prozessen und Prozessschwankungen, als auch durch Lerneffekte ist das Ergebnis dasselbe: eine Reduzierung der zur Durchführung eines Montageprozesses benötigten Zeit und damit die Montagezeit für das gesamte Fahrzeug (MTE). Wurde eine Reduzierung der Montagedauer nur für einzelne Montagestationen erzielt, sollten dort ggf. die Mitarbeiteranzahl reduziert bzw. Leerstationen akzeptiert werden, um die restlichen Montagestationen nicht anpassen zu müssen. Sind durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) und Lerneffekte Zeitreduzierungen in allen Montagestationen erzielbar, sollte die Taktzeit und nicht die Mitarbeiteranzahl reduziert werden. Bei konstanter Betriebsnutzungszeit führt dies zu einer Erhöhung der Stückzahl. Der Vorteil dabei ist, dass die Mitarbeiter dieselben Tätigkeiten weiterhin ausführen, wodurch die Lerneffekte bestehen bleiben. Neben dem Planungsaufwand würde durch eine Reduzierung der Mitarbeiteranzahl eine erneute Austaktung notwendig, wodurch sich

die Tätigkeiten der Mitarbeiter verschieben und erzielte Lerneffekte verloren gehen würden.

### 3.3 Aufbau und Bewertung von Vorranggraphen

Die Montagestruktur repräsentiert die zeitliche und montagetechnisch mögliche Abfolge der Montageschritte, die zur Erzeugung eines Produktes notwendig sind. Dabei kann differenziert werden zwischen Montageschritten, die direkt aufeinander folgend oder unabhängig voneinander durchzuführen sind. Letztere stellen die Freiheitsgrade in der Montagereihenfolge dar. Diese Abhängigkeiten zwischen Montageschritten können über einen Vorranggraphen dargestellt werden (Bullinger *et al.* 1986). Daher ist das hier zu lösende Problem graphentheoretisch zu beschreiben.

#### 3.3.1 Vorranggraphen

Ein Graph  $G$  besteht aus Knoten  $K$  und Kanten  $E$ . Die Kanten verbinden jeweils zwei Knoten miteinander. Sind die Knoten geordnet, dann wird die Kante als Pfeil dargestellt und es handelt sich um einen gerichteten Graphen, wie in Abbildung 3-4 dargestellt.

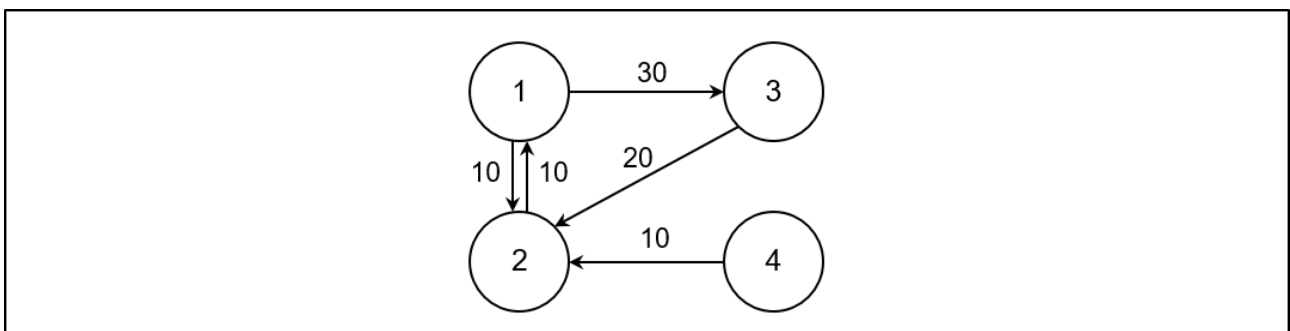


Abbildung 3-4: Gerichteter, gewichteter Graph in Anlehnung an (Domschke *et al.* 2015)

Die Knotenmenge  $V$  eines Graphen umfasst alle im Graphen vorkommenden Knoten. Analog dazu beinhaltet die Kanten-/Pfeilmenge  $E$  alle Kanten/Pfeile.

Eine Kante zwischen zwei Knoten  $i$  und  $j$  wird  $[i,j]$  und ein Pfeil wird  $(i,j)$  geschrieben. In einem gerichteten Graphen ist  $i$  der unmittelbare Vorgänger von  $j$  und  $j$  der unmittelbare Nachfolger von  $i$ . Von Knoten  $i$  ausgehend, werden alle Nachfolger  $N(i)$  und alle Vorgänger  $V(i)$  bezeichnet. Alle Vorgänger und Nachfolger eines Knotens werden auch als Nachbarn bezeichnet. In einem ungerichteten Graphen existieren nur Nachbarn, da die Knoten jeweils sowohl Vor- und Nachfolger sind. Liegen Kantenbewertungen vor, dann ist es ein gewichteter Graph. Die Bewertung  $c$  wird für Kanten  $c[i,j]$  und Pfeile  $c(i,j)$  geschrieben und der dazugehörige Graph lautet dabei  $G=[V,E,c]$  bzw.  $G=(V,E,c)$ . Darüber hinaus können auch Knoten bewertet werden, zum Beispiel wenn diesen eine Prozesszeit hinterlegt wird (Domschke *et al.* 1997; Scholl *et al.* 2010).

In dieser Arbeit sind die Montagemodule die Knoten  $K$  und die Summe aller betrachteten Montagemodule entspricht der Knotenmenge  $V$ . Die Abhängigkeiten der Montagemodule werden über die Pfeile  $E$  repräsentiert. Bestehen Freiheitsgrade zwischen zwei Montagemodulen, dann entspricht dies einer Kante. Diese ist gleichbedeutend mit zwei gegenläufigen Pfeilen zwischen zwei Knoten mit keiner bzw. der gleichen Bewertung. In Abbildung 3-4 entspricht dies der Beziehung zwischen Knoten eins und zwei.

Besitzt ein Graph eine begrenzte Anzahl an Knoten und folglich auch endlich viele Pfeile, wie dies bei einem Montagegraphen der Fall ist, kann dieser über eine Adjazenzmatrix oder auch Verbindungsmatrix dargestellt werden. Dies geht zurück auf SCHMIGALLA und wurde ursprünglich zur optimalen Maschinenanordnung genutzt (Schmigalla 1970). Dabei werden die Beziehungen in einer  $n \times n$ -Matrix  $U(G)$  hinterlegt. In einer Adjazenzmatrix werden jeweils die identischen Knoten in  $x$ - und  $y$ -Richtung aufgelistet. Ist ein Knoten über einen Pfeil einem anderen nachgelagert, so ist dies in der Matrix als „1“ festgehalten, ansonsten ist eine „0“ zu notieren. Darüber hinaus ist anstatt einer „1“ auch das

Hinterlegen einer Kanten- bzw. Pfeilbewertung möglich. Dabei ist zu beachten, dass die Diagonalelemente nicht bewertet werden dürfen, da dies eine Schlinge repräsentieren würde, d.h. der Knoten wäre Vor- und Nachfolger von sich selbst (Neumann *et al.* 1993).

### **3.3.2 Aufbau von Mischgraphen**

Die Abstimmung eines Fließbandes, auf dem mehrere Fahrzeugvarianten montiert werden, kann für jedes Fahrzeug getrennt über Ein-Produkt-Verfahren erfolgen. Allerdings führt das in der Regel dazu, dass gleiche Arbeitsvorgänge fahrzeugabhängig unterschiedlichen Montagestationen zugeteilt werden. Dies ist jedoch zu vermeiden, da zu montierende Umfänge und für den Verbau benötigte Betriebsmittel mehrfach bereitzustellen wären. Auch lassen sich bei Mitarbeitern, durch eine hohe Wiederholrate von gleichen Montagetätigkeiten, höhere Lerneffekte realisieren. Ziel sollte es daher sein, unabhängig von der Fahrzeugvariante, gleiche Arbeitsgänge der gleichen Montagestation zuzuteilen. Ein Mischgraph kann mehrere Fahrzeuge abbilden. Ein jedes Fahrzeug verfügt dabei über einen spezifischen Vorranggraphen, dennoch sind einige Umfänge deckungsgleich. Wichtig bei einem gemeinsamen Vorranggraphen ist, dass dieser keine Zyklen beinhaltet (Boysen 2005). Dies tritt beispielsweise dann auf, wenn bei Fahrzeug a Montageschritt eins zwingend vor Montageschritt zwei erfolgen muss und Fahrzeug b die umgekehrte Reihenfolge fordert. Beim Überlagern der fahrzeugspezifischen Vorranggraphen werden auch die Montageschritte berücksichtigt, die nicht bei allen Fahrzeugen durchgeführt werden. Für diese Fahrzeuge wird die Montagedauer dann auf null Sekunden gesetzt. Durch die unterschiedlichen Montagezeiten wird in der Regel dann auch der Variantenmix festgelegt (Scholl 1999). Dabei berechnet sich die durchschnittliche Montagedauer, indem die fahrzeugspezifische Montagedauer mit der Montagehäufigkeit multipliziert und durch die gesamte Stückzahl

dividiert wird (Boysen 2005). Allerdings besteht dann keine Variantenmixflexibilität mehr, da eine Nachfrageverschiebung zwischen den Fahrzeugen zu einer Über- bzw. Unterlast der Mitarbeiter führen würde.

### **3.3.3 Lösungsverfahren zur Bestimmung linearer Montagekonfigurationen**

Eine Montagelinie stellt die lineare Anordnung von Knoten dar. Die Montagemodule im Montagevorranggraphen müssen deshalb in eine lineare Reihenfolge gebracht werden. Dabei bestehen endlich viele Möglichkeiten, die Knoten zu durchlaufen, weshalb es sich hierbei um das Problem der kombinatorischen Optimierung handelt (Neumann *et al.* 1993). Beschrieben wird dies anhand des Problems des Handelsreisenden (engl. Travelling Salesman Problems (TSP)): Ein Handelsreisender soll nach dem Besuch mehrerer Kunden in verschiedenen Orten wieder an den Ausgangspunkt zurückkehren. Dabei sind alle Kunden zu besuchen. Das Ziel ist die Reihenfolge zu bestimmen, bei der die geringste Entfernung zurückgelegt wird (Scholl *et al.* 2010).

Dabei besteht die Möglichkeit, dass sowohl Kanten als auch Pfeile vorliegen, die bewertet sein können. In der Praxis beschreibt das TSP u.a. auch die Bestimmung der kostengünstigsten Route und die Einplanung mehrerer Aufträge auf einer Maschine, mit dem Ziel, die Rüstzeiten oder -kosten zu minimieren. Die Knoten und Kanten bzw. Pfeile müssen dazu problemspezifisch festgelegt werden (Neumann *et al.* 1993). Das TSP stellt ein NP-schweres Optimierungsproblem dar (Scholl *et al.* 2010), d.h. es existiert kein Algorithmus zur Lösung der schwierigsten Instanz des Problems mit polynomialem Aufwand (Domschke *et al.* 2015). Deshalb wird häufig auf Heuristiken zurückgegriffen. Mit Hilfe exakter Lösungsverfahren kann eine optimale Lösung gefunden werden. Bei heuristischen Verfahren ist hingegen nicht sichergestellt, dass die identifizierte Lösung das Optimum repräsentiert. Normalerweise gilt, dass mit

der Qualität der Lösung auch der Rechenaufwand bzw. Speicherbedarf steigt. Sind diese begrenzt, sind Abstriche bei der Lösungsqualität zu akzeptieren (Domschke *et al.* 1997).

Ein **exaktes Lösungsverfahren** für kombinatorische Optimierungsprobleme ist u.a. die Vollenumeration. Dabei werden alle möglichen Lösungen erzeugt. Abhängig vom Graphen stellt dabei jedoch die lange Rechendauer ein Problem dar, weshalb sich die Vollenumeration primär für einen Graphen mit wenigen Knoten empfiehlt (Neumann *et al.* 1993). Besser eignen sich dabei Branch-and-Bound-Verfahren, die ebenfalls zum Aufsuchen einer optimalen Lösung eines kombinatorischen Optimierungsproblems genutzt werden können. Durch die sog. Schranken werden nicht erfolgsversprechende Lösungen ausgeschlossen. Dabei kann unterschiedlich vorgegangen werden:

- Breitensuche: Beginnend bei einem Knoten, werden alle möglichen Nachfolger in die Breite aufgebaut.
- Tiefensuche: Beginnend bei einem Knoten werden alle Nachfolger in die Tiefe aufgebaut, bis kein weiterer mehr auffindbar ist. Danach wird auf einer höheren Ebene erneut nach möglichen Lösungen gesucht (Bock 2000).

Zu den **Heuristiken** zählt u.a. das Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren (Neumann *et al.* 1993). Das Eröffnungsverfahren dient dabei der Generierung einer möglichen Lösung, die über ein Verbesserungsverfahren weiterentwickelt werden kann. Dabei wird die Reihenfolge im Rahmen der erlaubten Freiheitsgrade verändert und das dabei entstandene Ergebnis bewertet. Dies kann deterministisch erfolgen, d.h. die Lösungen werden bei unveränderten Eingangsgrößen immer die gleichen sein. Stochastische Verfahren hingegen führen bei gleichen Eingangsgrößen bei jedem Durchlauf zu unterschiedlichen Lösungen, da diese Verfahren eine zufällige Komponente inkludieren (Domschke



et al. 2015). Beim Ameisenalgorithmus, der ebenfalls zu den Heuristiken zählt, startet eine bestimmte Anzahl an Ameisen, die den Graphen durchlaufen. Sind diese beim Endknoten angekommen, kehren sie über den gleichen Weg zurück zum Startknoten. Dabei geben sie jeweils den Botenstoff Pheromon ab. Da die Ameise, die für den Weg die geringste Zeit benötigt, auch am schnellsten wieder am Ausgangsknoten ist, steigt dort die Pheromon-Konzentration an. Nach einer bestimmten Anzahl an Iterationen wird abgebrochen und das Ergebnis mit der höchsten Pheromon-Konzentration wird ausgegeben (Scholl et al. 2010).

Es existieren zahlreiche Algorithmen zum Lösen kombinatorischer Optimierungsprobleme. Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens hat dabei abhängig vom vorliegenden Optimierungsproblem, der zur Verfügung stehenden Software und den Anforderungen an die Dauer zur Lösungsfindung sowie die Lösungsqualität zu erfolgen.

### **3.3.4 Bewertung alternativer Montagekonfigurationen**

Lösungsalternativen sollten nicht nur vom Ist-Zustand abgeleitet werden, sondern auch anhand des Idealzustands (REFA 1990). Alternative Montagekonfigurationen sind zu bewerten, um damit den Entscheidungsprozess zu unterstützen. *„Business Intelligence (BI) bezeichnet einen integrierten, unternehmensspezifischen, IT-basierten Gesamtansatz zur betrieblichen Entscheidungsunterstützung“* (Kemper et al. 2010). Neben der Bereitstellung von Daten, u.a. aus Systemen der Produktentwicklung sowie der Produktionsplanung und -steuerung, werden weitere Informationen generiert und zur Verfügung gestellt. Dabei können aus Daten der Vergangenheit Prognosen abgeleitet werden (Kemper et al. 2010). Für die Montageplanung ist das vor dem Hintergrund

möglicher Nachfrageentwicklungen ebenso entscheidend, wie der kennzahlenbasierte Vergleich bisheriger Montagekonfigurationen. Denn durch die Auswahl einer Montagekonfiguration werden nicht nur die notwendigen Investitionskosten beeinflusst, sondern auch die Zukunftsstabilität hinsichtlich erforderlicher Anpassungen der Montagekonfiguration.

Pfade durch einen gewichteten Graphen können bewertet werden, indem die einzelnen Kantengewichtungen der durchlaufenen Kanten addiert werden. In die Gewichtung der Pfeile bzw. Kanten können u.a. Betriebsmittel einfließen, die in einer Station fahrzeugübergreifend genutzt werden. Auch Restriktionen der Montagehöhe sind zu berücksichtigen. So sollten fahrzeugspezifisch benötigte Montagehöhen in den Montagestationen realisierbar sein, ohne dafür aufwändige Anpassungen vornehmen zu müssen (Domschke *et al.* 1997).

Werden lineare Montagekonfigurationen ermittelt und bewertet, kann es eine bzw. mehrere Lösungen mit einer höchsten Bewertung geben, gründend auf den Kanten- bzw. Pfeilgewichtungen. Bei einer Sensitivitätsanalyse werden diese Eingangsdaten gezielt verändert. Der anschließende Vergleich der Ergebnisse erlaubt Rückschlüsse, wie sich die Anordnung der Knoten bei veränderten Eingangsgrößen verhält (Neumann *et al.* 1993). Innerhalb eines Lösungsraumes lassen sich dadurch die Ergebnisse auswählen, die am wenigsten stark auf Veränderungen reagieren.

### **3.4 Zusammenfassende Betrachtung**

Das variantenreiche Produkt „Fahrzeug“ besteht aus zahlreichen Einzelteilen, die zum Teil zu Baugruppen vormontiert werden können. Jeder Montageprozess mit oder ohne Teilezuwachs wird über Arbeitsvorgänge beschrieben. Eine Planung auf Ebene der Arbeitsvorgänge ist dabei unmöglich. Die Gründe dafür

sind, dass für die Endmontage eines Fahrzeuges deutlich mehr als tausend Arbeitsvorgänge notwendig sind, die alle untereinander in einer Vorgänger-Nachfolger-Beziehung stehen. Deshalb ist eine Modularisierung der Endmontage notwendig, um die Planungskomplexität handhaben zu können. Dies folgt auch dem Grundsatz vom Groben ins Feine zu planen.

Die Planung einer Montagelinie wird durch die Eingangsgrößen tangiert, die sich aus der Montagestrategie ableiten. Steuergrößen der Endmontage in der Automobilindustrie sind ebenfalls während der Montageplanung zu berücksichtigen. Dies begründet sich darin, dass der Flexibilitätskorridor während der Planung festgelegt wird, indem im späteren Montagebetrieb Anpassungen vorgenommen werden können. Fahrzeugseitige Restriktionen schränken die Anzahl möglicher Montageabfolgen zwar ein, dennoch existieren meist zahlreiche Alternativen zur linearen Anordnung der Montageprozesse. Das kommt einem Pfad durch einen Graphen gleich, bei dem jeder Knoten exakt einmal durchlaufen wird.

Bei Planungsmethoden bisheriger Lösungsansätze werden die Freiheitsgrade in der Anordnung der Montagemodule nicht systematisch zur Generierung produktflexibler Montagekonfigurationen genutzt. Auch werden die Freiheitsgrade zwischen Montagemodulen nicht methodisch für Integrationsuntersuchungen neuer bzw. zusätzlicher Fahrzeuge auf bestehenden Montagelinien herangezogen. Diese Forschungslücke soll im Folgenden durch die Entwicklung einer Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage geschlossen werden.

---

## **4 Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen**

Volatile Märkte, kaum prognostizierbare Nachfrageentwicklungen, wachsende Produktportfolios und neue Fahrzeugkonzepte stellen die variantenreiche Serienmontage der Automobilindustrie vor neue Herausforderungen. In der Regel werden auf Montagelinien derzeit nur einzelne Baureihen (vgl. Abbildung 2-2) montiert, wodurch nur in begrenztem Umfang auf Nachfrageverschiebungen zwischen den Baureihen reagiert werden kann. Zudem folgt die Montageplanung meist einer standardisierten Anordnung der Montageprozesse. Da dieser Standard ständigen Anpassungen unterliegt, herrscht in den Montagelinien kein einheitlicher Montageablauf. Infolgedessen hat die Einplanung von Fahrzeugen für jede Montagelinie gesondert zu erfolgen und erschwert damit die Integration neuer Fahrzeuge. Zunächst wird ein Zielbild für eine Planungsmethode zum Umgang mit diesen Defiziten erstellt. Dabei werden Planungsszenarien und die damit verbundenen Fragestellungen erörtert, mit denen die Montageplanung zukünftig konfrontiert sein wird. Danach erfolgt die Ableitung der notwendigen Planungsschritte, um das Zielbild erreichen zu können.

### **4.1 Zielbild der Planungsmethode**

Vor dem Hintergrund zukünftiger Herausforderungen werden fahrzeugflexible Montagekonfigurationen benötigt. Das Ziel ist es, die Montageplanung methodisch bei der Planung fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen im Green- und Brownfield zu unterstützen (vgl. Abbildung 4-1).

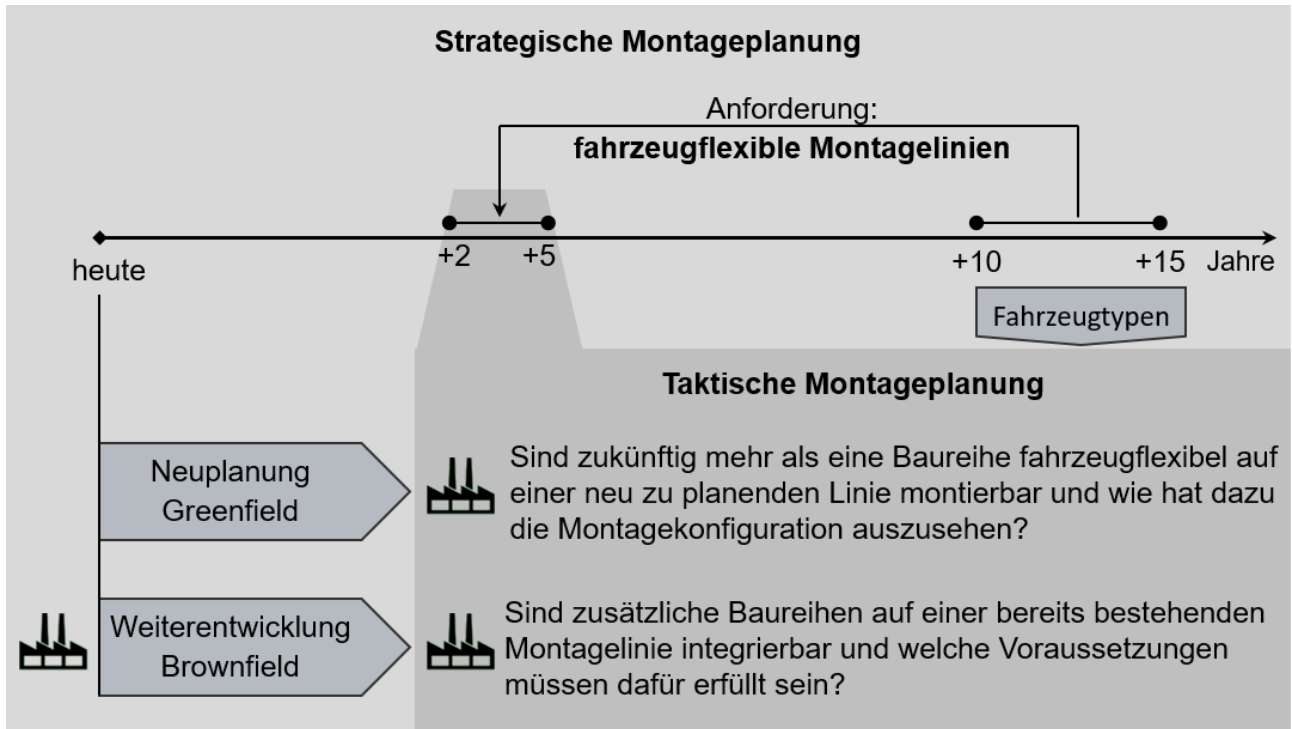


Abbildung 4-1: Zielbild der zu entwickelnden Planungsmethode

Darüber hinaus muss durch die Methodenanwendung sichergestellt sein, dass die Planung generisch und objektiv erfolgt. Durch das generische Vorgehen wird gewährleistet, dass die Methode auch dann einsetzbar ist, wenn zukünftige Fahrzeug- und Montagekonzepte von denen, die heute bekannt sind, abweichen. Eine objektive Planung stellt die sachliche und neutrale Bereitstellung der Daten sicher. Dadurch sind disruptive Planungsergebnisse möglich, sofern die Resultate bisheriger Planungen nicht mehr den neuen Anforderungen gerecht werden. Des Weiteren hat die Planung auf der Ebene der Montageprozesse zu erfolgen, sodass auch Restriktionen bestehender Montagelinien bei der Planung berücksichtigt werden können. Die Generierung der Montagekonfigurationen soll in allen Fachbereichen und mit geringem Zeitaufwand durchführbar sein. Existieren alternative Montagekonfigurationen, hat eine Bewertung dieser zu erfolgen, um den Auswahlprozess zu unterstützen.

Die **modularen Montageprozesse** sind die Voraussetzung, um die Vielzahl an Arbeitsvorgängen in der automobilen Endmontage und deren Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zu beherrschen. Die Montagemodule sollten dabei so bestimmt werden, dass diese für unterschiedliche Fahrzeuge und Montagelinien gleichermaßen gültig sind. Weiter sollten die Montagemodule auch zukünftige Fahrzeugkonzepte abbilden können.

Eine **produktflexible Montagekonfiguration** bedeutet im Kontext dieser Arbeit, dass mehr als ein Fahrzeug, unabhängig vom Variantenmix, gemeinsam auf einer Endmontagelinie montierbar ist. Dadurch kann auf ein wachsendes Produktportfolio ebenso reagiert werden wie auf nicht prognostizierbare Nachfrageentwicklungen. Für die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien sollen fahrzeug- und im Brownfield auch montageseitige Freiheitsgrade in der Anordnung der Montagemodule genutzt werden. Zur stärkeren Nutzung von Lernkurveneffekten sollten fahrzeugspezifisch ähnliche Montagetätigkeiten auf der Linie gebündelt werden. Sofern alternative, fahrzeugflexible Montagekonfigurationen existieren, hat die Auswahl einer geeigneten Lösung anhand einer Bewertung zu erfolgen.

## **4.2 Methodisches Vorgehen bei der Ausplanung produktflexibler, modularer Montagelinien**

Die entwickelte Planungsmethode besteht aus acht Planungsbausteinen. Diese dienen primär der fahrzeug- und linienübergreifenden Modularisierung der Montageprozesse. Anschließend werden produktflexible Montagekonfigurationen generiert und bewertet. Basierend auf einer ausgewählten Montagekonfiguration erfolgt abschließend die zeitliche Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie. Das Zusammenwirken der Planungsbausteine veranschaulicht Abbildung 4-2.

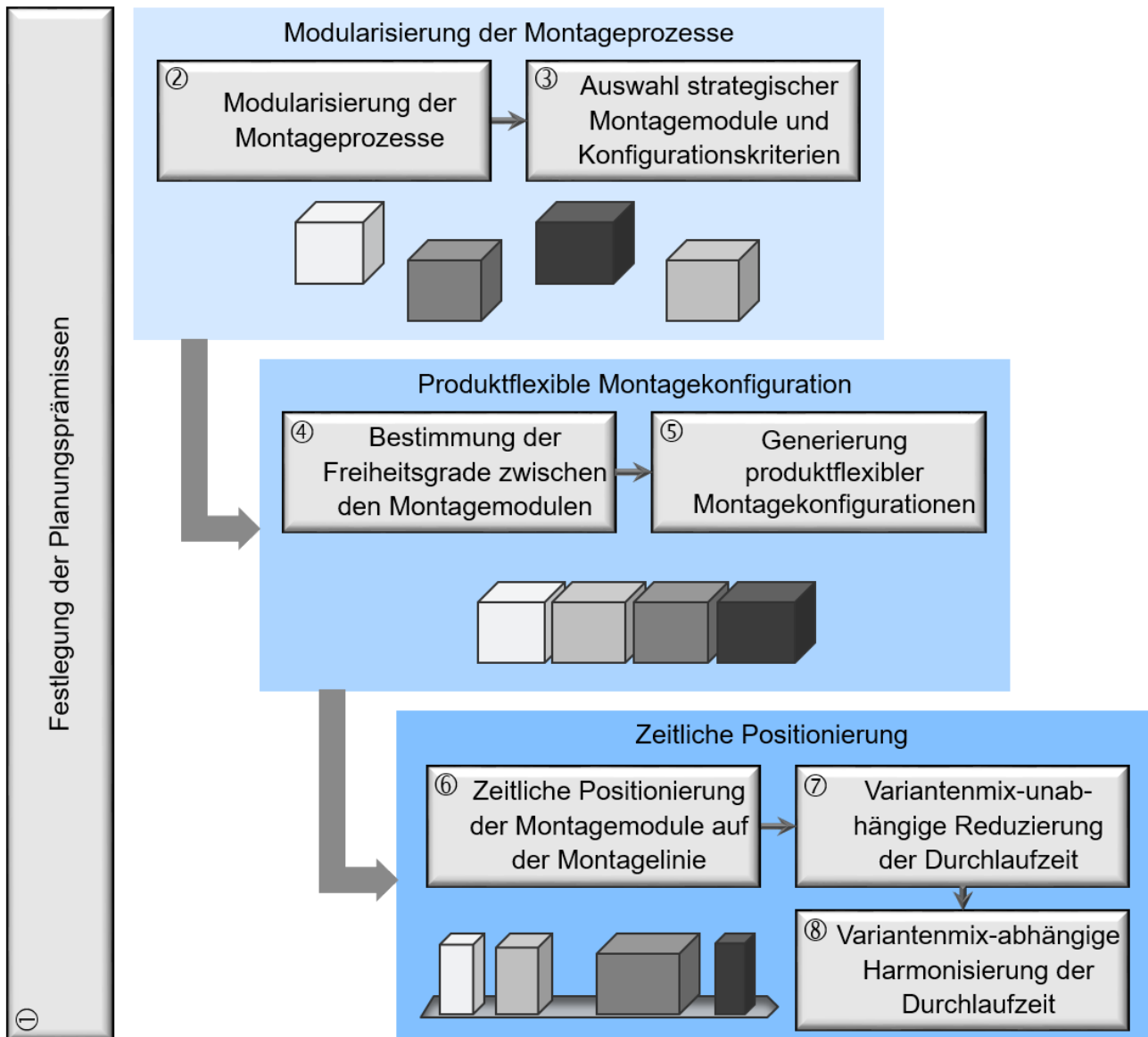


Abbildung 4-2: Gesamtdarstellung aller Planungsschritte der entwickelten Methode

Die Eingangsgrößen für die Planung einer Endmontage sind zunächst zu ermitteln. Daher hat zu Beginn des Planungsprozesses die **Festlegung der Planungsprämissen** zu erfolgen. Unter anderem sind die Fahrzeugmodelle festzulegen, die zukünftig auf einer gemeinsamen Linie in der Endmontage realisierbar sein sollen.

Die **Modularisierung der Montageprozesse** ist notwendig, um die zahlreichen Arbeitsvorgänge und deren gegenseitigen Vorgänger- und Nachfolger-

Beziehungen zum Verbau der fahrzeugspezifischen Baugruppen zu beherrschen. Zudem sind diese so zu bündeln, dass sie in der weiteren Planung fahrzeugübergreifend als gemeinsames Montagemodul genutzt werden können. Bei den weiteren Planungsschritten sind bewusst die Montagemodule und nicht die Produktmodule heranzuziehen. Dies erlaubt das Abbilden bestehender Montagelinien und ist insbesondere für die Untersuchung der Integrationsfähigkeit neuer oder zusätzlicher Fahrzeuge entscheidend. Für die Montagemodule sind zudem die Montagezeiten zu ermitteln, um eine zeitliche Betrachtung zu ermöglichen.

Der weitere Schritt besteht in der **Auswahl strategischer Montagemodule und Konfigurationskriterien**. Mit der zunehmenden Komplexität der Fahrzeuge steigt in der Regel auch die Anzahl an Montagemodulen und möglichen Montagekonfigurationen. Deshalb können beim Aufbau der Konfigurationen nicht alle Montagemodule berücksichtigt werden. Zu unterscheiden ist zwischen strategischen und flexiblen Montagemodulen, wobei die flexiblen bei der Planung zunächst vernachlässigbar sind. Der Grund dafür ist, dass diese geringe Vorgänger- und Nachfolger-Restriktionen bzw. viele Freiheitsgrade zu anderen Montagemodulen aufweisen. Zudem können diese nachträglich mit geringem Zeit- und Kostenaufwand im Montagelayout verschoben werden. Zusätzlich sind den Montagemodulen Konfigurationskriterien für die Bewertung der generierten Montagekonfigurationen zu hinterlegen.

Ein Bestandteil der Planungsmethode ist die fahrzeug- und im Brownfield auch die linienspezifische **Bestimmung der Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen**. Dabei sind die Vorgänger- und Nachfolger-Beziehungen zwischen den Montagemodulen für jedes Fahrzeug bzw. die Linie gesondert zu ermitteln. Ein Freiheitsgrad bedeutet dabei, dass zwei Montagemodule wahlweise vor- oder nachgelagert angeordnet sein können. Da die Montagemodule



fahrzeug- und linienübergreifend Gültigkeit haben, können die fahrzeug- und linienspezifischen Freiheitsgrade und Vorgänger-Nachfolger-Restriktionen überlagert werden. Dadurch wird sichergestellt, dass beim Aufbau der Montagekonfigurationen alle Einschränkungen in der Anordnung der Montagemodule für sämtliche Fahrzeuge und die Linie berücksichtigt werden. Das ist die Voraussetzung zum Aufbau fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen.

Die **Generierung produktflexibler Montagekonfigurationen** basiert auf den überlagerten Freiheitsgraden und Einschränkungen aller betrachteten Fahrzeuge, sodass alle generierten Montagekonfigurationen fahrzeugflexibel sind. Abhängig von der Anzahl an Montagemodulen und den Freiheitsgraden zwischen diesen kann eine große Anzahl möglicher Montagekonfigurationen existieren. Diese sind anhand der zuvor definierten Konfigurationskriterien zu bewerten. Zudem kann untersucht werden, ob ein zusätzliches Fahrzeug auf einer bereits bestehenden Montagelinie integriert werden kann bzw. welche Anpassungen dafür vorzunehmen sind. Dazu sind die Freiheitsgrade der Montagelinie während der Generierung der Montagekonfigurationen miteinzubeziehen.

Die Modularisierung der Fahrzeuge trägt zur Reduzierung von Taktzeitspreizungen in der Endmontage bei. Dennoch unterscheiden sich häufig die fahrzeugspezifischen Montagezeiten innerhalb der Montagemodule. Die Variantenmixflexibilität kann durch die **zeitliche Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie** dennoch erzielt werden. Dazu sind die fahrzeugspezifisch unterschiedlichen Montagezeiten zu berücksichtigen. Die Summe der Montagezeiten der zuvor ausgewählten, strategischen Montagemodule repräsentiert nicht die gesamte Montagedauer der Fahrzeuge. Neben der Positionierung der strategischen Montagemodule in der Reihenfolge der ermittelten

Montagekonfiguration sind auch die flexiblen Montagemodule auf dem Zeitstrahl der gesamten Montagelinie anzuordnen.

Ist dies geschehen, kann eine **variantenmix-unabhängige Reduzierung der Durchlaufzeit** erfolgen. Dadurch wird die Länge der Montagelinie reduziert und die Auslastung der Mitarbeiter innerhalb der Stationen erhöht, ohne dabei den Variantenmix einzuschränken.

Weitere Effizienzpotenziale sind durch die **variantenmix-abhängige Harmonisierung der Durchlaufzeit** zu erzielen. Zeitliche Unterschiede zwischen den fahrzeugspezifischen Montagemodulen werden dabei angeglichen. Allerdings sollten diese Maßnahmen kurzfristig zurücksetzbar sein, um auf Änderungen des Variantenmix reagieren zu können. Dadurch ist eine Effizienzsteigerung möglich und die Variantenmixflexibilität wird dennoch nur kurzfristig eingeschränkt.

Die acht Planungsschritte zur Konfiguration modularer, produktflexibler Montagelinien in der variantenreichen Serienmontage werden im Folgenden detailliert beschrieben.

---

## **5 Detaillierung der Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen**

Die konzipierte Methode dient der taktischen Planung modularer, fahrzeugflexibler Montagelinien in der variantenreichen Serienmontage. Zunächst sind die Prämissen der Planung festzulegen. Der Komplexität durch die zahlreichen Montageprozesse einer Endmontage wird begegnet, indem diese gezielt zu Montagemodulen zusammengefasst werden. Anschließend erfolgt die fahrzeug- und linienspezifische Ermittlung der Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen, die Grundlage für die Generierung fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen. Abschließend sind die Montagemodule, unter Einhaltung der ausgewählten Montagekonfiguration, auf der Montagelinie zu positionieren. Dabei ist die benötigte Montagedauer zu berücksichtigen. Abschließend erfolgt die Optimierung der Durchlaufzeit (Küber 2015). Die konzipierte Planungsmethode weist acht Planungsschritte auf, die im Folgenden detailliert erläutert werden.

### **5.1 Festlegung der Planungsprämissen**

Die Festlegung der Planungsprämissen geschieht durch die strategische Montageplanung. Dadurch werden die Rahmenbedingungen für die taktische Montageplanung festgelegt. Dazu gehört die Setzung, ob die Planung im Green- oder Brownfield zu erfolgen hat und welche Fahrzeuge auf der Linie endmontierbar sein sollen (Küber *et al.* 2016b). Bei der Planung einer fahrzeugflexiblen Montagelinie sollte sichergestellt sein, dass auch die vorgelagerten Gewerke die gleiche Fahrzeugflexibilität wie die Montage aufweisen bzw. dazu befähigt werden können. Andernfalls kann die installierte Flexibilität in der Montagelinie nicht genutzt werden. Weitere Planungsprämissen sind die Stückzahlflexibilität

sowie die technischen Standards und die Fahrzeugstandards, die im Weiteren erörtert werden (vgl. Abbildung 5-1).

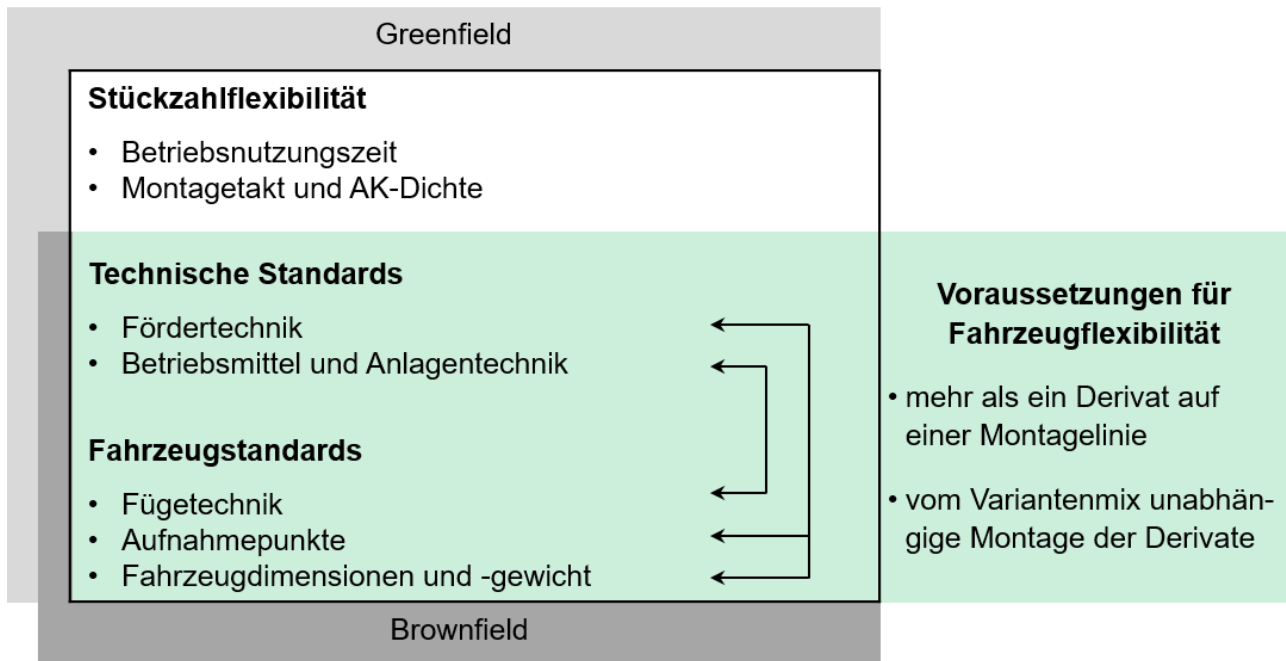


Abbildung 5-1: Planungsprämissen

Die **Stückzahlflexibilität** ermöglicht, auf eine gestiegene bzw. gesunkene Nachfrage, kumuliert über die auf der Linie montierten Fahrzeuge, reagieren zu können. Voraussetzung dafür ist, dass die Lieferanten, die vorgelagerten Gewerke der Montage und die Logistik die gleiche Flexibilität aufweisen. Damit die Montageinhalte in den Montagestationen gleich bleiben und die erzielten Lerneffekte beibehalten werden, ist die Stückzahl nicht über den Montagetakt sondern über die Betriebsnutzungszeit zu steuern. Durch eine montageübergreifende Standardisierung der Taktzeit hat die Zuteilung der Arbeitsvorgänge auf die Montagestationen montageübergreifend nur einmalig zu erfolgen, vorausgesetzt die AK-Dichte ist identisch.

Ein montageübergreifend einheitlicher Montagetakt ist auch die Voraussetzung für das Definieren **technischer Standards**. Durch die Standardisierung

der Fördertechnik, Betriebsmittel und Anlagentechnik hat die Planung montageübergreifend einmalig zu erfolgen, wodurch sich die Konstruktionskosten und die Planungsdauer reduzieren. Zudem ermöglichen diese Standards die Übertragung von Best-Practise-Lösungen auf andere Montagelinien. Änderungen der Montagetechnik sind als neuer technischer Standard festzuschreiben und mit den Fahrzeugstandards zu synchronisieren.

Gleiches gilt, wenn neue Fahrzeugstandards Anpassungen bei den technischen Standards nach sich ziehen. Die Betriebsmittel, Förder- und Anlagentechnik sind dabei im Rahmen der montageprozessgerechten Fahrzeuggestaltung zu beachten. Dazu sind **Fahrzeugstandards** einzuhalten, wozu die fahrzeugübergreifend einheitliche Fügetechnik zählt. Zudem müssen die Aufnahmepunkte fahrzeugübergreifend mit der Fördertechnik kompatibel sein. Die Fördertechnik muss auch das Gewicht und die Gewichtsverteilung aller Fahrzeuge abbilden können. Die Verteilung variiert durch den Teilezuwachs, beispielsweise durch den Verbau der Batterie bei batterieelektrischen Fahrzeugen gegenüber den Kraftstofftanks bei Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antrieb. Auch die Stationsabmessungen müssen für das Fahrzeug mit den größten Dimensionen ausgelegt sein.

Das Ergebnis dieses Planungsschritts sind aufeinander abgestimmte Fahrzeugstandards und technische Standards für die Montagelinien. Diese bilden die Voraussetzung dafür, dass unterschiedliche Fahrzeuge gemeinsam auf einer Linie montiert werden können.

## 5.2 Modularisierung der Montageprozesse

Die variantenreiche Serienmontage der Automobilindustrie ist mit einer fahrzeugspezifisch unterschiedlichen Montagedauer konfrontiert. Dies wird durch

eine steigende Anzahl angebotener Fahrzeuge und schwankender Verbauprozenten der Sonderausstattungen zunehmen. Die Auslegung der Montage auf das Fahrzeug mit maximaler Montagedauer gewährleistet zwar Variantenvielfalt, wird aber nicht weiter betrachtet, da es zu Ineffizienzen bei Fahrzeugen mit geringerer Montagedauer führt. In der automobilen Endmontage kommt hinzu, dass durch die Anzahl an Arbeitsvorgängen und deren gegenseitige Vorrangbeziehungen eine Erhebung der Freiheitsgrade nicht angewendet werden kann. Eine Modularisierung der Fahrzeuge reduziert die Anzahl variabler Arbeitsvorgänge in der Endmontage. Dort sind nur noch die Arbeitsvorgänge zu betrachten, die zum Verbau der Fahrzeugmodule notwendig sind. Die Modularisierung sowohl der Fahrzeuge und damit auch der Montageprozesse ist daher notwendig, um die Freiheitsgrade nutzen zu können.

### 5.2.1 Modularisierung der Fahrzeuge und der Montageprozesse

Die Modularisierung von Fahrzeugen dient dazu, Taktzeitspreizungen in der Endmontage zu reduzieren.

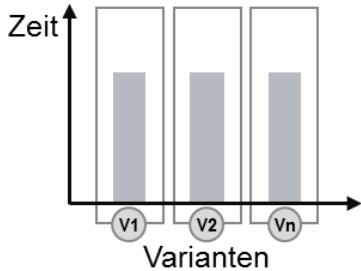
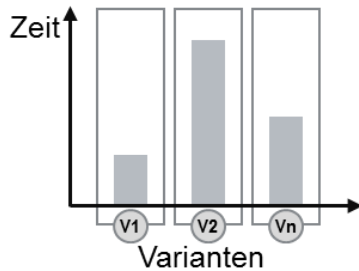
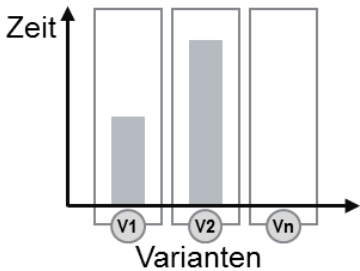
Fall 1	Fall 2	
		
betrifft: <input type="checkbox"/> Endmontage <input checked="" type="checkbox"/> Produktionslogistik	betrifft: <input checked="" type="checkbox"/> Endmontage <input checked="" type="checkbox"/> Produktionslogistik	betrifft: <input checked="" type="checkbox"/> Endmontage <input checked="" type="checkbox"/> Produktionslogistik

Tabelle 5-1: Taktzeitspreizungen in der Hauptmontage durch den Verbau varianter Bauteile in Anlehnung an (Aisenbrey *et al.*)

Wie in Tabelle 5-1 dargestellt, ist bei den Auswirkungen der Fahrzeugumfänge auf die Montageprozesse zwischen zwei Fällen zu differenzieren:

- Fall 1: Variante bzw. nicht variante Bauteile/Baugruppen, die in jedem Fahrzeug auf identische Art und Weise montiert werden und demzufolge auch in der gleichen Montagedauer gefügt werden.
- Fall 2: Bauteile/Baugruppen, die nicht in jedem Fahrzeug montiert werden (Verbauquote < 100%) und/oder unterschiedliche Prozesszeiten aufweisen.

Durch die Modularisierung lassen sich Taktzeitspreizungen reduzieren. Dabei werden variante Baugruppen bzw. Bauteile, in der Regel Sonderausstattungen, in den Vormontagen zu Produktmodulen zusammengebaut. Trotz der Varianz in den Produktmodulen führt deren Verbau in der Endmontage nicht zu Taktzeitspreizungen, solange die Füge-, Energie- und Informations-Schnittstellen einheitlich sind und der Verbau in jedem Fahrzeug erfolgt. Dies setzt allerdings die Zusammenarbeit der Produktentwicklung und der Montageplanung voraus (Küber *et al.* 2016a). Dieser Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 5-2.

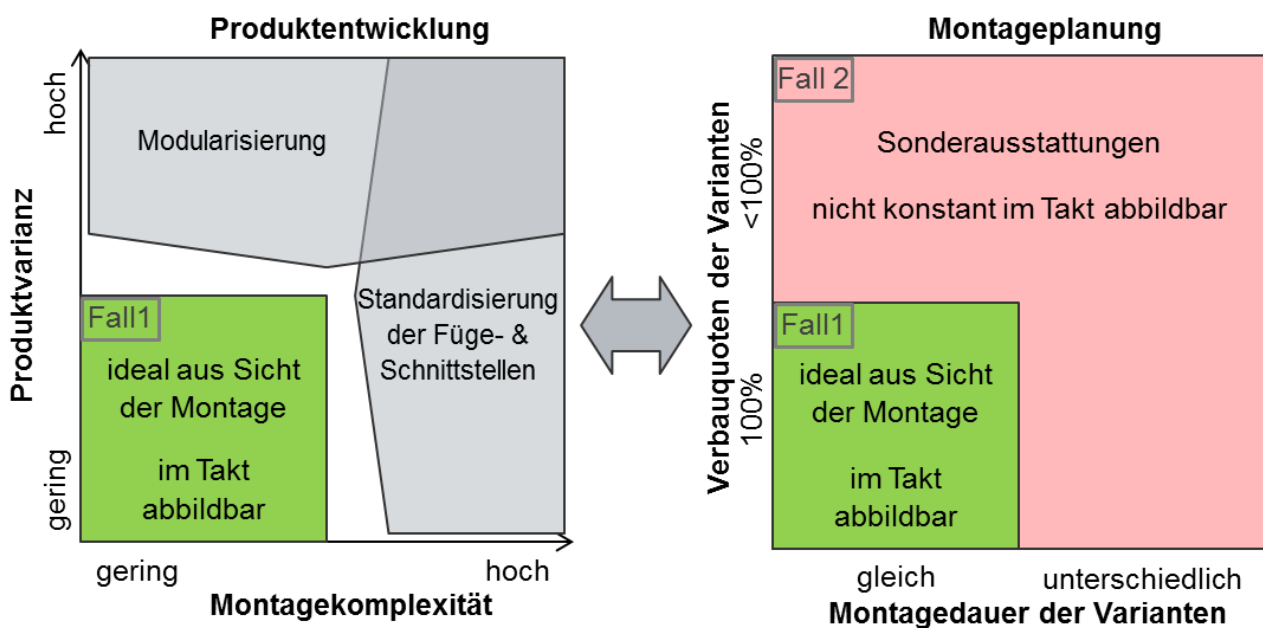


Abbildung 5-2: Produktmodularisierung zur Reduzierung von Taktzeitspreizungen in der Endmontage

Wird ein gesamtes Fahrzeug betrachtet, ist die Anzahl an Arbeitsgängen größer als die Anzahl der Einzelteile. Der Modularisierungsaufwand ist daher geringer, wenn die Modularisierung vom Fahrzeug ausgehend erfolgt. Die Produktmodule können nicht direkt aus der Produktstruktur abgeleitet werden, da die Produktmodule nicht zwingenderweise den Baugruppen entsprechen. So wären der Motor und das Getriebe nach der Produktstruktur als Baugruppen in einzelnen Montagemodulen zu realisieren. Tatsächlich aber könnten diese vormontiert werden, auch wenn dazu Hilfskonstruktionen notwendig sind, wie in diesem Praxisbeispiel der Mechanisierungsrahmen. Dieser Fall tritt immer dann auf, wenn die Baugruppen sowohl eine Verbindung mit dem übergeordneten Element in der Produktstruktur und gleichzeitig aber auch mit anderen Baugruppen aufweisen.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Produkt- und Montagemodule ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Die Ausgangsbasis für das Gewerk der Montage ist heute in der Regel die Rohkarosse, bei KLEPSCH als Basismodul bezeichnet (Klepsch 2004). Das Basismodul kann aber für sämtliche Aufbaustrukturen identifiziert werden, auch für neue Fahrzeugkonzepte. Zunächst sind alle direkt am Basismodul zu montierenden Bauteile zu identifizieren. Diese sind zwangsweise in der Hauptlinie zu verbauen und werden deshalb im Weiteren als Muss-Produktumfänge bezeichnet. Beispiele dafür sind die Frontscheibe, der Kabelsatz, die Klappen, der Himmel und der Teppich. Selbst wenn diese Produktumfänge nicht bei jeder Produktvariante vollumfänglich oder identisch montiert werden, so sind die daraus resultierenden Montagezeitdifferenzen nicht vermeidbar und zu akzeptieren (Küber *et al.* 2016a). Exemplarisch sind die Türen eines zwei- bzw. viertürigen Fahrzeugs zu nennen.

Darauffolgend sind die Umfänge zu identifizieren, die nicht direkt am Basismodul gefügt werden und dennoch keine Zeitspreizung verursachen. Daher sind



diese variantenmixunabhängig wahlweise in der End- oder Vormontage zu realisieren und werden als Kann-Produktumfänge bezeichnet. Kann-Produktumfänge zeichnen sich durch eine Verbaquote von 100% aus. Solange der Montageprozess immer identisch ist, hat es auf die Montage keine Auswirkungen, ob die zu montierenden Umfänge identisch oder variant sind. Ein Beispiel für ein variantes, substituierendes Bauteil ist die Türverkleidung. Diese wird in jedem Fahrzeug montiert. Der Montageprozess ist dabei unabhängig vom Material oder der Farbgebung identisch. Auf die Endmontage haben die Kann-Produktumfänge keinen Einfluss, allerdings auf die Produktionslogistik, da diese die varianten Produktumfänge bereitstellen muss (Küber *et al.* 2016a).

Die restlichen Bauteile würden in der Endmontage Taktzeitspreizungen verursachen, da diese als Sonderausstattungen nicht in jedem Fahrzeug verbaut werden bzw. fahrzeugspezifisch unterschiedlich zu verbauen sind. Aus diesem Grund sind diese Bauteile in den Vormontagen an die Muss- oder Kann-Produktumfänge zu montieren. Die Kann-Produktumfänge würden zwar nicht zu Taktzeitspreizungen in der Endmontage führen, allerdings ist die Durchlaufzeit und damit einhergehend die Stationsanzahl in der Hauptmontage reduzierbar, indem diese in Vormontagen an die Muss-Produktumfänge gefügt werden.

Während des Zusammenfassens der Muss- und Kann-Produktumfänge sowie der Bauteile zu Produktmodulen ist darauf zu achten, dass die Restriktionen des Produktvorranggraphen nicht verletzt werden. Für die Überprüfung der Verbaubarkeit eignen sich digitale 3D-Fahrzeugmodelle. Ein Beispiel dafür ist das Cockpit. Dieses kann aus geometrischen Gründen nur ohne Lenkrad verbaut werden, da die Öffnung der Seitentür zu klein ist. Das Lenkrad ist daher nach dem Einbau des Cockpits in der Hauptlinie separat zu montieren. Darüber hinaus ist die montageseitige Verbaubarkeit sicherzustellen, insbesondere die

Zugänglichkeit und Ergonomie. Die Montage einer Achse mit bereits vormontierten Rädern wäre beispielsweise möglich. Die eingeschränkte Zugänglichkeit zum Anschließen der hinter den Rädern liegenden Bremsleitungen führt jedoch dazu, dass diese Umfänge getrennt in der Montage zu verbauen sind (Küber *et al.* 2016a). Bei der Gruppierung der Produktumfänge sollten zudem die Funktionen der daraus entstehenden Produktmodule vor dem Verbau in der Hauptlinie überprüfbar sein, um die Nacharbeit in der Endmontage zu reduzieren (Lotter *et al.* 2012; Kopenhagen 2014).

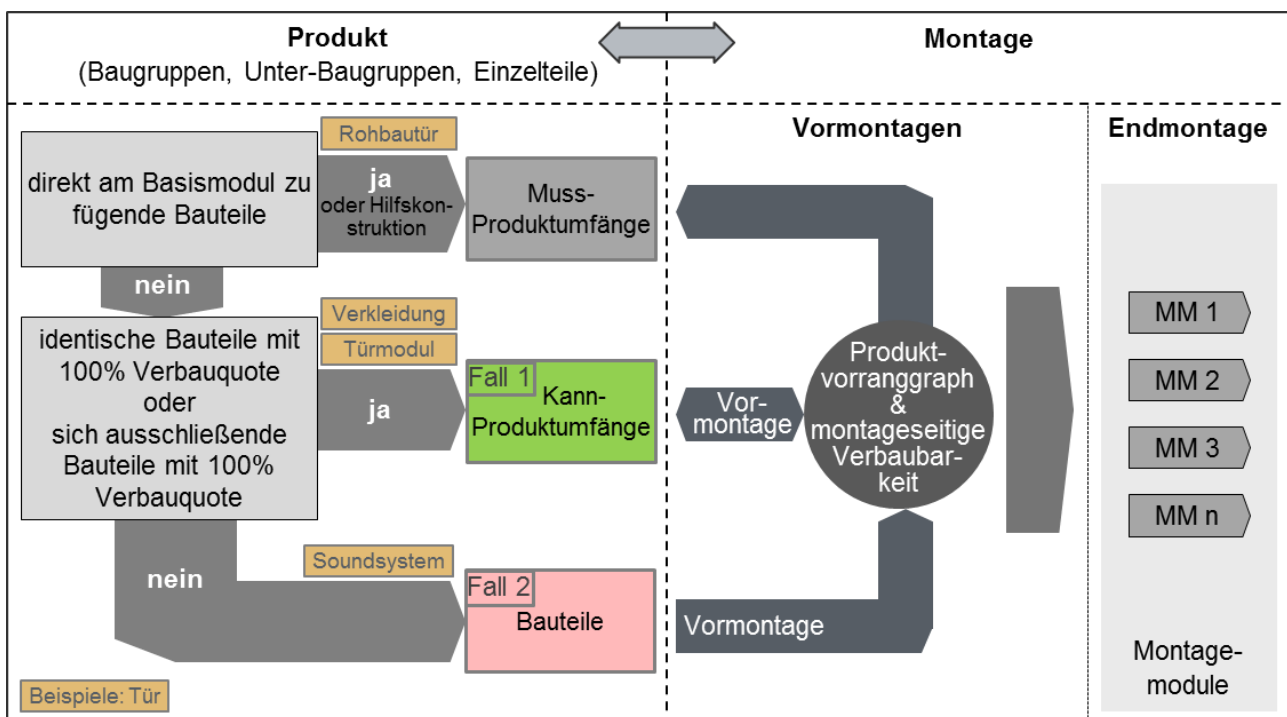


Abbildung 5-3: Methode zur Bestimmung von Produkt- und Montagemodulen

Das Ergebnis sind fahrzeugspezifische Produktmodule, die in Vormontagen zusammgebaut und innerhalb von Montagemodulen in der Endmontage verbaut werden. Für die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien müssen diese fahrzeugspezifischen Produktmodule fahrzeugübergreifend gültigen Montagemodulen zugeordnet werden.

## 5.2.2 Verknüpfung von Produkt- und Montagemodulen

Der Verbau der Fahrzeugmodule geschieht in den Montagemodulen der Hauptlinie. Allerdings existieren Montagemodule, denen kein, ein oder mehrere Fahrzeugmodule zugeordnet sind. Montagemodule ohne Teilezuwachs, d.h. ohne zugeordnete Baugruppen bzw. Bauteile, können nicht aus der Produktstruktur abgeleitet werden (Ammer 1985), sondern sind aus den Anforderungen der Fahrzeugentwicklung und Qualitätssicherung zu ergänzen. Beispiele dafür sind Tätigkeiten zum Prüfen, Einstellen und Testen. Qualitätssichernde Maßnahmen, die einem Produktmodul zugeordnet und nicht bereits in der Vormontage durchführbar sind, sollten im damit verknüpften Montagemodul erfolgen. Der Aufwand für etwaige Reparaturen kann dadurch gering gehalten werden, da die Zugänglichkeit zum Produktmodul noch besteht. Wird ein Produktmodul bei allen betrachteten Fahrzeugen gleichermaßen verbaut, ist dem Montagemodul nur dieses zuzuordnen. Allerdings existiert der Fall, dass einem Montagemodul fahrzeugspezifisch unterschiedliche Produktmodule zugeordnet werden. Möglich ist dies nur, wenn folgende Anforderungen erfüllt sind:

- Die Produktmodule substituieren sich gegenseitig.
- Die Produktmodule werden zu einem vergleichbaren Aufbauzustand der Fahrzeuge montiert und können daher im gleichen Montagemodul und damit an der gleichen Position in der Montagelinie verbaut werden.
- Der Verbau der fahrzeugspezifischen Produktmodule erfolgt ähnlich, d.h. die Montageprozesse und die benötigte Montagetechnik sind vergleichbar bzw. trotz unterschiedlicher Verbaukonzepte können diese dennoch in einem gemeinsamen Montagemodul verbaut werden.

Beispielsweise kann der Energiespeicher für ein batterieelektrisch und verbrennungsmotorisch angetriebenes Fahrzeug dann im gleichen Montagemodul verbaut werden, wenn sich diese Umfänge substituieren (vgl. Abbildung 5-4). Weiter sollten keine Vorrangrestriktionen vorliegen und die ggf. unterschiedlichen Montageprozesse sollten im Montagemodul gleichermaßen durchführbar sein.

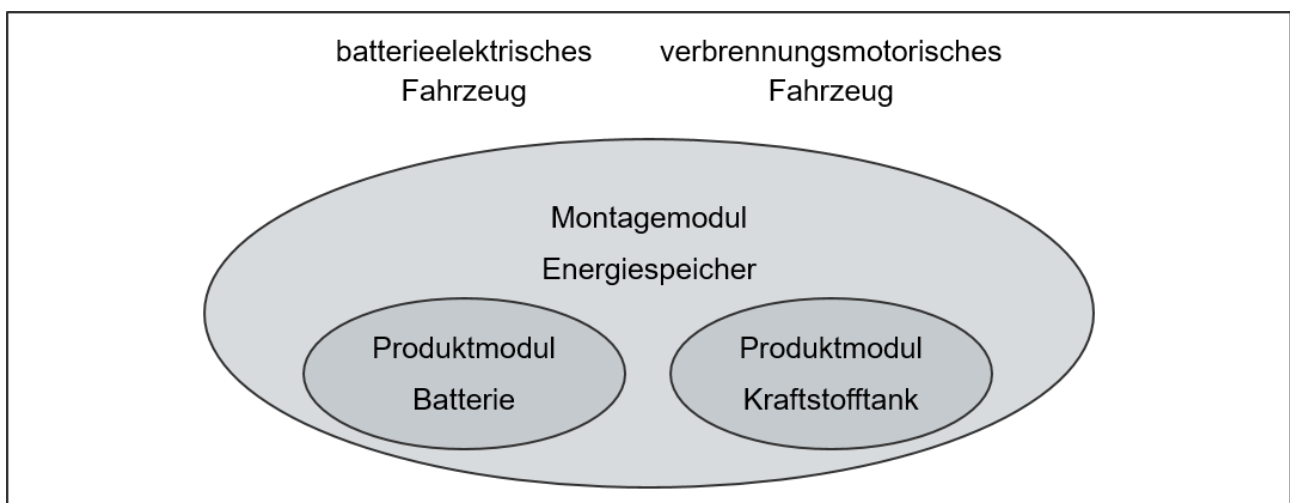


Abbildung 5-4: Harmonisierung fahrzeugspezifischer Produktmodule in einem Montagemodul

Die Verbindung zwischen Produkt und Montage erfolgt durch die Produktionslogistik. Das ist unabhängig davon, ob das Produktmodul aus einer Vormontage oder direkt vom Lieferanten kommt. Auch Logistikkonzepte können als Module definiert und den Montagemodulen zugeordnet werden. Abhängig ist dies vom zu liefernden Produktmodul (Popp *et al.* 2015). Erleichtert würde die Verknüpfung zwischen Produkt und Montage, wenn die Strukturen einheitlich wären, wie in Abbildung 5-5 dargestellt (Küber *et al.* 2016b).

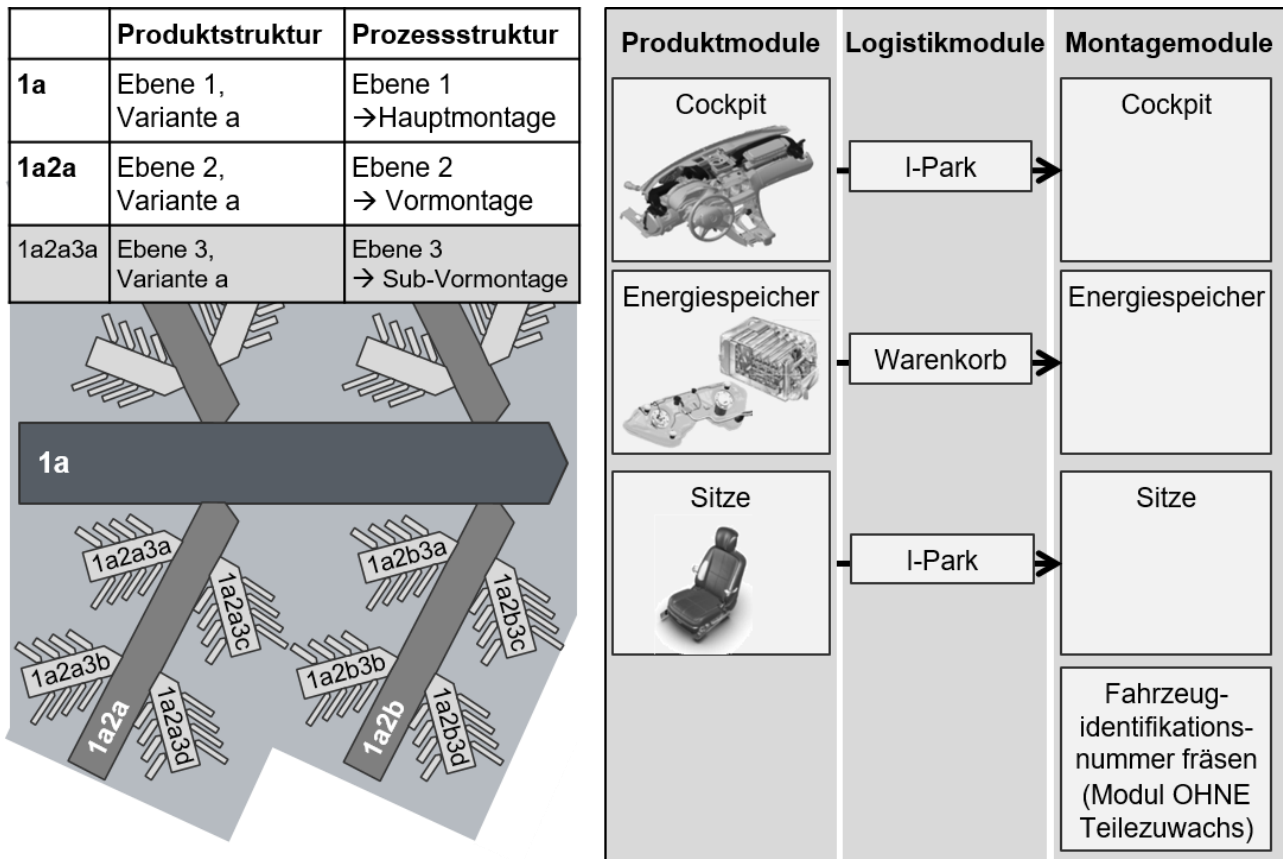


Abbildung 5-5: Dependenz zwischen der Produkt- und Prozessebene (Logistik und Montage)

Das Verschieben varianter Montagetätigkeiten in die Vormontagen wirkt sich zwar positiv auf die Zeitspreizungen in der Endmontage aus, allerdings treten diese dann in den Vormontagen auf. Diese müssen nach dem gleichen Planungsansatz wie die Endmontage geplant werden. Dazu sind auch in den Vormontagen variante Bauteile in vorgeschaltete Sub-Vormontagen zu verlagern. Die Montagestruktur käme damit der Produktstruktur gleich. Im Einzelfall ist auch zu prüfen, ob die Effizienz der Vormontage durch das Zusammenfassen gleicher bzw. ähnlicher Produkte zu Batches gesteigert werden kann.

### 5.2.3 Ermittlung der Montagezeiten für die Montagemodule

Nachdem die Produktmodule den Montagemodulen zugeordnet und Montagemodule ohne Teilezuwachs ergänzt wurden, sind zusätzlich die Montagezeiten

zu bestimmen. Dadurch wird in einem späteren Planungsschritt (vgl. Kap. 5.6) eine zeitliche Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie ermöglicht.

Trotz der Fahrzeugmodularisierung können die Montagezeiten zwischen den Fahrzeugen unterschiedlich sein, insbesondere durch variante Muss-Produktumfänge (vgl. Abbildung 5-3). Deshalb ist die Montagedauer für jedes Montagemodul fahrzeugspezifisch zu bestimmen. Die benötigten Vorgabezeiten der Arbeitsvorgänge werden durch die Montageplanung über MTM ermittelt (vgl. Kap. 3.2.1). Die notwendigen Arbeitsvorgänge für den Verbau der Produktmodule sind ebenso wie die Arbeitsvorgänge ohne Teilezuwachs fahrzeugspezifisch mit den Montagemodulen zu verknüpfen. Die Summe aus den Zeiten dieser Arbeitsvorgänge entspricht der fahrzeugspezifischen Montagedauer innerhalb des Montagemoduls. Kann die Logistik das Material fahrzeugspezifisch bereitstellen, beispielweise über Warenkörbe, dann ist es möglich, dass der Mitarbeiter fahrzeugspezifisch unterschiedliche Arbeitsvorgänge ausführt. Die dadurch geringere Wiederholrate der Tätigkeiten wirkt sich auf den Lerneffekt aus und die Einarbeitungszeit ist länger. Allerdings kann dadurch die fahrzeugspezifische Über- und Unterlast der Mitarbeiter nivelliert und die Variantenvielfalt erhöht werden.

Die Zuteilung von Arbeitsvorgängen erfolgt in der Regel innerhalb der Stationsgrenzen. Trotz eines erhöhten Planungsaufwands sind die Arbeitsinhalte innerhalb der Montagemodule auch stationsunabhängig auf die Mitarbeiter aufteilbar. Damit werden die klassischen Montagestationen aufgelöst. Für jeden Mitarbeiter ist dazu der Arbeitsbereich, der einer Stationslänge entspricht, individuell zu markieren (vgl. Abbildung 5-6). Die Arbeitszeit je Mitarbeiter darf dabei dennoch nicht die Taktzeit überschreiten, weil dies zu einer Überlast füh-

ren würde. Die Potenziale sind eine optimierte Materialbereitstellung und Auslastung der Mitarbeiter. Weiter können Betriebsmittel reduziert und die AK-Dichte ggf. erhöht werden. Zu beachten sind dabei Restriktionen bezüglich der Abfolge der Arbeitsvorgänge.

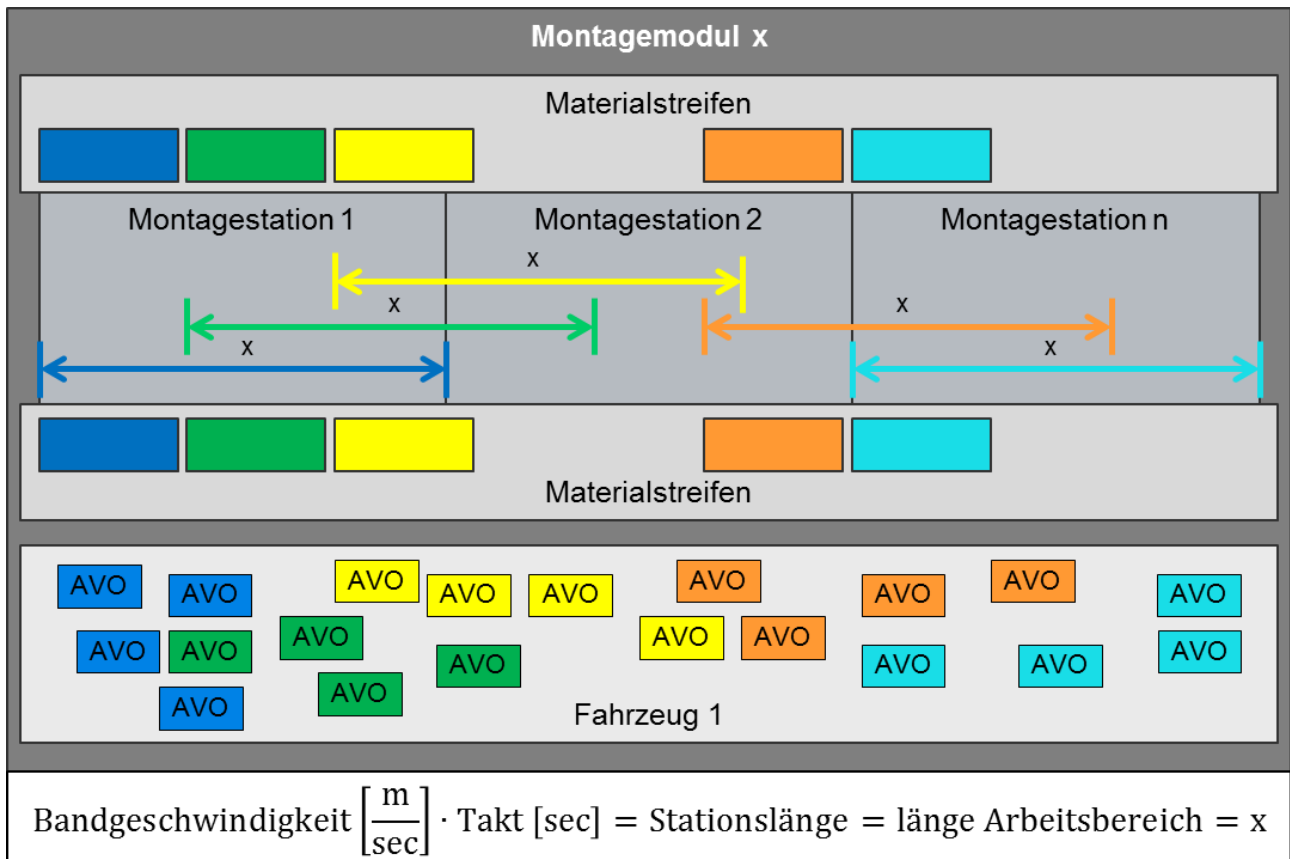


Abbildung 5-6: Zuteilung der Arbeitsvorgänge auf Mitarbeiter

Diese Art der Austaktung kann sowohl innerhalb der Montagemodule als auch zwischen den Montagemodulen angewandt werden.

### 5.3 Auswahl strategischer Montagemodule und Konfigurationskriterien

Mit der Anzahl der Montagemodule steigt der Aufwand für die Ermittlung der Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen. Daher ist es nicht zweckmäßig, alle Montagemodule vollumfänglich zu betrachten. Die Fokussierung auf

die entscheidenden Montagemodule ist aus Sicht der Grobplanung ausreichend und ermöglicht eine schnelle, zielorientierte Lösungsfindung. Die Auswahl dieser Montagemodule wird im Folgenden erläutert. Zudem sind, für eine Bewertung alternativer Montagekonfigurationen, Kriterien zu bestimmen. Abschließend wird die Bedeutung von Optimierungen innerhalb der Montagemodule erörtert.

### **5.3.1 Kriterien zur Bestimmung strategischer Montagemodule**

Für die Bestimmung der Montagekonfigurationen sind die Montagemodule heranzuziehen, die nach der Ausplanung nicht kurzfristig und mit angemessenem Kostenaufwand neu auf einer Montagelinie positioniert werden können. Diese werden als strategische Montagemodule bezeichnet. Neben der Eingangsvoraussetzung, dass die Montageprozesse eines Montagemoduls in sich abgeschlossen sind, erfolgt die Auswahl der strategischen Montagemodule mit Hilfe folgender Kriterien:

- fest in die Halle und die Hallenperipherie installierte, technische Einrichtungen (z.B. Montagemodul „Betankung“),
- automatisierte Montageprozesse (z.B. Montagemodul „Hochzeit“),
- notwendige Logistik- bzw. Vormontageflächen (z.B. Montagemodul „Räder“),
- starke reihenfolgenrelevante Abhängigkeiten zu anderen Montagemodulen (z.B. Montagemodul „Kabelsatz“).

Montagemodule, auf die diese Kriterien nicht zutreffen, zeichnen sich durch geringe Abhängigkeiten zu anderen Montagemodulen aus und sind nachträglich mit geringem Kostenaufwand und innerhalb kurzer Zeit neu auf der Montagelinie positionierbar. Daher können diese zunächst vernachlässigt werden.



Beispiele dafür sind die Montagemodule „Bedienungsanleitung“ und „Fußmatten“. Mit diesem Vorgehen wird erreicht, dass die Anzahl an Montagemodulen und dadurch der Zeitaufwand für die Ermittlung der Freiheitsgrade reduziert werden. Zudem sind die Reihenfolgenrestriktionen dieser strategischen Montagemodule bereits während der Fahrzeugentwicklung zu berücksichtigen, um die Integration neuer Fahrzeuge auf bestehenden Montagelinien zu erleichtern und kostengünstig zu realisieren.

### 5.3.2 Kriterien zur Bewertung alternativer Montagekonfigurationen

Die Generierung fahrzeugflexibler Montagekonfiguration erfolgt anhand der strategischen Montagemodule. Um eine Bewertung alternativer Lösungen durchführen zu können, sind den strategischen Montagemodulen weitere Eigenschaften zu hinterlegen. Differenziert wird dabei zwischen Montage- und Logistikkriterien. Deren Ausprägungen sind für jedes Montagemodul fahrzeugübergreifend festzulegen. Bei einer Planung im Greenfield ist die montagemodulspezifische Ausprägung durch die Montagestrategie festzuschreiben. Bei einer Brownfield-Planung sind den Montagemodulen die in der Linie bestehenden Ausprägungen zu hinterlegen, um zusätzliche Investitionen für Anpassungen zu vermeiden. Erforderliche Kriterien und deren Bedeutung werden in folgender Tabelle 5-2 erörtert.

<b>Montagekriterien</b>
<p><b>Fahrzeugposition:</b> Jede Höhenveränderung in der Fördertechnik verursacht Kosten. Daher sollte die Fördertechnik und damit auch das Fahrzeug über möglichst viele Stationen hinweg auf der gleichen Montagehöhe verbleiben. Deshalb ist eine Montagekonfiguration mit möglichst wenigen Höhensprüngen zu bevorzugen.</p>
<p><b>Fördertechnik:</b> Unterschiedliche Montageumfänge machen eine unterschiedliche Fördertechnik notwendig, u.a. das C-Gehänge, die Schubplattform und der Plattenförderer. Die Abgasanlage kann beispielsweise nur in einem C-Gehänge montiert werden, da der Unterboden in den anderen Fördertechniken unzugänglich ist. Die Wechsel zwi-</p>

<p>schen Fördertechniken sind aktuell nicht vermeidbar, sollten allerdings minimiert werden. Die Gründe dafür sind, dass durch jeden Wechsel zusätzliche Investitionen notwendig werden. Auch die Betriebskosten steigen dadurch an.</p>
<p><b>Bestromung:</b> Innerhalb eines Montagemoduls kann das Anschließen eines Fahrzeugs an eine externe Stromversorgung notwendig sein. Ein solcher Anschluss wird meist in die Fördertechnik integriert und erhöht die Investitionskosten. Damit nicht alle Fördertechniken mit einem Stromanschluss für das Fahrzeug ausgestattet sein müssen, sollten diese Montagemodule zusammengefasst werden.</p>
<p><b>Vormontagen:</b> Zur Reduzierung der Logistikkosten sollten die Vormontagen direkt an die Montagemodule angebunden werden, in denen das vormontierte Produktmodul verbaut wird. Vormontagen gehen meist mit einem Flächenbedarf und fest installierter Anlagentechnik einher. Auf einen veränderten Flächenbedarf der Vormontagen kann besser reagiert werden, wenn mehrere Vormontagen gebündelt auf einer gemeinsamen Fläche angesiedelt sind. Deshalb sollten Montagemodule mit einer angebundenen Vormontage zusammengefasst werden.</p>
<p><b>Sicherheits- und Grubenrelevanz:</b> Montagemodule mit Gruben und/oder mit besonderen Sicherheitsauflagen sollten aus Kostengründen zusammengefasst werden. Beispiele dafür sind Montagemodule, die wegen der Automatisierung zusätzliche Schutzeinrichtungen wie Schutzzäune benötigen. Aber auch während der Befüllungen mit Flüssigkeiten ermöglicht eine Grube die Sichtprüfung und damit die Sicherstellung der Dichtigkeit von Anschlüssen und Bauteilen.</p>
<p><b>Logistikkriterien</b></p>
<p><b>Logistik-Hauptumfänge:</b> Zu den Hauptumfängen zählen die Produktmodule, die in den Montagemodulen bereitzustellen sind. Die Materialbelieferung ist über einen Routenverkehr, Warenkörbe oder fahrerlose Transportsysteme realisierbar. Zudem kann die Belieferung direkt aus Industrieparks erfolgen, die in die Halle integriert und direkt an das Montagemodul anschlossen sind. Indem Montagemodule mit den gleichen Logistikkonzepten hintereinander angeordnet werden, können die Logistikkosten reduziert werden.</p>
<p><b>Logistik-Nebenumfänge:</b> Neben den Produktmodulen werden auch weitere Materialien wie Schrauben, Klebstoff etc. in den Montagemodulen benötigt. Auch hier ist die Materialbelieferung über einen Routenverkehr, Warenkörbe, fahrerlose Transportsysteme und aus einem in die Halle integrierten Industriepark möglich. Ebenso können auch hierbei Einsparungspotenziale realisiert werden, wenn hintereinanderliegende Montagemodule auf die gleichen Logistikkonzepte zurückgreifen.</p>

Tabelle 5-2: Montage- und Logistikkriterien

Die Modularisierung der Montageprozesse ist nicht nur für die Erhebung der Freiheitsgrade und die Generierung fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen notwendig, sondern es ergeben sich auch Potenziale innerhalb der Montage-module.

### 5.3.3 Optimierungen innerhalb der Montagemodule

Die Modularisierung der Endmontage und die Standardisierung der Montage-module erleichtert die Übertragung von erfolgreichen Optimierungsmaßnahmen. So lassen sich Best-Practise-Lösungen innerhalb eines Montagemoduls auf die anderen Montagemodule im Produktionsnetzwerk übertragen. Auch die Ausplanung eines Montagemoduls erfolgt einmalig und hat nicht mehr für jede Montagelinie gesondert zu erfolgen. Die Montagemodule sind dabei keinesfalls als statisch zu verstehen, sondern sind permanent weiterzuentwickeln (vgl. Ab-bildung 5-7).

**Entwicklung des Leistungsvermögens eines Montagemoduls über die Zeit**

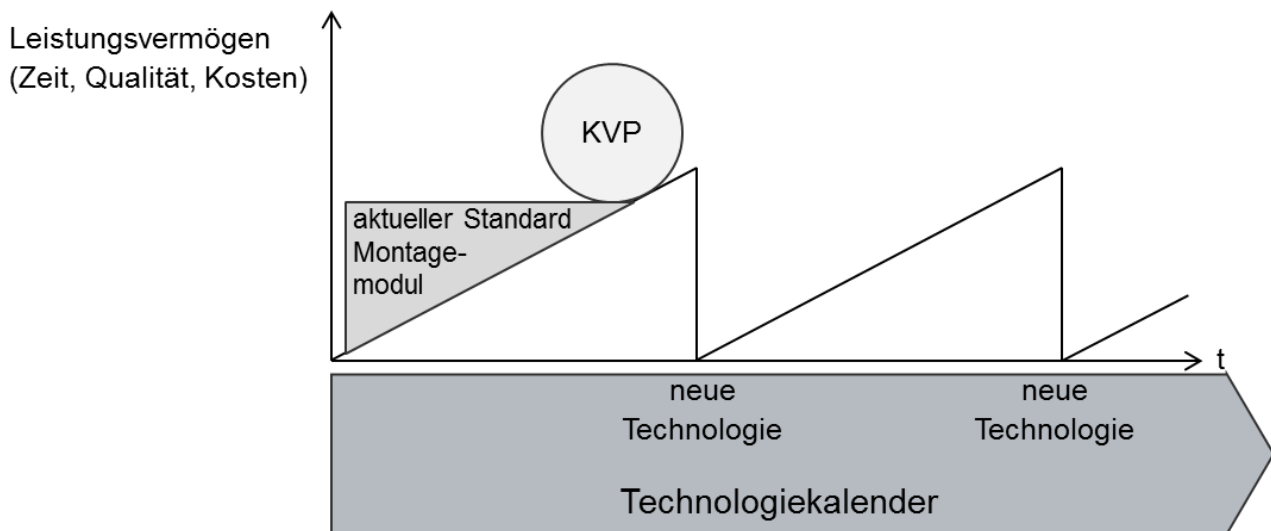


Abbildung 5-7: Weiterentwicklung von standardisierten Montagemodulen

Der Technologiekalender (vgl. Kap. 3.1.1) kann dazu genutzt werden, zukünftige Produkt- und Technologieänderungen transparent darzustellen, sodass

Montagemodule frühzeitig auf neue Produkte, Werkstoffe und Verfahren angepasst werden (Westkämper 2004). Die Modularisierung erlaubt Änderungen zunächst in einer Montagelinie zu implementieren und zu erproben. Sobald die Montageprozesse stabil ablaufen, die geforderte Qualität sichergestellt ist und erste Optimierungsmaßnahmen umgesetzt wurden, lässt sich dieses Montagemodul auf die anderen Montagemodule im Produktionsnetzwerk ausrollen. Dadurch lassen sich Anlaufverluste minimieren und erzielte Lernkurveneffekte teilweise auf andere Montagelinien übertragen. Auch das Zusammenwirken der Fahrzeugentwicklung sowie der Montage- und Logistikplanung ist innerhalb der Montagemodule zu bündeln. Dadurch wird bei interdependenten Zielgrößen die abteilungsübergreifende und ganzheitliche Lösungsfindung unterstützt.

Die Ermittlung der Freiheitsgrade zwischen allen Montagemodulen ist durch die Planungsexperten zeitlich nicht leistbar. Deshalb wurden in diesem Planungsbaustein einzelne Montagemodule anhand von Kriterien ausgewählt. Diesen strategischen Montagemodulen wurden zudem Kriterien-Ausprägungen hinterlegt, die eine spätere Bewertung alternativer Montagekonfigurationen ermöglichen. Im Weiteren sind die Freiheitsgrade zwischen den strategischen Montagemodulen zu bestimmen.

#### **5.4 Bestimmung der Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen**

Eine Endmontagelinie entspricht einem Pfad durch einen Montagevorranggraphen, bei dem alle Knoten, in diesem Kontext die Montagemodule, exakt einmal durchlaufen werden. Der Pfad repräsentiert damit eine lineare Anordnung der Montagemodule und damit die Konfiguration einer Montagelinie. Ein Mon-

tagevorranggraph beinhaltet die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen und damit auch die Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen. Daher werden zunächst die fahrzeug- und für eine Planung im Brownfield auch die montagespezifischen Freiheitsgrade bestimmt. Durch die Überlagerung der Freiheitsgrade und Restriktionen sämtlicher Fahrzeuge und der Montagelinie wird ein fahrzeugflexibler Montagevorranggraph generiert.

#### **5.4.1 Fahrzeug- und montagespezifische Bestimmung der Freiheitsgrade**

Die Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen sind fahrzeugspezifisch unterschiedlich und müssen daher auch für jedes betrachtete Fahrzeug gesondert bestimmt werden. Eine Montagelinie setzt sich ebenfalls aus den standardisierten Montagemodulen zusammen. Bei einer Brownfield-Planung sind deshalb zusätzlich die Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen der bestehenden Montagelinie zu ermitteln.

Zwischen den Montagemodulen können zahlreiche Freiheitsgrade existieren. Ein Freiheitsgrad bedeutet dabei, dass zwei Montagemodule unabhängig voneinander auf der Montagelinie angeordnet werden können, d.h. zwischen diesen besteht keine Vorgänger-Nachfolger-Restriktion. Dies wird am Beispiel eines Fahrzeugs deutlich. Tätigkeiten am Dach, Unterboden, Motor-, Koffer- und Innenraum sind weitestgehend unabhängig und entkoppelt voneinander, sodass kaum Abhängigkeiten bestehen. Deshalb ist eine visualisierte Erhebung der Abhängigkeiten zwischen den Montagemodulen über einen Graphen nicht handhabbar und zweckmäßig. Die Diskussion über die Freiheitsgrade muss aus diesem Grund in einem anderen Format geführt werden. Für die Ermittlung und die Speicherung der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Montagemodulen eignet sich eine Adjazenzmatrix (Schmigalla 1970; Förster

1983). Bei einer derartigen Matrix sind jeweils alle strategischen Montagemodule horizontal in x-Richtung und vertikal in y-Richtung aufzuführen. Die Schnittpunkte der jeweils gleichen Montagemodule dürfen nicht befüllt werden und sind für die Befüllung zu sperren, da ein Montagemodul nicht mit sich selbst in einer Vorgänger-Nachfolger-Beziehung stehen kann. In den restlichen Zellen sind jeweils die Abhängigkeiten zwischen den zwei Montagemodulen zu hinterlegen. Für 36 Montagemodule müssten beispielsweise 1260 Zellen ausgefüllt werden (vgl. Formel 5-1). Dieser Aufwand gilt es zu reduzieren, insbesondere da die Abhängigkeiten zwischen zwei Montagemodulen in zwei unterschiedlichen Zellen hinterlegt werden. In der befüllungsoptimierten Adjazenzmatrix ist die Informationsdichte in den Zellen erhöht. Die Vorgänger-Nachfolger-Beziehung zwischen zwei Montagemodulen wird dabei nur in einer Zelle gespeichert, wodurch sich die Anzahl auszufüllender Zellen halbiert. Dazu ist bei der Befüllung eine von drei möglichen Beziehungen zu wählen. Kann ein Montagemodul in y-Richtung dem Montagemodul in x-Richtung nur vorgelagert angeordnet sein, dann würde dies bedeuten: „y zu x“. Ist dies nur umgekehrt möglich, dann wäre „x zu y“ auszuwählen. Besteht ein Freiheitsgrad zwischen zwei Montagemodulen, d.h. zwischen den Montagemodulen besteht keine Vorgänger-Nachfolger-Restriktion, dann ist „x zu y & y zu x“ zu hinterlegen.

klassische Befüllung der Adjazenzmatrix		befüllungsoptimierte Adjazenzmatrix	
$y = x^2 - x$		$y = \frac{x^2 - x}{2}$	
y	Anzahl an Zellen, für die die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zu bestimmen sind		
x	Anzahl an Montagemodulen		

Formel 5-1: Anzahl zu bestimmender Vorgänger- und Nachfolger-Beziehungen zwischen den Montagemodulen

Die Informationen der befüllungsoptimierten Matrix sind identisch mit der klassischen Adjazenzmatrix, weshalb diese ineinander überführt werden können (vgl. Abbildung 5-8). Dies ist notwendig, um die Daten IT-technisch weiter verarbeiten zu können.

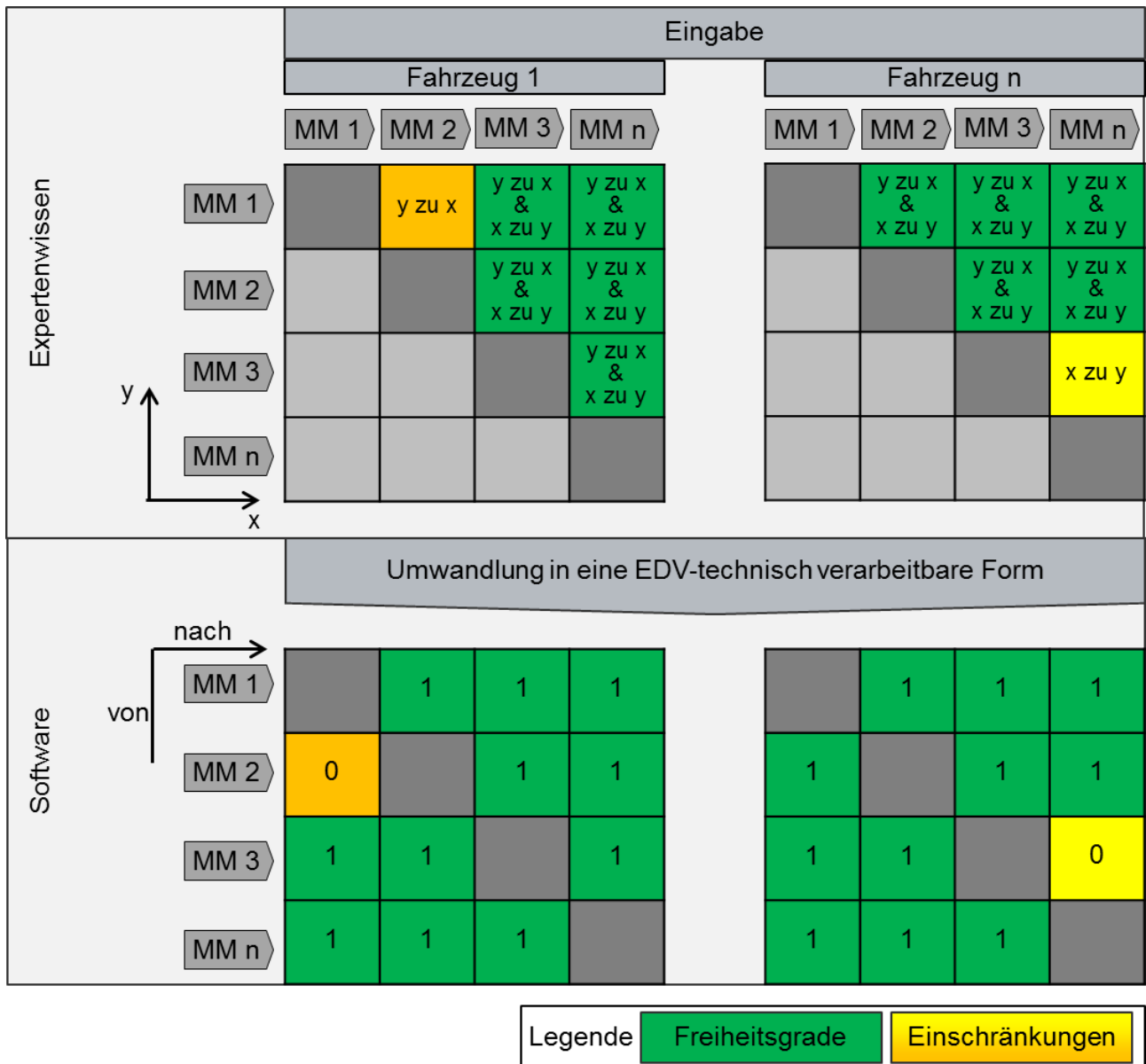


Abbildung 5-8: Adjazenzmatrix zur Bestimmung der Freiheitsgrade

Neue Fahrzeugkonzepte und die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien erfordern, dass geeignete Montagekonfiguration faktenbasiert und nicht vergangenheitsbasiert ermittelt werden. Dazu muss die Erhebung der Freiheitsgrade

objektiv erfolgen. Gewährleistet wird dies, indem jeweils nur die Abhängigkeiten zweier Montagemodule zu bewerten sind und dabei keine Abhängigkeiten mehrerer Montagemodule berücksichtigt werden müssen. Dadurch ist es auch möglich, die Befüllung der Matrizen auf Planungsexperten einzelner Montagemodule aufzuteilen.

Damit die Freiheitsgrade einheitlich erhoben werden, ist für die Befüllung der Adjazenzmatrizen die Befolgung eines Regelwerks notwendig, das sich zwischen Fahrzeugen und Montagelinien unterscheidet.

### **Regelwerk für die Ermittlung der Freiheitsgrade für ein Fahrzeug**

- Die Bewertung erfolgt jeweils nur zwischen zwei Montagemodulen. Pfadabhängigkeiten werden in der automatischen Konfigurationserstellung berücksichtigt, sodass diese für die Befüllung irrelevant und nicht zu berücksichtigen sind.
- Die Bewertung erfolgt nach den theoretisch möglichen Reihenfolgen. Ziel ist nicht, eine Aufnahme des aktuellen Montageablaufs durchzuführen, sondern eine aus Sicht des Fahrzeugs mögliche Anordnung der Montagemodule zu ermitteln.
- Eine schlechte Zugänglichkeit beim Verbau von Produktmodulen ist auszuschließen. Wenn ein Freiheitsgrad zwischen zwei Montagemodulen zwar theoretisch besteht, er aber zu einer verschlechterten Ergonomie und/oder Zugänglichkeit führen würde, so ist dieser Freiheitsgrad einzuschränken.

Die Ermittlung der Freiheitsgrade einer Montagelinie erfolgt losgelöst von den Fahrzeugen. Für die Montagelinie werden durch die Einschränkung der Freiheitsgrade die Montagemodule zueinander verblockt. Umfasst eine Montagelinie beispielsweise die Montagemodule „Teppich“, „Dachsystem“, „Himmel“



und „Sitze“, könnte die Situation vorliegen, dass die Betriebsmittel des Montagemoduls „Sitze“ und „Himmel“ sehr flexibel sind, sodass diese theoretisch an jede Position auf der Montagelinie verschoben werden können. Lediglich die Montagemodule „Teppich“ und „Dachsystem“ müssten zueinander verblockt werden. Deshalb kann eine große Anzahl an möglichen Montagekonfigurationen existieren. Für Montagelinien ist die Frage zu beantworten: Welche Montagemodule sind ortsflexibel und können kurzfristig und mit angemessenem Kostenaufwand auf einer Montagelinie neu angeordnet werden? Daraus leitet sich das Regelwerk für die Ermittlung der Freiheitsgrade einer Montagelinie ab.

### **Regelwerk für die Ermittlung der Freiheitsgrade für eine Montagelinie**

- Die Adjazenzmatrix ist unabhängig vom Fahrzeug zu befüllen. Zu fokussieren sind die montagespezifischen Bedingungen.
- Basierend auf einer Aufnahme der bestehenden Montagelinie ist zu untersuchen, welche Montagemodule kurzfristig und mit angemessenem Kostenaufwand auf der Montagelinie neu positioniert werden können. Diese Montagemodule weisen zu den anderen Montagemodulen nur Freiheitsgrade, keine Restriktionen auf („x zu y“ und „y zu x“).
- Bestehende Montagemodule, die aus Zeit- und Kostengründen nicht neu auf der Linie positioniert werden sollten, sind untereinander zu verblocken. Dazu ist für jedes dieser Montagemodule festzulegen, welche der restlichen, nicht verschiebbaren Montagemodule aktuell vor- bzw. nachgelagert angeordnet sind („x zu y“ oder „y zu x“).

Am Ende dieses Planungsschritts liegen die fahrzeug- und für eine Planung im Brownfield auch die linienspezifischen Adjazenzmatrizen vor. Damit fahrzeugflexible Montagekonfigurationen aufgebaut werden können, sind die fahrzeug-

und linienspezifischen Freiheitsgrade bzw. Restriktionen in der Anordnung der standardisierten Montagemodule zusammenzuführen.

#### **5.4.2 Überlagerung der Freiheitsgrade aller zu montierenden Fahrzeuge und der Montagelinie**

Jede Matrix entspricht einem Vorranggraphen. Da insbesondere bei den Fahrzeugen eine große Anzahl an Freiheitsgraden besteht, existieren zahlreiche Pfade durch diesen Vorranggraphen. Nur die Schnittmenge aller fahrzeug- und linienspezifischen Lösungen repräsentiert eine fahrzeugflexible Montagekonfiguration. Der Lösungsraum und damit der Rechenaufwand lässt sich reduzieren, indem nur die fahrzeugflexiblen Konfigurationen generiert werden. Denn diese beinhalten die Vorgänger-Nachfolger-Restriktionen aller betrachteten Fahrzeuge und der Montagelinie. Die Voraussetzung dafür ist die vorangegangene fahrzeug- und linienübergreifende Standardisierung der Montagemodule. Die Matrizen werden zwar fahrzeug- und linienspezifisch befüllt, die einheitlichen Montagemodule ermöglichen jedoch eine Überlagerung der spezifischen Matrizen (vgl. Abbildung 5-9). Diese überlagerte Matrix umfasst die geringste Menge aller Freiheitsgrade, sowohl die der betrachteten Fahrzeuge als auch die einer bestehenden Montagelinie. Dadurch ist jede auf der überlagerten Matrix fußende Montagekonfiguration fahrzeugflexibel. Zudem entfällt die Notwendigkeit einer Idealplanung, denn alle auf dieser Matrix basierenden Montagekonfigurationen entsprechen der Realplanung.

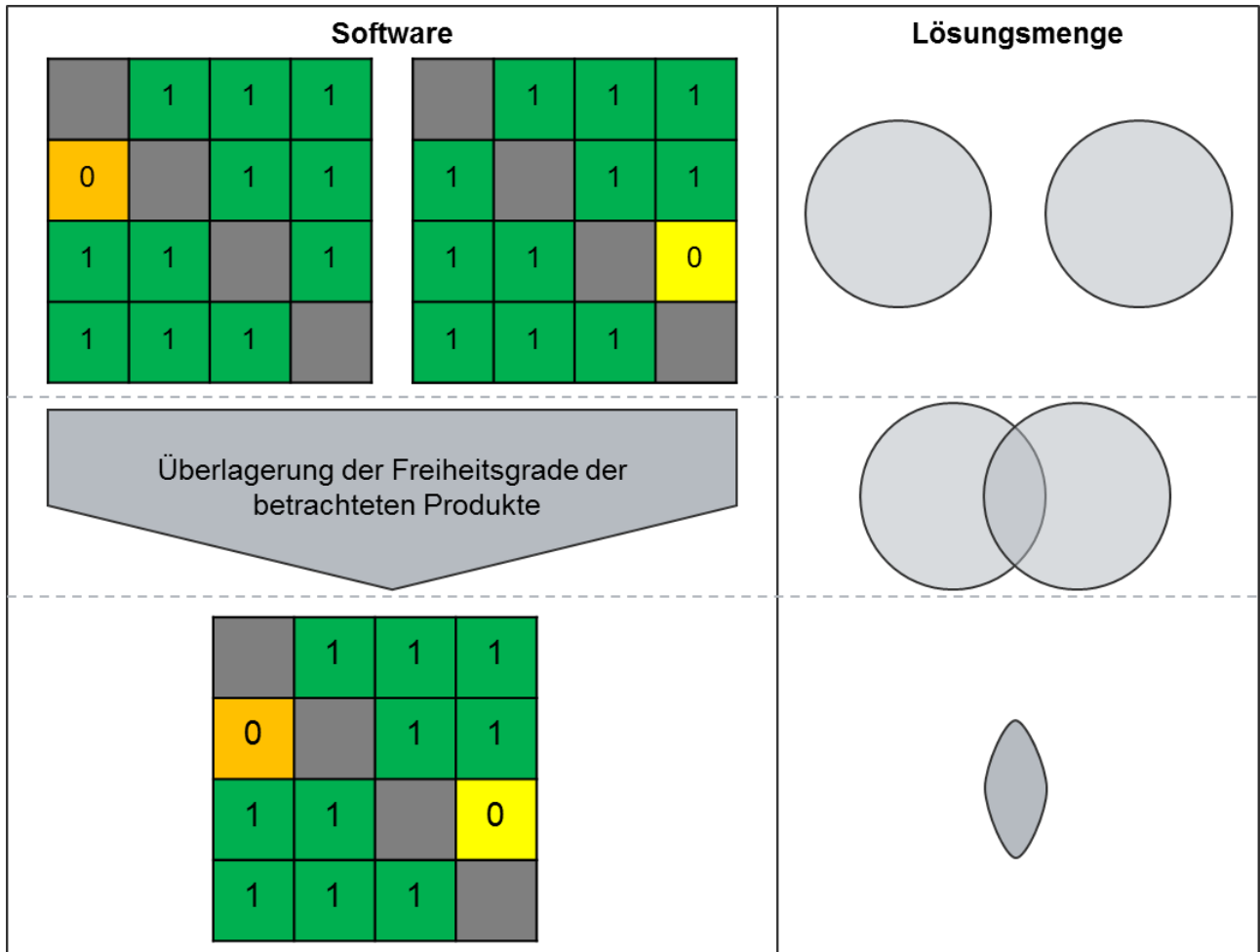


Abbildung 5-9: Überlagerung mehrerer Adjazenzmatrizen

Anhand folgender Regeln ist die überlagerte Matrix zu überprüfen und für die weiteren Planungsschritte anzupassen.

### Regelwerk für die überlagerte Adjazenzmatrix

- Eliminierung von Montagemodulen, die nicht für alle betrachteten Fahrzeuge notwendig sind. Diese Montagemodule zeichnen sich dadurch aus, dass in der Spalte und Zeile keine Freiheitsgrade hinterlegt sind. Ein derartiges Montagemodul wird folglich nicht für jedes Fahrzeug benötigt. Dieses ist aus der Matrix zu eliminieren und nachträglich (vgl. Kap. 5.6) in die Linie zu integrieren. Die Positionierung hat dabei nach den Freiheitsgraden der fahrzeugspezifischen Adjazenzmatrix zu erfolgen.

- Zyklusbezüge, d.h. zwei Montagemodule sind gegenseitig als zwangsweise Vorgänger oder Nachfolger definiert, machen eine lineare Anordnung der Montagemodule unmöglich und müssen deshalb eliminiert werden. Dazu ist festzulegen, welches Montagemodul vor bzw. nach welchem angeordnet sein muss. Dadurch sind fahrzeugseitig konstruktive Änderungen vorzunehmen und/oder über die Freiheitsgrade der Montagelinie hinausgehende Anpassungen hinsichtlich der Anordnung der Montagemodule in der Montagelinie vorzunehmen.

Durch die Standardisierung der Montagemodule war eine Überlagerung der fahrzeug- und linienspezifischen Matrizen möglich. Das Ergebnis dieses Planungsschritts ist eine überlagerte Matrix, die einen Mischgraphen repräsentiert und sämtliche Einschränkungen der Fahrzeuge und der Montagelinie in der Anordnung der Montagemodule inkludiert. Damit wird sichergestellt, dass alle darauf gründenden Montagekonfigurationen fahrzeugflexibel sind.

## **5.5 Generierung produktflexibler Montagekonfigurationen**

Die überlagerte Matrix entspricht einem Mischgraphen. Jeder Pfad durch diesen Graphen, bei dem jedes Montagemodul exakt einmal durchlaufen wird, stellt eine fahrzeugflexible Montagekonfiguration dar. Wegen der Komplexität der Pfadabhängigkeiten zwischen den Montagemodulen sowie der Anzahl möglicher Lösungen, sind die Montagekonfigurationen automatisiert zu ermitteln. Daher ist ein Algorithmus zu entwickeln. Im Folgenden wird dieser abgehandelt und für die IT-gestützte Generierung der fahrzeugflexiblen Montagekonfigurationen herangezogen.

### 5.5.1 Rechnergestützter Aufbau möglicher Montagekonfigurationen

Für den Aufbau linearer Vorranggraphen werden in der Literatur mehrere Algorithmen zum topologischen Sortieren beschrieben. Zunächst sind die Anforderungen zu definieren, die an einen Algorithmus zum Aufbau von Montagekonfigurationen gestellt sind:

- Der Startknoten darf nicht der Endknoten sein.
- Jeder Knoten muss exakt einmal durchlaufen werden.
- Pfeile ( $x$  zu  $y$  oder  $y$  zu  $x$ ) und Kanten ( $x$  zu  $y$  und  $y$  zu  $x$ ) können vorliegen.
- Eine Pfeil-/Kantenbewertung muss möglich sein.
- Es sind alternative Lösungen zu bestimmen.
- Eine exakte Lösung ist zu präferieren.
- Eine Lösung ist unter einer Stunde zu ermitteln.

Hierbei handelt es sich um ein Traveling Salesman Problem (vgl. Kap. 3.3.3), mit der Einschränkung, dass nicht zwischen allen Montagemodulen Freiheitsgrade bestehen, jeder Knoten genau einmal durchlaufen wird und der Startknoten ungleich dem Endknoten ist. Damit können die Tiefen- und Breitensuche herangezogen werden. Der Lösungsraum ließe sich dabei über Branch-and-Bound-Verfahren einschränken, indem zunächst eine Schranke für nicht als Lösung zu sehende Montagekonfigurationen vorgegeben wird. Die Schranke könnte über die Bewertung einer heuristischen Lösung identifiziert werden, die beispielsweise über den Ameisen-Algorithmus aufgebaut wird. Exakte Lösungsverfahren gehen mit einer langen Berechnungsdauer einher und bei Heuristiken ist eine nachweislich exakte Lösungsfindung nicht gegeben (vgl. Kap. 3.3.3).

Im Folgenden wird ein auf der Breitensuche basierender Algorithmus entwickelt, der die Pfadabhängigkeiten zwischen den Knoten berücksichtigt und in der Lage ist, sämtliche Lösungen auszugeben. Der Ablauf wird im Folgenden beschrieben und ist in Abbildung 5-10 exemplarisch dargestellt:

Im **ersten Schritt** werden alle möglichen Startknoten ausgewählt und an die erste Position gesetzt. Dem entsprechen die Montagemodule ohne zwangsweisen Vorgänger, d.h. Montagemodule, die in der Adjazenzmatrix horizontal nur Freiheitsgrade aufweisen. In Abbildung 5-10 sind dies die Montagemodule „Teppich“ und „Dachsystem“.

Im **zweiten Schritt** werden alle Montagemodule an das zuletzt angefügte Montagemodul hinzugefügt. Die bereits vorhandenen Montagemodule werden dabei nicht erneut aufgeführt. Sind beispielsweise von vier Montagemodulen bereits drei Montagemodule gesetzt, kann nur noch das restliche Montagemodul angefügt werden (vgl. Abbildung 5-10).

Im **dritten Schritt** werden alle zuletzt angefügten Montagemodule gelöscht, für die nicht alle zwangsweisen Vorgänger vorgelagert sind. Beispielsweise muss das Montagemodul „Dachsystem“ vor dem Montagemodul „Himmel“ angeordnet sein (vgl. Abbildung 5-10).

Im Algorithmus werden Schritt zwei und drei gleichzeitig durchgeführt, d.h. nur die Montagemodule werden gesetzt, für die alle Vorgänger-Beziehungen erfüllt sind. Das Ergebnis sind alle möglichen, fahrzeugflexiblen Montagekonfigurationen.

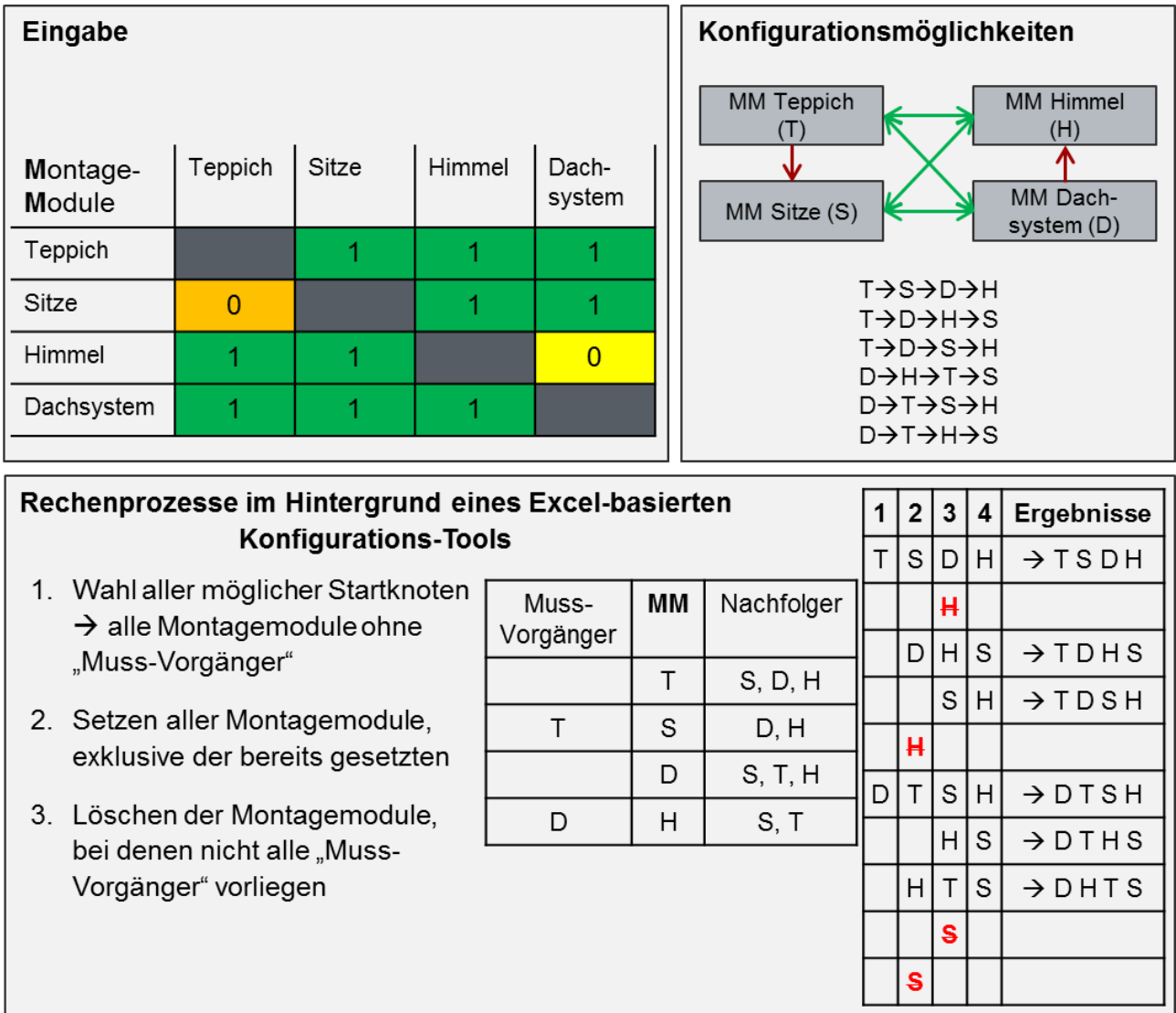


Abbildung 5-10: Bestimmung der Montagekonfigurationen am Beispiel ausgewählter Montagemodule

Abhängig von den Freiheitsgraden und der Anzahl an Montagemodulen geht ein exaktes Lösungsverfahren mit einer langen Rechendauer einher. Daher ist der oben beschriebene Algorithmus zu erweitern. Das Ziel ist dabei, abhängig von der Rechenleistung, der Anzahl an Montagemodulen und Freiheitsgraden, ein heuristisches oder ein exaktes Lösungsverfahren auszuwählen. Wird beispielsweise eine bestehende Montagelinie berücksichtigt, die wenige Freiheitsgrade aufweist, ist eine exakte Lösung zu präferieren. Durch den Rechen-

aufwand bei einer großen Anzahl an Freiheitsgraden ist hingegen ein heuristisches Lösungsverfahren zweckmäßig. Da es sich hierbei um ein NP-schweres Optimierungsproblem handelt (vgl. Kap. 3.3.3), stellt der Speicherbedarf und die Rechenleistung/-dauer eine Herausforderung dar (Scholl *et al.* 2010; Domschke *et al.* 2015). Dies in Zusammenhang mit der Anzahl an Montage-Modulen und Freiheitsgraden verdeutlicht Abbildung 5-11.

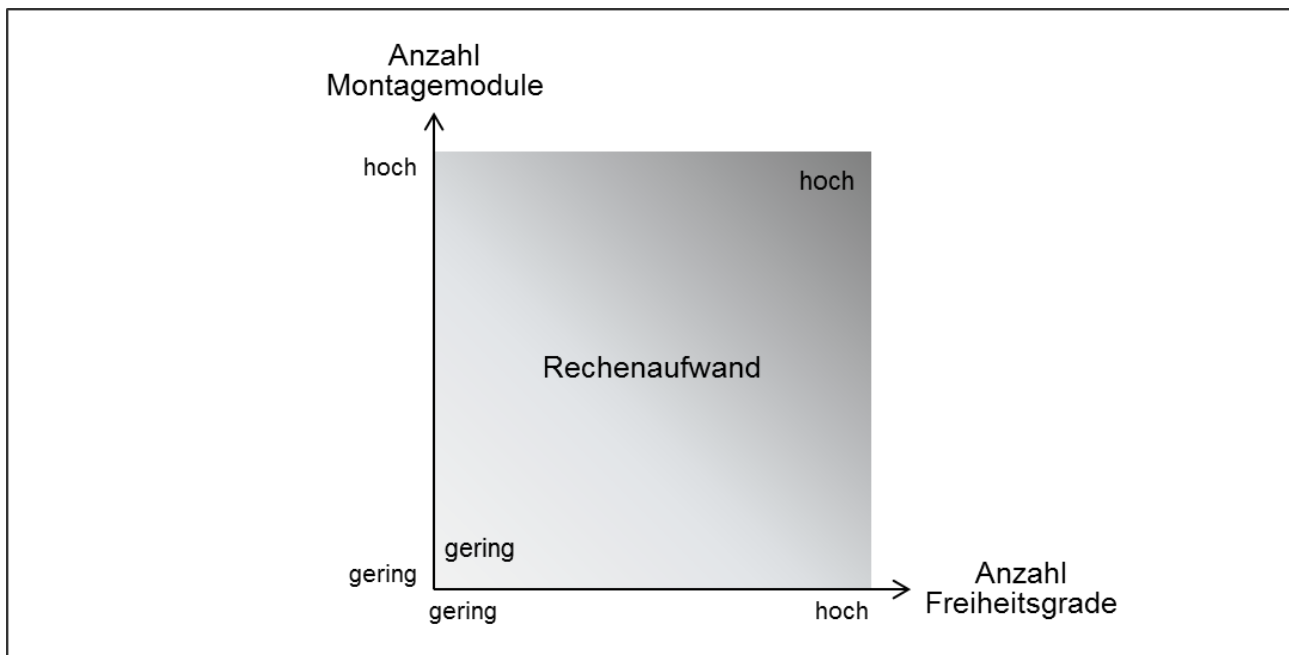


Abbildung 5-11: Auswirkungen der Anzahl an Montage-Modulen und Freiheitsgraden auf die benötigte Rechenleistung

Durch eine Reduzierung der Montage-Module und Freiheitsgrade könnte der Herausforderung des hohen Rechenaufwands begegnet werden. Der Forderung nach einer objektiven Montagekonfiguration würde dies jedoch nicht gerecht werden. Auch eine Vormodularisierung durch das Zusammenfassen einzelner Montage-Module würde der subjektiven Wahrnehmung unterliegen und ist daher zu vermeiden (Küber *et al.* 2016b).



Ist die Rechenleistung nicht ausreichend, um innerhalb einer Stunde Lösungen zu generieren, werden nicht erfolgsversprechende Konfigurationsansätze gelöscht. Dieser Prozess erfolgt schrittweise. Abhängig von der Speicherkapazität wird eine maximale Anzahl an speicherbaren Konfigurationsalternativen definiert. Diese Anzahl wird nach jeder Aufbaustufe überprüft. Wird eine gewisse Anzahl überschritten, startet ein Selektionsprozess (Schritt 1 in Abbildung 5-12). Die Notwendigkeit für diese so genannte Filterung soll anhand eines Zahlenbeispiels erörtert werden:

Wenn ab einem gewissen Aufbauzeitpunkt acht Millionen Konfigurationsmöglichkeiten bestehen und im nächsten Schritt durchschnittlich vier weitere Möglichkeiten je bereits bestehender Konfiguration hinzukommen, führt dies zu 32 Millionen ( $4 \times 8$  Mill.) möglichen Lösungen. Dies setzt sich bei jedem Schritt fort. So wären es bei der darauffolgenden Aufbaustufe, sofern wieder jeweils vier alternative Montagemodule angefügt werden könnten, bereits 128 Millionen ( $4 \times 32$  Mill.) Lösungen.

Wird die definierte Anzahl alternativer Lösungen erreicht, müssen diese bewertet werden (Schritt 2 in Abbildung 5-12). Der Prozess für die Bewertung alternativer Montagekonfigurationen erfolgt über einen paarweisen Vergleich zwischen den angeordneten Montagemodulen. Der Prozess dazu wird im darauffolgenden Kapitel 5.5.2 erörtert. Die höchst bewerteten Konfigurationsansätze werden weiterverfolgt, die restlichen gelöscht (Schritt 3 in Abbildung 5-12), was dem Setzen einer Schranke gleichkommt. Die Anzahl alternativer, aufzubauender Konfigurationen wird dadurch reduziert. Der Prozess läuft standardmäßig weiter. Sind am Ende alle Montagemodule angefügt, besteht wahlweise die Möglichkeit, nochmals eine solche Filterung durchzuführen. Dadurch lässt sich die Anzahl der auszugebenden Lösungen auf die am höchsten bewerteten reduzieren.

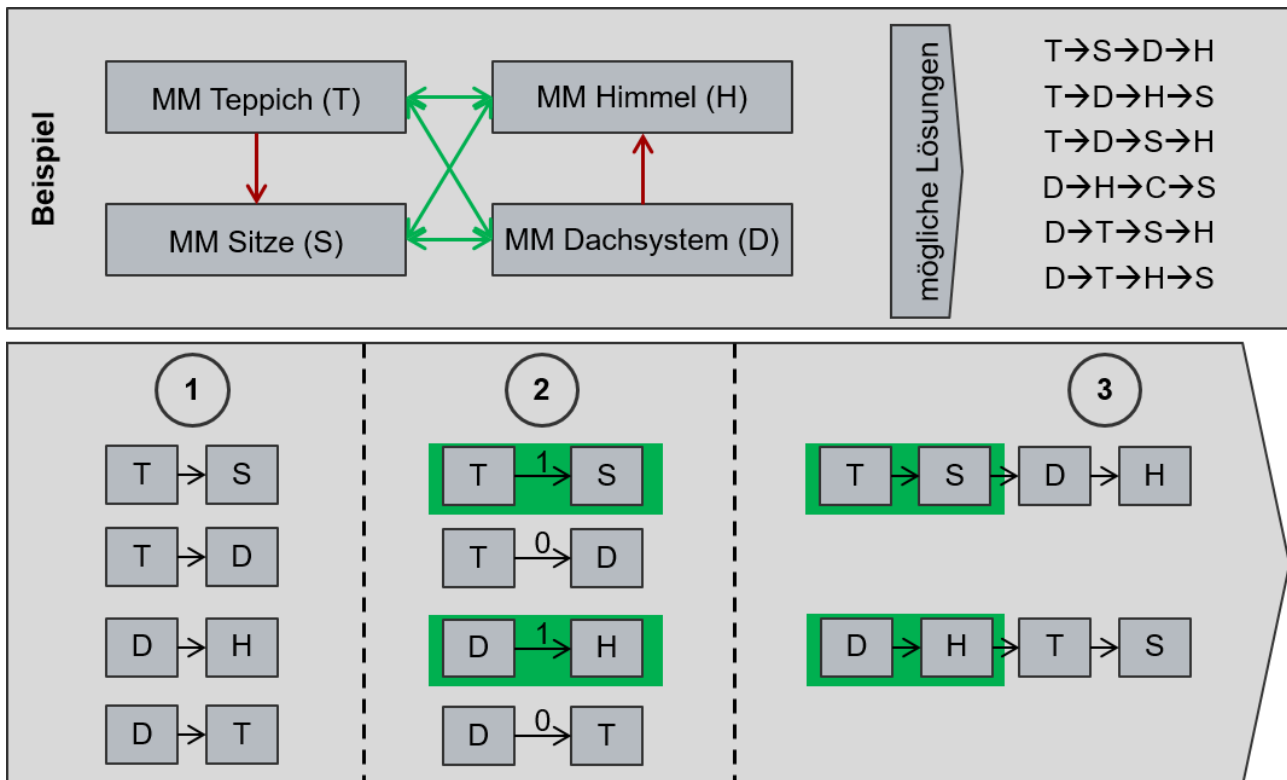


Abbildung 5-12: Prozesse einer objektiven, IT-unterstützten Filterung nicht erfolgsversprechender Konfigurationsansätze

Wenn keine Filterung durchgeführt wurde, ist sichergestellt, dass die fahrzeugflexible Montagekonfiguration mit der höchstmöglichen Bewertung anhand der Kriterien identifiziert ist. In einer Filterung besteht jeweils das Risiko, dass eine bis zur Aufbaustufe x als gering bewertete Konfiguration verworfen wird, die am Ende des Aufbauprozesses eine höchstbewertete Lösung dargestellt hätte. Dieser Filterungsprozess kann als Vormodularisierung gesehen werden. Allerdings erfolgt dieser IT-technisch basierend auf der überlagerten Matrix und unterliegt keinen subjektiven Einflüssen.

Voraussetzung für die Filterung ist die Bewertung der alternativen Montagekonfigurationen. Dazu hat zwischen den Montagemodulen ein paarweiser Vergleich zu erfolgen.

### **5.5.2 Paarweiser Vergleich zur Bewertung alternativer Montagekonfigurationen**

Damit aus alternativen Montagekonfigurationen eine geeignete Lösung ausgewählt werden kann, sind diese zu bewerten. Dies geschieht methodisch über einen paarweisen Vergleich, wie Abbildung 5-13 verdeutlicht. Dabei werden die Ausprägungen der Kriterien (vgl. Kap. 5.3.2) zwischen den Montagemodulen verglichen. Ist ein Kriterium zweier Montagemodule identisch, wird der Wert „1“ mit der zuvor festgelegten Gewichtung multipliziert, ansonsten wird der Wert „0“ gesetzt. Dies wird für jedes Kriterium durchgeführt. Die Gesamtbewertung ergibt sich aus der Addition aller Bewertungen der Kriterien zweier Montagemodule.

Anstatt der Gewichtung ist auch das Hinterlegen von Kosten möglich, um alternative Montagekonfigurationen anhand der notwendigen Investitionen und laufenden Kosten zu bewerten. Dazu kann die Prozesskostenrechnung herangezogen werden. Für jeden Wechsel der Kriterien zwischen den Montagemodulen sind die daraus resultierenden Investitionskosten zu ermitteln. Die variablen Kosten finden Berücksichtigung, indem diese mit der prognostizierten Stückzahl multipliziert und zu den Investitionskosten addiert werden. Dies ist in Tabelle 5-3 anhand eines Beispiels dargestellt.

<b>Beispiel: Wechsel der Fördertechnik</b>	
(Montagemodul „Cockpit“ zu Montagemodul „Unterbodenverkleidung“)	
<b>fixe Kosten</b> Investitionskosten durch den Wechsel der Fördertechnik (von Schubplattform auf C-Gehänge)	<b>200.000,- €</b>
<b>variable Kosten</b> prognostizierte Stückzahl x stückzahlbezogene variable Kosten (z.B. durch zusätzlichen Stromverbrauch)	300.000 Fahrzeuge x 1,- €= <b>300.000,- €</b>
<b>fixe und variable Kosten</b> (bezogen auf 300.000 produzierte Einheiten) als Resultat des Fördertechnik-Wechsels	<b>500.000,- €</b>

Tabelle 5-3: Beispielhafte Bewertung möglicher Montagekonfigurationen anhand fixer und variabler Kosten

Für alle Bereiche der überlagerten Matrix, in der eine „1“ notiert ist, also ein Freiheitsgrad besteht, wird dieser paarweise Vergleich durchgeführt. Das Ergebnis der Bewertung wird in die Zelle in der Adjazenzmatrix zurückgeschrieben. Sind die Kriterien zweier Montagemodule nicht identisch, würde eine „0“ notiert und in die Zelle zurückgeschrieben werden. Dabei ginge die Information über den bestehenden Freiheitsgrad verloren. Um dieses Problem zu lösen, wird nach jedem paarweisen Vergleich der Wert „1“ zur Bewertung addiert. Damit bleibt die Information über den bestehenden Freiheitsgrad erhalten. Das hat keinen Einfluss auf das Resultat, da dieser Wert einheitlich auf alle Ergebnisse des paarweisen Vergleichs addiert wird.

Das Montagemodul „Teppich“ kann beispielsweise vor dem „Himmel“ und muss vor den „Sitzen“ auf der Montagelinie angeordnet werden. In den Montagemodulen „Teppich“ und „Sitze“ ist die gleiche Fahrzeugposition notwendig und daher würde dieses Kriterium mit dem Wert „1“ bewertet und mit der Gewichtung multipliziert werden. Die Montagemodule „Teppich“ und „Himmel“

hingegen sind auf unterschiedlichen Fahrzeugpositionen montierbar, weshalb das Ergebnis dieses paarweisen Vergleichs „0“ wäre. Dies hat für alle Kriterien gleichermaßen zu erfolgen. Die Summe aller Bewertungen zwischen zwei Montagemodulen zuzüglich des Werts „1“ wird in die Matrix zurückgeschrieben.



Abbildung 5-13: Bewertung möglicher Montagekonfigurationen

Die Gesamtbewertung einer Montagekonfiguration resultiert aus der Summe des paarweisen Vergleichs zwischen den jeweiligen Montagemodulen.

Nach der Generierung und Bewertung fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen ist eine Differenzierung zwischen den Anwendungsfällen einer Brown- und Greenfield-Planung vorzunehmen.

### 5.5.3 Montagekonfigurationen für eine Green- und Brownfield-Planung

Alle Montagekonfigurationen, die auf der Grundlage der überlagerten Matrix aufgebaut werden, sind fahrzeugflexibel. Zudem müssen durch die Überlagerung nicht sämtliche fahrzeug- und linienspezifischen Lösungen generiert und anschließend die Schnittmenge bestimmt werden. Den Unterschied einer Planung im Green- und Brownfield ist in Tabelle 5-4 beispielhaft dargestellt.

Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	bestehende Montagelinie																																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>T</th> <th>S</th> <th>H</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>T</th> <td></td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <th>S</th> <td>0</td> <td></td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <th>H</th> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>D</th> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		T	S	H	D	T		1	1	1	S	0		0	1	H	1	1		0	D	1	1	1		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>T</th> <th>S</th> <th>H</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>T</th> <td></td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <th>S</th> <td>0</td> <td></td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <th>H</th> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>D</th> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		T	S	H	D	T		1	1	1	S	0		1	1	H	1	1		0	D	1	1	1		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>T</th> <th>S</th> <th>H</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>T</th> <td></td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>S</th> <td>1</td> <td></td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <th>H</th> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <th>D</th> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		T	S	H	D	T		1	1	0	S	1		1	1	H	1	1		1	D	1	1	1	
	T	S	H	D																																																																									
T		1	1	1																																																																									
S	0		0	1																																																																									
H	1	1		0																																																																									
D	1	1	1																																																																										
	T	S	H	D																																																																									
T		1	1	1																																																																									
S	0		1	1																																																																									
H	1	1		0																																																																									
D	1	1	1																																																																										
	T	S	H	D																																																																									
T		1	1	0																																																																									
S	1		1	1																																																																									
H	1	1		1																																																																									
D	1	1	1																																																																										
<b>Greenfield-Planung</b> Lösungen: T→D→H→S D→T→H→S D→H→T→S	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>T</th> <th>S</th> <th>H</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>T</th> <td></td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <th>S</th> <td>0</td> <td></td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <th>H</th> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>D</th> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		T	S	H	D	T		1	1	1	S	0		0	1	H	1	1		0	D	1	1	1		Lösungen: D→T→H→S D→H→T→S																																																		
	T	S	H	D																																																																									
T		1	1	1																																																																									
S	0		0	1																																																																									
H	1	1		0																																																																									
D	1	1	1																																																																										
<b>Brownfield-Planung</b>																																																																													
	T→S→D→H																																																																												
T→D→H→S	T→D→H→S																																																																												
	T→D→S→H																																																																												
D→T→H→S	D→T→H→S	D→T→H→S																																																																											
D→H→T→S	D→H→T→S	D→H→T→S																																																																											
	D→T→S→H	D→T→S→H																																																																											
		...																																																																											
T = Teppich, D = Dachsystem, S = Sitze, H = Himmel																																																																													

Tabelle 5-4: Montagekonfigurationen für eine Green- und Brownfield-Planung

Für eine Planung im **Greenfield** ist eine fahrzeugflexible Montagelinie immer dann möglich, wenn auf Grundlage der überlagerten Matrizen der Fahrzeuge mindestens eine Montageabfolge konfigurierbar ist. Existiert keine Lösung, sind die Fahrzeuge nicht gemeinsam auf einer Linie montierbar bzw. es müssen weitere Freiheitsgrade realisiert werden. Dazu sind an den Fahrzeugen konstruktive Anpassungen vorzunehmen, sodass eine andere Montagereihenfolge möglich wird.

Im **Brownfield** sind zu den Fahrzeugen, die zukünftig gemeinsam auf der Linie montiert werden sollen, zusätzlich die bestehende Montagelinie zu berücksichtigen. Das ermöglicht zu untersuchen, ob ein Fahrzeug auf einer bestehenden Montagelinie integrierbar ist. Sollen aus Kostengründen hierbei Anpassungen an der bestehenden Montagelinie vermieden werden, ist die Matrix der Montagelinie ohne Freiheitsgrade heranzuziehen. Diese spiegelt die bestehende Konfiguration wider, sodass auch nur eine Lösung zulässig ist. Kann diese Montagekonfiguration aufgebaut werden, ist das zusätzliche Fahrzeug integrierbar. Andernfalls sind konstruktive Änderungen am Fahrzeug vorzunehmen. Sind Anpassungen der bestehenden Montagekonfiguration zulässig, ist die linienspezifische Matrix mit Freiheitsgraden heranzuziehen. Existiert dennoch keine fahrzeugflexible Montagekonfiguration, dann sind Anpassungen der bestehenden Montagelinie und/oder konstruktive Anpassungen bei den Fahrzeugen notwendig. In Tabelle 5-5 wäre eine konstruktive Anpassung am Fahrzeug erforderlich, sodass der Verbau der „Sitze“ nach dem „Himmel“ möglich wird. Eine Alternative ist die Anpassung der Montagelinie, sodass das Montagemodul „Himmel“ auch nach dem Montagemodul „Teppich“ und „Sitze“ positioniert werden kann.

<p>Montagelinie ohne Freiheitsgrade</p> <p>exakt eine Lösung:</p> <p><b>D</b> → <b>H</b> → <b>T</b> → <b>S</b></p>	<b>MM</b>	T	S	H	D	<p><b>konstruktive Fahrzeuganpassungen</b></p> <p>hier: der Himmel sollte vor den Sitzen verbaut werden können</p>
	Teppich (T)		1	0	(0)	
	Sitze (S)	0		(0)	(0)	
	Himmel (H)	1	1		0	
	Dachsystem (D)	1	1	1		
<p>Montagelinie mit Freiheitsgraden</p> <p>eine von mehreren Lösungen:</p> <p><b>D</b> → <b>T</b> → <b>S</b> → <b>H</b></p>	<b>MM</b>	T	S	H	D	<p><b>Nutzung der Freiheitsgrade der Montagelinie</b></p> <p>hier: das MM Himmel sollte nach den restlichen MM angeordnet werden können</p>
	Teppich (T)		1	0→1	(0)	
	Sitze (S)	0		0→1	(0)	
	Himmel (H)	1	1		0	
	Dachsystem (D)	1	1	1		
(0) redundante Information, solange die Pfadabhängigkeit zwischen den Montagemodulen nur eine Lösung zulässt						
<p>Fahrzeug n</p>	<b>MM</b>	T	S	H	D	<p>Lösungsmöglichkeiten</p>
	Teppich (T)		1	1	1	
	Sitze (S)	0		1	1	
	Himmel (H)	1	0→1		0	
	Dachsystem (D)	1	1	1		

Tabelle 5-5: Erhöhung der Freiheitsgrade zur Integration eines Fahrzeuges auf einer bestehenden Montagelinie

Durch diese Untersuchung kann die Integrationsfähigkeit eines weiteren Fahrzeuges auf einer bereits bestehenden Montagelinie im Brownfield beurteilt werden. Auch ermöglicht es die Beantwortung der Frage, ob mehr als ein Fahrzeug auf einer gemeinsamen Linie im Greenfield endmontierbar ist. Existiert keine Lösung, sind montageseitig und/oder fahrzeugseitig notwendige Anpassungen zu identifizieren.



### 5.5.4 Bewertung der Montagekonfigurationen

Für die Greenfield- als auch die Brownfield-Planung können die Montagekonfigurationen bewertet werden, indem der Erfüllungsgrad der Kriterien herangezogen wird. Zudem kann über eine Sensibilitätsanalyse untersucht werden, wie stark die Montagekonfigurationen auf veränderte Anforderungen reagieren.

Durch die Filterung anhand der **Kriterien-Bewertung** wird nur eine Teilmenge aller möglichen fahrzeug- und linienspezifischen Montagekonfigurationen ausgegeben, nämlich die höchstbewerteten. Zusätzliche Freiheitsgrade führen ggf. zu einer Erhöhung des Erfüllungsgrades. Die Montagelinie ohne Freiheitsgrade ist immer auch eine Lösung der Lösungsmenge, wenn die Freiheitsgrade berücksichtigt werden. Dieser Sachverhalt verdeutlicht Tabelle 5-6. Liegt die bestehende Montagekonfiguration innerhalb der Lösungsmenge, die sich durch einen hohen Erfüllungsgrad der Kriterien auszeichnet, ist dies auch ein Indiz für die Aktualität der Montagelinie.

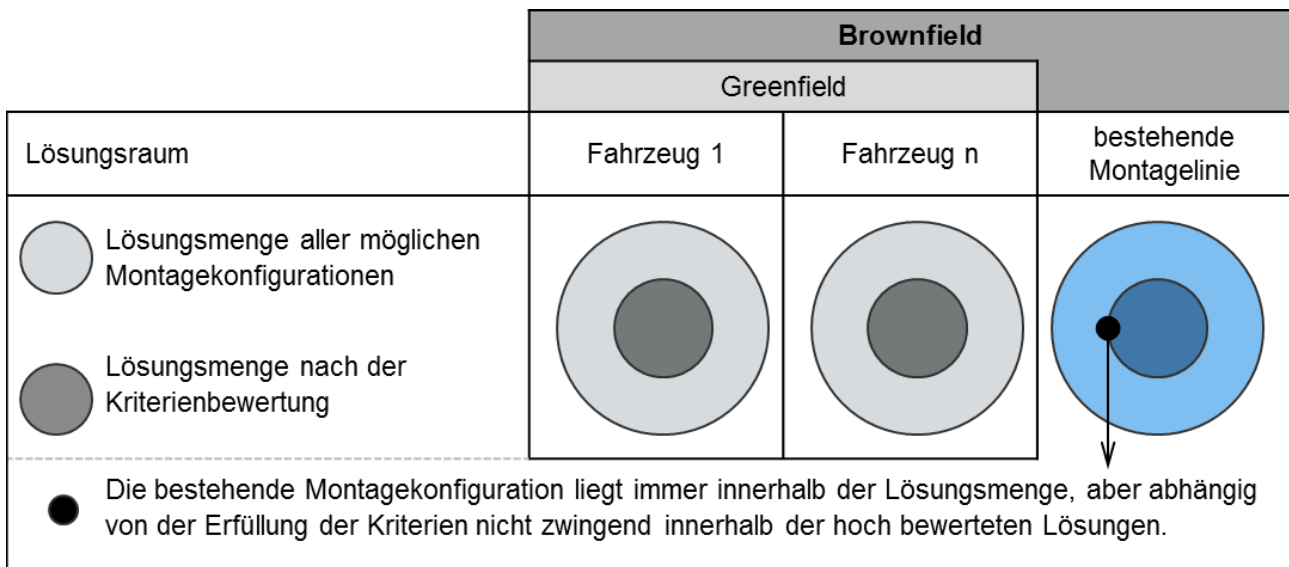


Tabelle 5-6: Lösungsmenge der Montagekonfigurationen

Eine fahrzeugflexible Montagekonfiguration ist die Schnittmenge der fahrzeug- und linienspezifischen Lösungsmenge. Wenn keine Schnittmenge vorhanden

ist, existiert keine fahrzeugflexible Montagekonfiguration, sodass fahrzeugseitige oder montageseitige Anpassungen vorzunehmen sind (vgl. Kap. 5.5.3). Besteht eine Schnittmenge und damit eine fahrzeugflexible Montagekonfiguration, kann der Erfüllungsgrad der Kriterien dieser Lösung dem höchsten Erfüllungsgrad einer fahrzeug- bzw. linienspezifischen Montagekonfiguration gegenübergestellt werden. Damit ist eine Beurteilung der Lösungsqualität möglich. Durch das Schaffen zusätzlicher Freiheitsgrade in den fahrzeug- und linienspezifischen Matrizen kann untersucht werden, ob dies zu einer weiteren Verbesserung des Erfüllungsgrades der Lösungen führt. Diesen Zusammenhang zwischen den Schnittmengen und der Qualität der Lösung verdeutlicht folgende Tabelle 5-7.

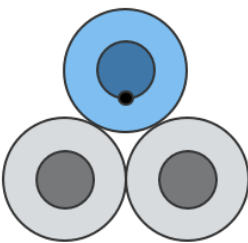
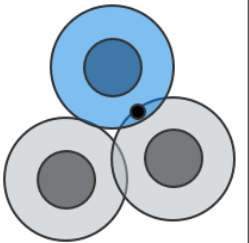
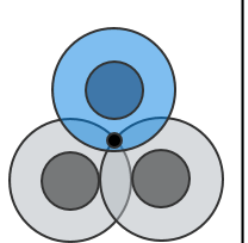
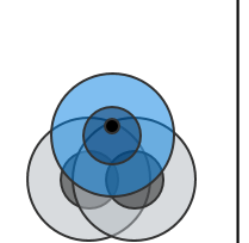
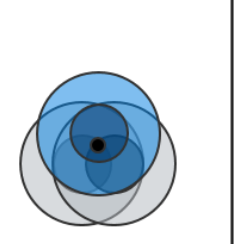
Montagelinie ohne [●] und mit [⊙] Freiheitsgraden / möglicher Neu-Konfiguration				
				
Fahrzeuge können nicht auf der Linie montiert werden	nicht alle Fahrzeuge können auf der Linie montiert werden	alle Fahrzeuge können auf der Linie montiert werden		
→ Fahrzeug- und/oder Montageanpassungen notwendig		→ durch Fahrzeug- und/oder Montageanpassungen kann der Erfüllungsgrad der Kriterien erhöht werden	→ keine Anpassungen notwendig	
Eine Montagekonfiguration ist anhand folgender Fragen auszuwählen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Welches Fahrzeug soll primär auf der Linie montiert werden? → Die Montagekonfiguration sollte für dieses Fahrzeug einen hohen Erfüllungsgrad der Kriterien aufweisen.</li> <li>• Sollen Umbaumaßnahmen der Montagelinie möglichst vermieden werden? → Anpassungen sollten bevorzugt auf Fahrzeugebene erfolgen.</li> </ul>				

Tabelle 5-7: Identifikation und Bewertung produktflexibler Montagekonfigurationen

Wurden mehrere Montagekonfigurationen mit einem gleichen oder ähnlichen Erfüllungsgrad der Kriterien identifiziert, kann eine weitere Bewertung über eine **Sensibilitätsanalyse** erfolgen. Dazu sind die Kriterien bzw. deren Gewichtung zu verändern. Beispielsweise können zukünftig erwartete Fördertechniken und Logistikanbindungen berücksichtigt werden. Die Lösungsmenge der fahrzeugflexiblen Montagekonfigurationen ändert sich dadurch nicht, allerdings die Bewertung der jeweiligen Montagekonfigurationen. Abbildung 5-14 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

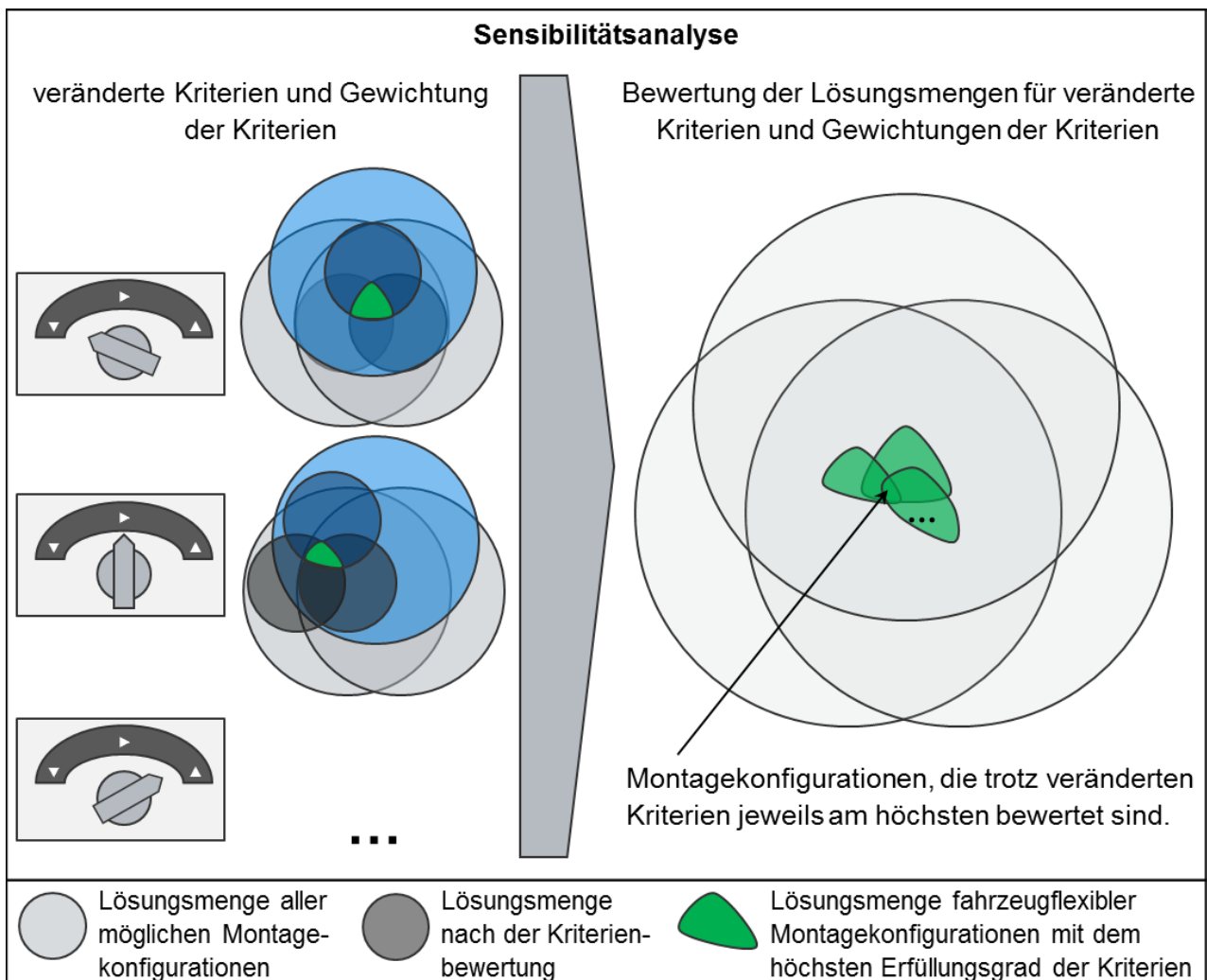


Abbildung 5-14: Sensibilitätsanalyse

Anhand der Bewertung kann die Montagekonfiguration identifiziert werden, die trotz veränderter Kriterien gegenüber alternativen Lösungen jeweils einen hohen Erfüllungsgrad aufweist. Existiert eine Montagekonfiguration, die trotz veränderten Kriterien jeweils am höchsten bewertet ist, sollte diese ausgewählt werden.

Dieser Planungsschritt diene der Generierung fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen für die Planung im Green- bzw. Brownfield. Durch die Bewertung dieser Lösungen wird der Auswahlprozess einer geeigneten Montagekonfiguration unterstützt. Diese fahrzeugflexible Montagekonfiguration ist die Voraussetzung für die zeitliche Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie.

## **5.6 Zeitliche Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie**

Im Rahmen der Grobbandbelegung werden die Montagemodule auf der Montagelinie positioniert. Für eine fahrzeugflexible Montagelinie ist die zuvor ermittelte und ausgewählte Montagekonfiguration zwingend einzuhalten. Zunächst hat dazu die Visualisierung der Montagezeiten zu erfolgen, wobei diese über die Länge eines Balkens auf einem Zeitstrahl repräsentiert werden (Bullinger *et al.* 1986). Dies geschieht fahrzeugspezifisch für die Gesamtmontagedauer (MTE) und für die Montagemodule. Für eine Planung im Brownfield muss gleichermaßen die Montagedauer der gesamten Linie sowie der einzelnen Montagemodule visualisiert werden (vgl. Tabelle 5-8). Für die zeitliche Positionierung sind neben den strategischen auch die flexiblen Montagemodule zu berücksichtigen, wodurch abschließend die Grobbandbelegung für eine Planung im Green- wie auch im Brownfield möglich ist. Die Variantenmixflexibilität darf dabei nicht eingeschränkt werden.

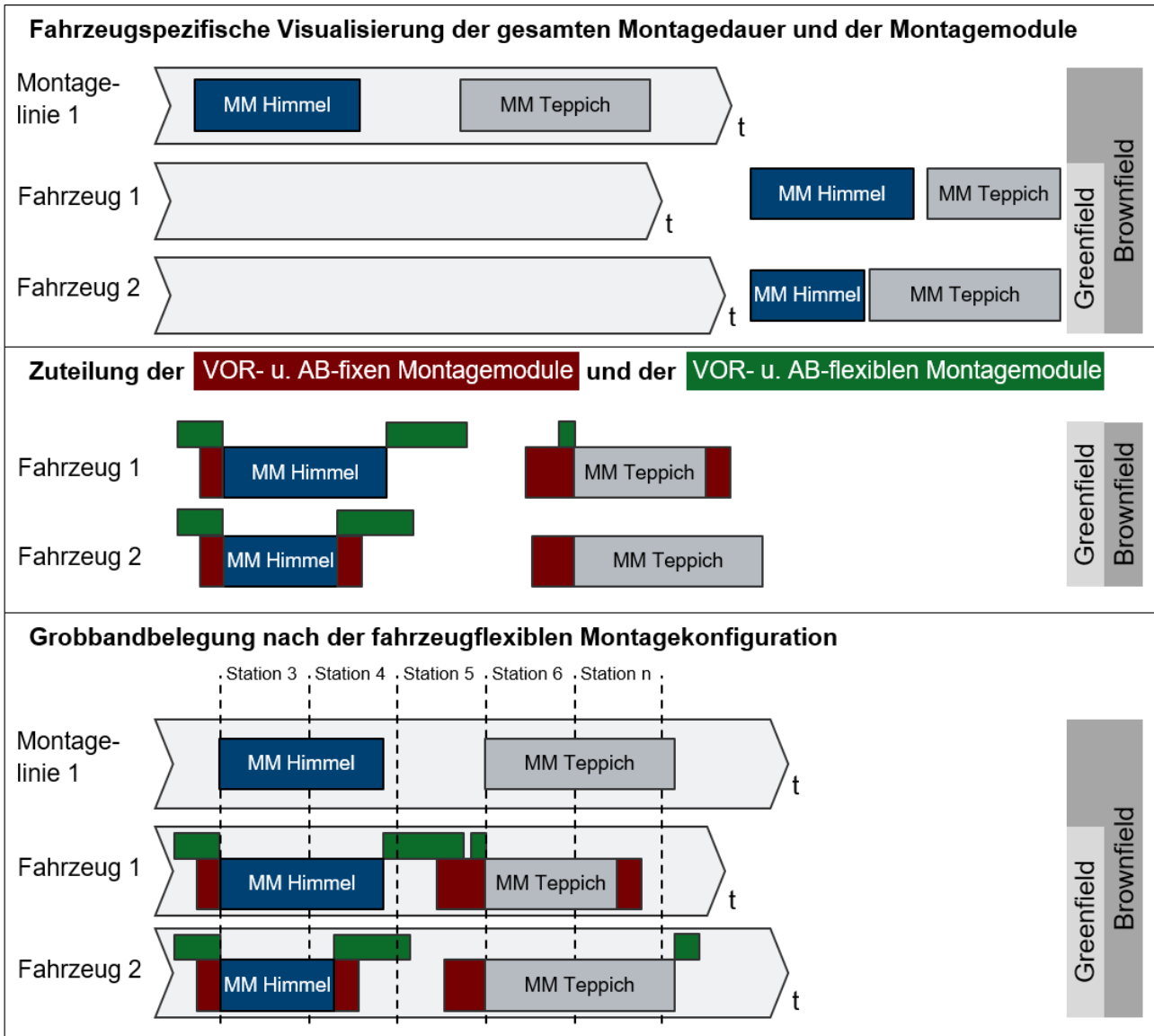


Tabelle 5-8: Zeitliche Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie

Auf die einzelnen Schritte, wie in Tabelle 5-8 dargestellt, wird im Folgenden detailliert eingegangen.

### 5.6.1 Fahrzeugspezifische Visualisierung der gesamten Montagedauer und der Montagemodule

Fahrzeugspezifisch unterschiedliche Montagezeiten innerhalb der Montagemodule können durch die Fahrzeugmodularisierung harmonisiert werden. Fahrzeugbedingt ist dies aber häufig nicht in vollem Umfang möglich, sodass die Montagezeiten zwischen den betrachteten Fahrzeugmodellen variieren.

Die Bestimmung durchschnittlicher Montagezeiten anhand von Stückzahlprognosen scheidet aus, da dadurch die Variantenmixflexibilität eingeschränkt würde. Folglich müssen die fahrzeugabhängigen Montagezeiten berücksichtigt werden. Dazu sind für jedes Fahrzeug, im Brownfield auch für die Montagelinie, die gesamte Montagedauer und die Montagezeiten der Montagemodule zu betrachten. Dies ermöglicht eine Visualisierung der zeitlichen Unterschiede und bildet die Basis für die Grobbandbelegung. Die Länge der Montagelinie und der Montagemodule repräsentiert dabei die benötigte Montagedauer. Alternativ könnten die Montagezeiten in die Montagelänge umgerechnet werden, vorausgesetzt, die durchschnittliche AK-Dichte des Montagemoduls, die Stationslänge und der Takt ist festgelegt (vgl. Formel 3-1). Neben den strategischen Montagemodulen müssen auch die flexiblen Montagemodule in den zeitlichen Bezug gesetzt werden.

### **5.6.2 Zuteilung der strategischen und flexiblen Montagemodule**

Die Summe aller strategischen und flexiblen Montagemodule (vgl. Kap 5.3) repräsentiert die gesamte Dauer zur Endmontage eines Fahrzeuges (vgl. Abbildung 5-15). Für eine exakte Positionierung der strategischen Montagemodule auf der Montagelinie sind auch die flexiblen Montagemodule zu berücksichtigen. Der Grund dafür ist, dass diese zwischen den Montagemodulen positioniert werden und dadurch die Positionierung der strategischen Montagemodule beeinflussen. Allerdings zeichnen sich die flexiblen Montagemodule durch viele Freiheitsgrade aus. Diese können mit geringem Aufwand neu auf der Montagelinie positioniert werden.

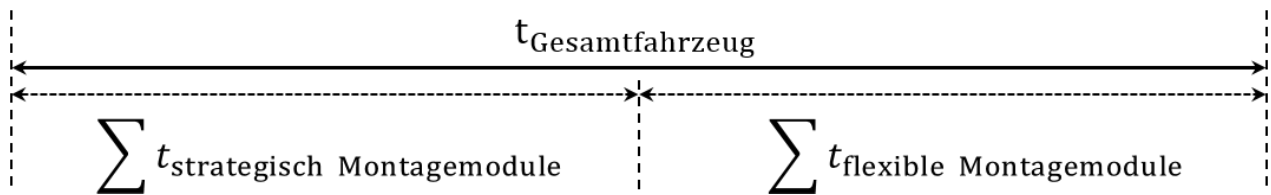


Abbildung 5-15: Montage eines Gesamtfahrzeuges - die Summe der Montagedauer der strategischen und flexiblen Montagemodule

Es bestehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Positionierung der flexiblen Montagemodule auf der Montagelinie (Küber *et al.* 2016b). Tabelle 5-9 gibt einen Überblick zu alternativen Vorgehensweisen, die im Folgenden diskutiert und auf Anwendbarkeit hin untersucht werden.

Die Berücksichtigung der **flexiblen und strategischen Montagemodule** bei der Generierung der Montagekonfigurationen ist nicht möglich, da eine zu große Anzahl an alternativen Montagekonfigurationen berechnet werden müsste, insbesondere durch die flexiblen Montagemodule. Diese würden durch die Freiheitsgrade zu zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten und damit zu alternativen Montagekonfigurationen führen (vgl. Kap. 5.5.1).

Auch eine **gleichmäßige Verteilung** der flexiblen Montagemodule scheidet als Möglichkeit aus. Der Grund dafür ist, dass die Positionierung der flexiblen Montagemodule abhängig von der Montagekonfiguration ist.

Die einzige, anwendbare Möglichkeit ist die von der **Montagekonfiguration abhängige Verteilung** der flexiblen Montagemodule. Dabei werden diese, abhängig von der ermittelten Montagekonfiguration, an die strategischen Montagemodule gekoppelt.




Möglichkeiten zur Positionierung der flexiblen Montagemodule auf der Montagelinie	Darstellung	Anwendbarkeit
	strategische Montagemodule flexible Montagemodule	
Berücksichtigung der <b>flexiblen und strategischen Montagemodule</b> bei der Konfiguration der Montagelinie		✗
<b>gleichmäßige Verteilung</b> der flexiblen Montagemodule		✗
von der <b>Montagekonfiguration abhängige Verteilung</b> der flexiblen Montagemodule		✓

Tabelle 5-9: Bewertung möglicher Vorgehensweisen zur Positionierung der flexiblen Montagemodule auf der Montagelinie

Die flexiblen Montagemodule können einem strategischen Montagemodul zwangsweise vor- oder nachgelagert (VOR-/AB-fix) bzw. flexibel vor- oder nachgelagert (VOR-/AB-flexibel) sein. Vor- und Ab-fixe Montagemodule beinhalten fahrzeugspezifische Tätigkeiten, die direkt vor oder nach einem strategischen Montagemodul angeordnet werden müssen. Die Vor- und Ab-flexiblen Montagemodule zeichnen sich dadurch aus, dass diese spätestens bis zum Start eines strategischen Montagemoduls verbaut sein müssen bzw. frühestens ab dem Ende dieses Montagemoduls verbaut werden können (vgl. Abbildung 5-16). Dadurch ist eine von der Montagekonfiguration abhängige Verteilung der flexiblen Montagemodule möglich. Auch bei der Positionierung der flexiblen Montagemodule sind die fahrzeugspezifischen Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zu berücksichtigen.



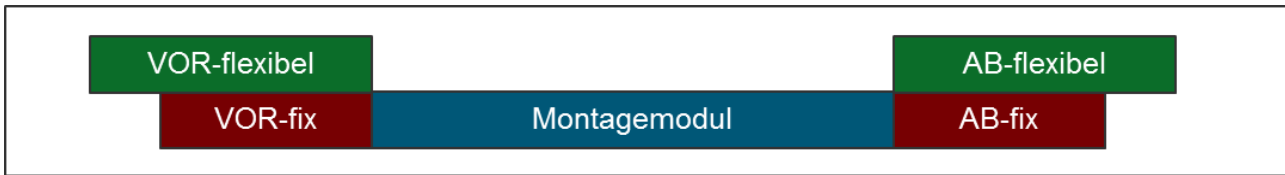


Abbildung 5-16: Zuteilung der flexiblen Montagemodule zu den strategischen Montagemodulen

Die flexiblen Montagemodule sind für jedes Fahrzeug gesondert zu erheben und fahrzeugspezifisch auf der Montagelinie zu positionieren. Dennoch sollten fahrzeugübergreifend ähnliche flexible Montagemodule in den gleichen Montagestationen positioniert werden. Dies erhöht den Lernkurveneffekt und auch die Logistik muss das Material nur an einer Montagestation bereitstellen.

Nur den strategischen Montagemodulen wurde die Ausprägung der Kriterien hinterlegt (vgl. Kap. 5.3). Dennoch sind die gleichen Kriterien auch bei der Positionierung der flexiblen Montagemodule zu berücksichtigen. Entscheidend ist dies insbesondere für die Feinplanung. So können beispielsweise die Vor- und Ab-flexiblen Montagemodule nur zwischen den strategischen Montagemodulen eingeplant werden, wo die notwendige Fördertechnik vorhanden ist.

### **5.6.3 Grobbandbelegung nach der produktflexiblen Montagekonfiguration**

Für die Grobbandbelegung liegen alle notwendigen Informationen vor. Dazu zählen die Montagezeiten (vgl. Kap. 5.2.3) sowie eine einzuhaltende Montagekonfiguration (vgl. Kap. 5.5). Entgegen einer Planung im Greenfield ist bei einer Brownfield-Planung die Stationsanzahl der Montagelinie meist festgelegt. Weicht die Anzahl der benötigten Montagestationen fahrzeugbedingt davon ab, muss die AK-Dichte bzw. die Stationsanzahl angepasst werden. Zu beachten ist, dass fahrzeug- und linienübergreifend die gleiche AK-Dichte zu Grunde gelegt ist. Liegt bei einer Brownfield-Planung die AK-Dichte eines Montagemoduls der bestehenden Montagelinie beispielsweise bei zwei, ist diese für alle

fahrzeugspezifischen Montagemodule zwingend identisch zu wählen. Ist dies sichergestellt, erfolgt die Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie. Dabei sind folgende Regeln einzuhalten.

### **Regelwerk zur zeitlichen Positionierung der Montagemodule**

- Die strategischen Montagemodule müssen nach der Reihenfolge auf der Montagelinie positioniert werden, wie es die ermittelte und ausgewählte Montagekonfiguration vorgibt.
- Gleiche, strategische Montagemodule sind für alle Fahrzeuge und im Brownfield auch für die Montagelinie jeweils zu Beginn der gleichen Station zu positionieren. Ansonsten müssten ggf. Betriebsmittel doppelt vorhanden sein und auch die Anlieferung des Materials müsste an unterschiedlichen Positionen erfolgen. Die Montagemodule dürfen sich dabei nicht gegenseitig überlagern.
- Die Vor- und Ab-fixen Montagemodule dürfen sich weder untereinander noch mit anderen Montagemodulen überschneiden. Diese müssen nicht auf einer Stationsgrenze liegen, da sie keine stationsfixen Betriebsmittel in Anspruch nehmen. Es sind Montagetätigkeiten, die zwangsweise vor oder nach einem strategischen Montagemodul durchzuführen sind.
- Die Vor- und Ab-flexiblen Montagemodule dürfen sich im Rahmen der Grobbandbelegung überlappen. Diese werden in der nachgelagerten Feinplanung zum Auffüllen von zeitlichen Lücken zwischen den strategischen Montagemodulen genutzt. Dabei können diese an jeder Position vor bzw. nach dem strategischen Montagemodul flexibel positioniert werden.
- Während der Grobbandbelegung ist eine Verschiebung der Montagemodule nach hinten notwendig, wenn die zeitlichen Lücken für die Positionierung der flexiblen Montagemodule nicht ausreichend sind.

Mit einer Abweichung der Gesamtmontagezeit zwischen den Fahrzeugen kann unterschiedlich umgegangen werden. Da dies die Positionierung der strategischen und flexiblen Montagemodule beeinflusst, wird im Folgenden näher darauf eingegangen.

#### 5.6.4 Umgang mit fahrzeugspezifisch unterschiedlichen Gesamtmontagezeiten

In der Regel unterscheiden sich die Zeiten für die Gesamtmontage der betrachteten Fahrzeuge (MTE). Damit kann unterschiedlich umgegangen werden, wie aus Tabelle 5-10 ersichtlich wird.

<b>Gesamtmontagedauer</b> Fahrzeug x < <b>Gesamtmontagedauer</b> Fahrzeug y	<b>Gesamtmontagedauer</b> Fahrzeug x > <b>Gesamtmontagedauer</b> Fahrzeug y
Leerstationen in der Montagelinie	zusätzliche Stationen in der Montagelinie
späteres Aufsetzen auf der Montagelinie	zusätzliche Stationen vor der fahrzeugübergreifenden Montagelinie
früheres Abfahren von der Montagelinie	zusätzliche Stationen nach der fahrzeugübergreifenden Montagelinie
parallele Montagestationen mit längerer Taktzeit	parallele Montagestationen mit kürzerer Taktzeit

Tabelle 5-10: Lösungen zum Umgang mit unterschiedlichen Montagezeiten zwischen den Produkten und der Linie

Die Konsequenz der unterschiedlichen Gesamtmontagezeiten zwischen den Fahrzeugen ist das Einbringen von zusätzlichen Montagestationen. Diese sind nicht für jedes Fahrzeug notwendig. Abhängig vom Variantenmix unterliegen sie deshalb einer schwankenden Auslastung. Wo die fahrzeugübergreifenden,

strategischen Montagemodule in der Montagelinie positioniert werden (vgl. Tabelle 5-10), ist durch die gezielte Positionierung der flexiblen Montagemodule beeinflussbar. Das nachträgliche Hinzufügen zusätzlicher Stationen innerhalb eines Montagemoduls hat beispielsweise weniger Auswirkungen auf die anschließenden Montagemodule, wenn dieses am Hallenrand bzw. am Ende eines Bandabschnitts angeordnet und ausreichend Fläche vorhanden ist.

Reduzieren lassen sich Montagestationen mit schwankender Auslastung durch die variantenmix-unabhängige Reduzierung der Durchlaufzeit der gesamten Montagelinie (vgl. Kap. 5.7) sowie die variantenmix-abhängige Harmonisierung der Durchlaufzeit innerhalb der Montagemodule (vgl. Kap. 5.8). Dies erfolgt basierend auf dem Ergebnis der zeitlichen Positionierung der strategischen Montagemodule auf der Montagelinie.

## **5.7 Variantenmix-unabhängige Reduzierung der Durchlaufzeit**

Die Reduzierung der Durchlaufzeit führt dazu, dass die Fahrzeuge die Endmontage schneller durchlaufen (vgl. Kap. 3.2.1). Neben Effizienzsteigerungen (vgl. Kap. 3.2.3) kann die Durchlaufzeit auch während der Montageplanung bereits durch die gezielte Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie reduziert werden. Dabei soll die Variantenmixflexibilität und damit die Fähigkeit auf Nachfrageverschiebungen zwischen den Fahrzeugen reagieren zu können, nicht eingeschränkt werden. Eine variantenmix-unabhängige Reduzierung der Durchlaufzeit kann sowohl über eine Erhöhung der AK-Dichte als auch über die Verblockung, Vertauschung und/oder Parallelisierung von Montagemodulen erfolgen (Küber *et al.* 2016a), worauf im Weiteren detailliert eingegangen wird (vgl. Abbildung 5-17).

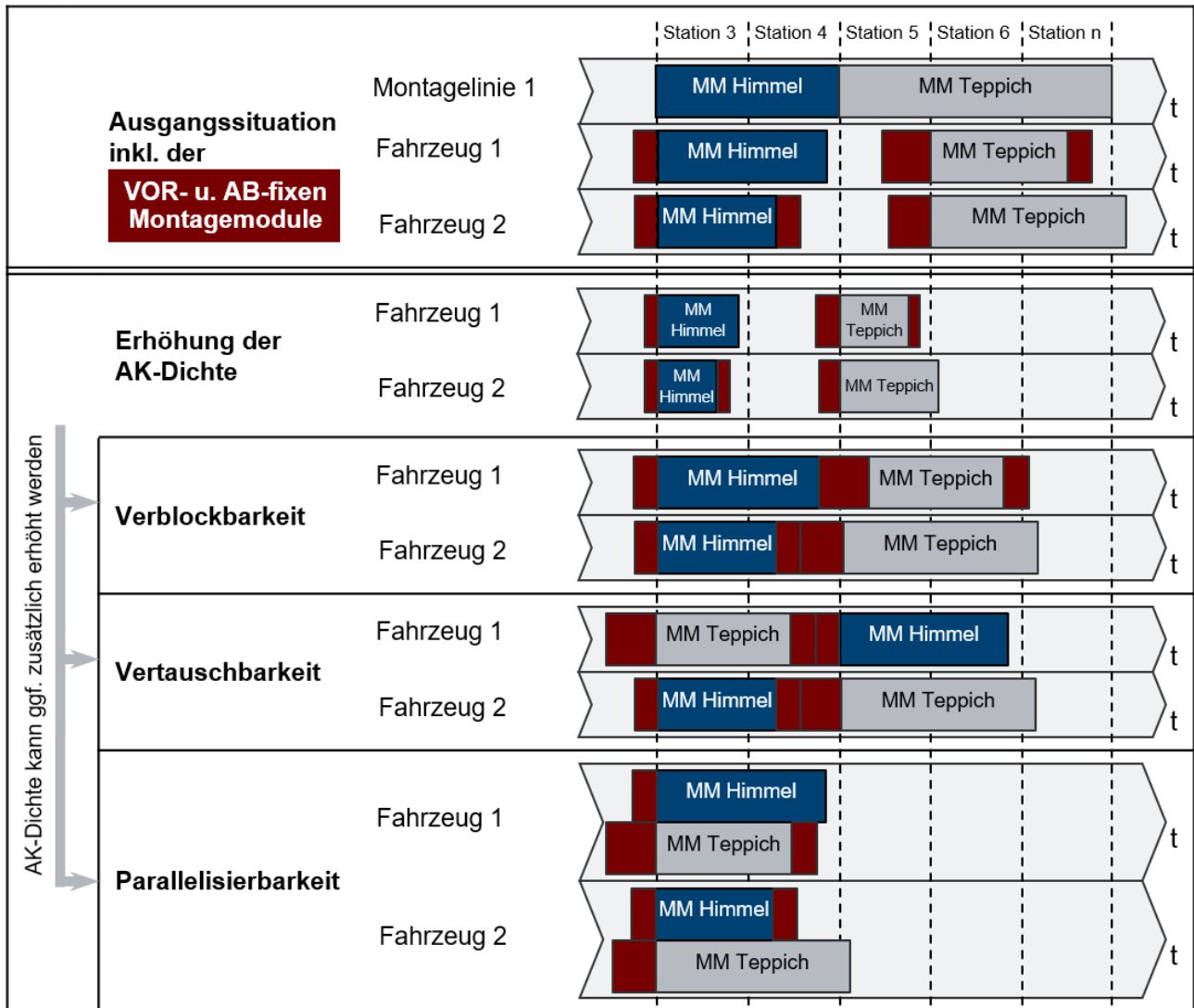


Abbildung 5-17: Stellhebel zur variantenmix-unabhängigen Reduzierung der Durchlaufzeit

Diese Stellhebel tangieren neben der Montageplanung u.a. auch die Produktionslogistik und den Betriebsmittelbau. Die Entscheidung für deren Anwendung hat daher in interdisziplinären Teams zu erfolgen. Zusätzlich sollten die Entscheidungen zusammen mit einer Kosten-Nutzen-Betrachtung getroffen werden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese Stellhebel zur variantenmix-unabhängigen Reduzierung der Durchlaufzeit auch für die flexiblen Montagemodule gelten. Die Stellhebel werden in den nächsten Unterkapiteln näher erörtert.

### 5.7.1 Erhöhung der AK-Dichte

Eine Erhöhung der AK-Dichte führt zu einer geringeren Durchlaufzeit, da in den Montagestationen, bei gleichem Takt, die Anzahl an durchzuführenden Arbeitsvorgängen aufgestockt wird (vgl. Kap. 3.2.1). Dabei werden Montagetätigkeiten innerhalb der Montagemodule parallelisiert, weshalb die Vorrangbeziehungen der Arbeitsvorgänge zwingend zu berücksichtigen sind. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass sich die Mitarbeiter in ihren Tätigkeiten nicht gegenseitig behindern. Deshalb sollte einer Fahrzeugsprache nicht mehr als ein Mitarbeiter zugeteilt werden. Bei den Laufwegen sind Überlagerungen und Überschneidungen zu verhindern. Hinzu kommt, dass durch die Erhöhung der AK-Dichte die Länge der Montagelinie reduziert wird, wodurch die Produktionslogistik weniger Fläche zur Materialbereitstellung zur Verfügung hat. Die Reduzierung der Durchlaufzeit über eine Erhöhung der AK-Dichte kann für einzelne Stationen, Montagemodule und Bandabschnitte erfolgen. Zu berücksichtigen ist, dass eine Erhöhung der AK-Dichte unabhängig von den Fahrzeugen geschieht und damit alle auf der Linie zu montierenden Fahrzeuge gleichermaßen betrifft, wodurch die Variantenmixflexibilität bestehen bleibt (vgl. Tabelle 5-11).

	Ø AK-Dichte von 1		Ø AK-Dichte von 2	
Fahrzeug 1	MM Himmel 240 Sek.	MM Teppich 160 Sek.	MM Himmel 120 Sek.	MM Teppich 80 Sek.
Fahrzeug 2	MM Himmel 160 Sek.	MM Teppich 240 Sek.	MM Himmel 80 Sek.	MM Teppich 120 Sek.
Montage- dauer	max. 240 Sek.	max. 240 Sek.	max. 120 Sek.	max. 120 Sek.
	480 Sek.		240 Sek.	

Tabelle 5-11: Beispiel zur variantenmix-unabhängigen Erhöhung der AK-Dichte

Grundsätzlich ist die AK-Dichte für jedes Montagemodul zu standardisieren, damit dieses nicht für jede Montagelinie gesondert ausgeplant werden muss.

Alternativ können für die Montagemodule unterschiedliche AK-Dichten standardisiert werden. Dadurch entsteht ein Katalog mit vordefinierten und bereits ausgeplanten Montagemodulen. Beispielsweise kann bei einer Brownfield-Planung die Auswahl eines Montagemoduls dann anhand der real vorherrschenden AK-Dichte erfolgen. Die AK-Dichte ist zusätzlich zur Verblockung, Vertauschung und Parallelisierung von Montagemodulen nutzbar.

### 5.7.2 Verblockung

Kann die fahrzeugspezifisch unterschiedliche Montagedauer zweier aufeinanderfolgender Montagemodule nicht über flexible Zeitbausteine ausgeglichen werden, ist eine variantenmix-unabhängige Reduzierung der Durchlaufzeit durch die Verblockung der Montagemodule möglich. Dazu sind die Montagemodule, inklusive der Vor- und Ab-fixen Montagemodule, zusammenzufassen (vgl. Tabelle 5-12).


	vor der Verblockung			nach der Verblockung	
Fahrzeug 1	MM Himmel 240 Sek.	MM Teppich 160 Sek.		MM Himmel und MM Teppich 240 Sek. + 160 Sek. = 400 Sek.	
Fahrzeug 2	MM Himmel 160 Sek.	MM Teppich 240 Sek.		MM Himmel und MM Teppich 160 Sek. + 240 Sek. = 400 Sek.	
Montage- dauer	max. 240 Sek.	max. 240 Sek.		400 Sek.	
	480 Sek.				

Tabelle 5-12: Beispiel zur variantenmix-unabhängigen Verblockung von Montagemodulen

Infolge der Verblockung der Montagemodule starten die Montagemodule fahrzeugspezifisch zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Deshalb muss das Material bei Montagemodulen mit Teilezuwachs an unterschiedlichen Positionen in der Montagelinie bereitgestellt werden. Zudem führen die Mitarbeiter in den Montagestationen fahrzeugabhängig unterschiedliche Montagetätigkeiten durch.

Die Lernkurveneffekte können dadurch nicht voll genutzt werden und die benötigte Einarbeitungszeit neuer Mitarbeiter verlängert sich. Zusätzlich müssen für den Montageprozess benötigte Betriebsmittel gegebenenfalls mehrfach in unterschiedlichen Montagestationen bereitgestellt werden, beispielsweise das Handlingsgerät für den Verbau des Produktmoduls „Himmel“.

### 5.7.3 Vertauschung

Unterscheidet sich die Montagedauer zwei aufeinander folgender Montagemodule zwischen den Fahrzeugen gegenläufig, können diese getauscht werden. Dazu ist vorgelagert zu überprüfen, ob die fahrzeugspezifischen Freiheitsgrade dies zulassen (vgl. Tabelle 5-13).

<b>Voruntersuchung</b>				✓	
Können die Montagemodule „Himmel“ und „Teppich“ bei Fahrzeug 1 vertauscht werden?					
	<b>vor der Vertauschung</b>		➔	<b>nach der Vertauschung</b>	
Fahrzeug 1	MM Himmel 240 Sek.	MM Teppich 160 Sek.		MM Teppich 160 Sek.	MM Himmel 240 Sek.
Fahrzeug 2	MM Himmel 160 Sek.	MM Teppich 240 Sek.		MM Himmel 160 Sek.	MM Teppich 240 Sek.
Montage- dauer	max. 240 Sek.	max. 240 Sek.		160 Sek.	240 Sek.
	480 Sek.			400 Sek.	

Tabelle 5-13: Beispiel zur variantenmix-unabhängigen Vertauschung von Montagemodulen

Wie bei der Verblockung folgt bei der fahrzeugspezifischen Vertauschung von Montagemodulen eine fahrzeugabhängige Bereitstellung des Materials an unterschiedlichen Montagestationen. Zudem müssen die Mitarbeiter in den Stationen fahrzeugabhängig unterschiedliche Tätigkeiten durchführen und die Betriebsmittel sind gegebenenfalls mehrfach anzuschaffen. Aus diesen Gründen sollte zunächst untersucht werden, ob die Zeitunterschiede nicht über flexible



Montagemodule ausgleichbar sind oder ob bevorzugt Leerstationen akzeptiert werden sollten.

#### **5.7.4 Parallelisierung**

Das Parallelisieren von Montagemodulen führt zu einer Reduzierung der Durchlaufzeit. Wird dies für alle Fahrzeuge durchgeführt, muss über die fahrzeugübergreifenden Freiheitsgrade die Vertauschbarkeit der Montagemodule sichergestellt sein (vgl. Tabelle 5-14). Montagemodule können allerdings auch für nur ein Fahrzeug parallelisiert werden. Dazu sind die fahrzeugspezifischen Freiheitsgrade zu überprüfen. Bei mehr als zwei Montagemodulen ist eine Verblockung und/oder Vertauschung der Parallelisierung vor- oder nachgelagert durchführbar. Ebenso wie bei der Erhöhung der AK-Dichte muss sichergestellt werden, dass die Mitarbeiter sich bei ihrer Arbeit nicht gegenseitig behindern. Durch die Parallelisierung von Montagemodulen addieren sich auch die Mitarbeiterzahlen, wodurch die AK-Dichte steigt. Im Gegensatz zur Erhöhung der AK-Dichte werden hierbei jedoch Montagemodule parallelisiert, wodurch die Montagedauer der Montagemodule unverändert bleibt. Durch die Parallelisierung kann die Durchlaufzeit stärker reduziert werden als durch die Verblockung und Vertauschung von Montagemodulen. Die Bereitstellung des Materials erfolgt an einer geringeren Bandlänge. Eine Voraussetzung ist daher, dass die vorhandene Fläche für die Materialbereitstellung ausreichend ist. Insbesondere müssen bei der Parallelisierung benötigte Betriebsmittel der Montagemodule gleichzeitig vorgehalten werden, was im Vorfeld auf Realisierbarkeit überprüft und anhand einer Kosten-Nutzen-Analyse bewertet werden sollte.



<b>Voruntersuchung</b>			
Können die Montagetätigkeiten der Montagemodule „Himmel“ und „Teppich“ bei den Fahrzeugen 1 und 2 parallel durchgeführt werden?			
	<b>vor der Parallelisierung</b> 		<b>nach der Parallelisierung</b>
Fahrzeug 1	MM Himmel 240 Sek.	MM Teppich 160 Sek.	MM Himmel und MM Teppich 240 Sek.
Fahrzeug 2	MM Himmel 160 Sek.	MM Teppich 240 Sek.	MM Himmel und MM Teppich 240 Sek.
Montage- dauer	max. 240 Sek.	max. 240 Sek.	240 Sek.
	480 Sek.		

Tabelle 5-14: Beispiel zur variantenmix-unabhängigen Parallelisierung von Montagemodulen

Entgegen einer vom Standard abweichenden AK-Dichte hat die Parallelisierung von Montagemodulen keine Auswirkungen auf die ausgeplanten Montageprozesse innerhalb der Montagemodule, sofern diese sich nicht gegenseitig beeinflussen. Das wäre beispielsweise bei Tätigkeiten im Motor- und Kofferraum auf gleicher Arbeitshöhe und ohne besondere Betriebsmittel gegeben.

Neben der variantenmix-unabhängigen Reduzierung der Durchlaufzeit über die Montagemodule können fahrzeugspezifisch unterschiedliche Montagezeiten innerhalb der Montagemodule harmonisiert werden. Dies gelingt allerdings nur durch das Einschränken des Variantenmix.

### 5.8 Variantenmix-abhängige Harmonisierung der Durchlaufzeit

Akzeptiert man eine eingeschränkte Variantenmixflexibilität, können fahrzeugspezifisch unterschiedliche Montagezeiten innerhalb der Montagemodule harmonisiert werden. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass der Variantenmix in diesem Kontext nicht nur das kumulierte Nachfrageverhältnis zwischen den Fahrzeugen beschreibt, sondern auch die Einsteuerung dieser

in die Montage. Ein homogener Variantenmix bedeutet dabei, dass die unterschiedlichen Fahrzeuge gleichverteilt eingesteuert werden. Ist das Nachfrageverhältnis zwischen einem Fahrzeug 1 und Fahrzeug 2 beispielsweise jeweils 50%, würde ein homogener Variantenmix bedeuten, dass auf der Montagelinie ein Fahrzeug 1 einem Fahrzeug 2 folgt und umgekehrt: 1-2-1-2-...-1-2-1-2. Um Nachfrageschwankungen begegnen zu können, sollte die Variantenmixflexibilität grundsätzlich nicht eingeschränkt werden. Dennoch können als letzter Schritt der Planungsmethode Stellhebel zur Realisierung weiterer Effizienzpotenziale genutzt werden. Zu diesen Stellhebeln zählen: die Anpassung der AK-Dichte, des Automatisierungsgrades und der Vormontageumfänge. Dies hat jeweils fahrzeugspezifisch und innerhalb der Montagemodule zu erfolgen, was Abbildung 5-18 nochmals verdeutlicht. Damit dennoch auf Veränderungen des Variantenmix reagiert werden kann, sollten sämtliche Maßnahmen dieses Planungsschritts innerhalb kurzer Zeit zurücksetzbar sein.

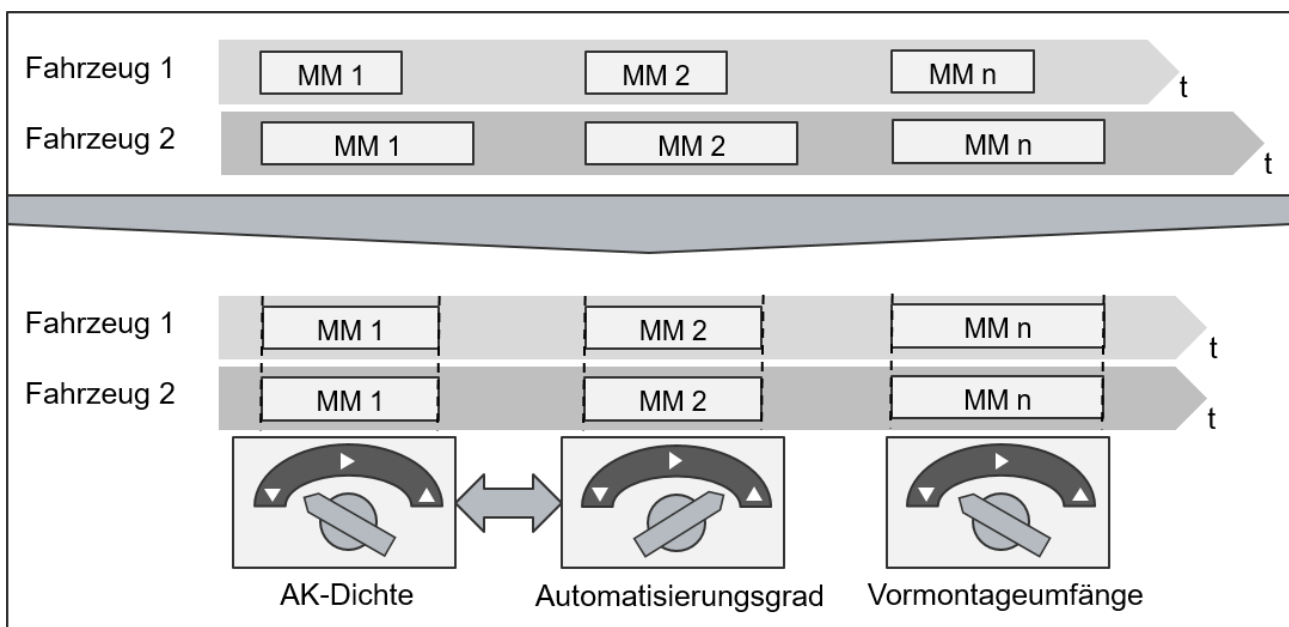


Abbildung 5-18: Stellhebel zur variantenmix-abhängigen Harmonisierung der Durchlaufzeit

Diese drei Stellhebel zur variantenmix-abhängigen Harmonisierung der Durchlaufzeit innerhalb der fahrzeugspezifischen Montagemodule werden im Weiteren konkretisiert und kritisch diskutiert.

### 5.8.1 Anpassung der AK-Dichte

Eine Angleichung fahrzeugspezifisch unterschiedlicher Montagezeiten innerhalb der Montagemodule ist über die AK-Dichte möglich. Wird diese erhöht, sinkt die Montagedauer und umgekehrt. Der Ausgleich der fahrzeugspezifisch unterschiedlichen Auslastung der Mitarbeiter erfolgt dabei über das sog. Driften. Dabei arbeitet der Mitarbeiter bei einem Fahrzeug mit längerer Montagedauer über die Stationsgrenze hinaus und holt diese Zeit bei einem Fahrzeug mit geringerer Montagedauer wieder herein. Der Variantenmix ist dazu im Vorfeld festzulegen, da eine Stückzahlverschiebung zwischen den Fahrzeugen in einer Über- bzw. Unterlast der Mitarbeiter resultiert bzw. langfristig zu einem erhöhten oder reduzierten Mitarbeiterbedarf führt. Wie durch einen festgelegten Variantenmix die AK-Dichte verringert werden kann, wird in Tabelle 5-15 exemplarisch für eine Montagestation durchgeführt. Dabei sei eine Taktdauer von 120 Sekunden angenommen.

	flexibler Variantenmix	festgelegter Variantenmix homogener Variantenmix: 1x Fahrzeug 1 und 6x Fahrzeug 2
Fahrzeug 1	MM 1 240 Sek.	MM 1 240 Sek.
Fahrzeug 2	MM 1 100 Sek.	MM 1 100 Sek.
Montagedauer	max. 240 Sek.	$(1 \times 240 \text{ Sek.} + 6 \times 100 \text{ Sek.}) / 7$ = 120 Sek.
<b>AK-Dichte</b>	240 Sek. / 120 Sek. Takt = <b>2 AK</b>	120 Sek. / 120 Sek. Takt = <b>1 AK</b>

Tabelle 5-15: Beispiel für die variantenmix-abhängige Anpassung der AK-Dichte

Die AK-Dichte konnte zwar reduziert werden, das Montagemodul ist allerdings nicht mehr für die fahrzeugspezifisch maximal benötigte Montagedauer ausgelegt. Fahrzeugspezifisch unterschiedliche Montagezeiten werden über das Driften ausgeglichen. Daher muss der Variantenmix festgelegt sein und darf sich nicht verändern.

### 5.8.2 Anpassung des Automatisierungsgrades

Der Automatisierungsgrad kann ebenfalls zur Harmonisierung fahrzeugspezifisch unterschiedlicher Montagezeiten innerhalb der Montagemodule genutzt werden. Dazu wird dieser für einzelne Fahrzeuge angehoben bzw. gesenkt. Durch die Anpassung des Automatisierungsgrades muss der Variantenmix als Rahmenbedingung definiert sein. In Tabelle 5-16 soll dies anhand eines Beispiels verdeutlicht werden. Wie bei der Anpassung der AK-Dichte sei auch hierbei eine Taktdauer von 120 Sek. angenommen. Ursprünglich manuell durchgeführte Montageprozesse werden für Fahrzeug 1 automatisiert. Die fahrzeugspezifisch unterschiedlichen Montagezeiten der automatisierten Prozesse werden über das Driften ausgeglichen.

		festgelegter Variantenmix homogener Variantenmix: 1x Fahrzeug 1 und 1x Fahrzeug 2	
		ursprünglicher Automatisierungsgrad	erhöhter Automatisierungsgrad
Fahrzeug 1	automatisiert manuell	110 Sek. (AVOs: 1, 2, 3) 160 Sek. (AVOs: 4, 5, 6, 7)	130 Sek. (AVOs: 1, 2, 3, 7) 120 Sek. (AVOs: 4, 5, 6)
Fahrzeug 2	automatisiert manuell	110 Sek. (AVOs: 1, 2, 3) 120 Sek. (AVOs: 4, 5, 6)	110 Sek. (AVOs: 1, 2, 3) 120 Sek. (AVOs: 4, 5, 6)
Montagedauer		$(1 \times (110 \text{ Sek.} + 160 \text{ Sek.}) + 1 \times (110 \text{ Sek.} + 120 \text{ Sek.})) / 2 = 250 \text{ Sek.}$	$(1 \times (130 \text{ Sek.} + 120 \text{ Sek.}) + 1 \times (110 \text{ Sek.} + 120 \text{ Sek.})) / 2 = 240 \text{ Sek.}$

Tabelle 5-16: Beispiel zur variantenmix-abhängigen Anpassung des Automatisierungsgrades

Die Anpassung des Automatisierungsgrades geht häufig mit zusätzlichen Investitionen einher. Diese amortisieren sich nur, wenn das Fahrzeug, für das der Automatisierungsgrad angepasst wurde, in ausreichender Zahl nachgefragt wird. Daher sollte im Vorfeld eine szenarienbasierte Kosten-Nutzen-Betrachtung erfolgen.

### **5.8.3 Anpassung der Vormontageumfänge**

Durch die Modularisierung der Fahrzeuge wurden die Tätigkeiten in die Vormontage verlagert, die nicht zwingenderweise in der Hauptlinie durchzuführen sind (vgl. Kap. 5.2.1). So können für das Fahrzeug mit geringerer Montagedauer die Kann-Produktumfänge aus der Vor- in die Hauptmontage verlagert werden. Dies erfolgt über eine sog. Mini-Vormontage. Dabei montiert der Mitarbeiter der Hauptlinie immer dann Umfänge vor, wenn die fahrzeugspezifische Montagezeit in einer Station geringer als die Taktzeit ist. Um die Laufwege möglichst gering zu halten, ist eine derartige Mini-Vormontage im Materialstreifen neben der Hauptmontagelinie zu positionieren. Der Variantenmix kann abhängig von der Lagergröße für die vormontierten Umfänge schwanken. Die kumulierten Stückzahlen der jeweiligen Fahrzeuge sind jedoch zu definieren. Ein veränderter Variantenmix führt zu einer Über- bzw. Unterlast der Mitarbeiter. Abhängig davon, welche Umfänge aus der Vormontage in die Mini-Vormontage geschoben werden, wirkt sich dies auf die Mitarbeiter der Vor- oder der Hauptmontage aus (vgl. Tabelle 5-17).

festgelegter Variantenmix		
homogener Variantenmix: 1x Fahrzeug 1 und 1x Fahrzeug 2		
	Vormontage	Hauptmontage
Fahrzeug 1	Frontschürze 60 Sek. Scheinwerfer 30 Sek. Kühlergrill 60 Sek. <b>Ziel: x Sek.</b>	MM Frontmodul 240 Sek. <b>Ziel: y Sek.</b>
Fahrzeug 2	Frontschürze 60 Sek. Scheinwerfer 30 Sek. Kühlergrill 60 Sek. <b>Ziel: x Sek.</b>	MM Frontmodul 180 Sek. <b>Ziel: y Sek.</b>
Nachfrage Fahrzeug 1 > Nachfrage Fahrzeug 2		
Möglichkeit 1	konstante Auslastung	Überlast
Möglichkeit 2	Überlast	konstante Auslastung
Nachfrage Fahrzeug 1 < Nachfrage Fahrzeug 2		
Möglichkeit 1	konstante Auslastung	Unterlast
Möglichkeit 2	Unterlast	konstante Auslastung

Tabelle 5-17: Beispiel für die variantenmix-abhängige Anpassung der Vormontageumfänge

Nachdem die einzelnen Bausteine der Planungsmethode detailliert beschrieben wurden, wird folgend die IT-technische Integration und Umsetzung der entwickelten Planungsmethode erörtert.

### 5.9 Integration der entwickelten Planungsmethode in die IT-Struktur

Weitere Verbesserungspotenziale der entwickelten Planungsmethode würden sich aus der durchgängigen Nutzung von Daten aus der Fahrzeugentwicklung und der Montageplanung ergeben. Beispielsweise ist die Montageplanung für die Befüllung der montagespezifischen Adjazenzmatrix zuständig. Darüber hinaus werden den Montagemodulen die Arbeitsvorgänge und damit auch die

Montagezeiten, die Betriebsmittel sowie die Montage- und Logistikkriterien hinterlegt. Die Fahrzeugentwicklung bestimmt die fahrzeugspezifischen Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Montagemodulen und ordnet diesen die Fahrzeugmodule zu. Ein Auszug der elementaren Daten und deren Ineinandergreifen findet sich in Abbildung 5-19.

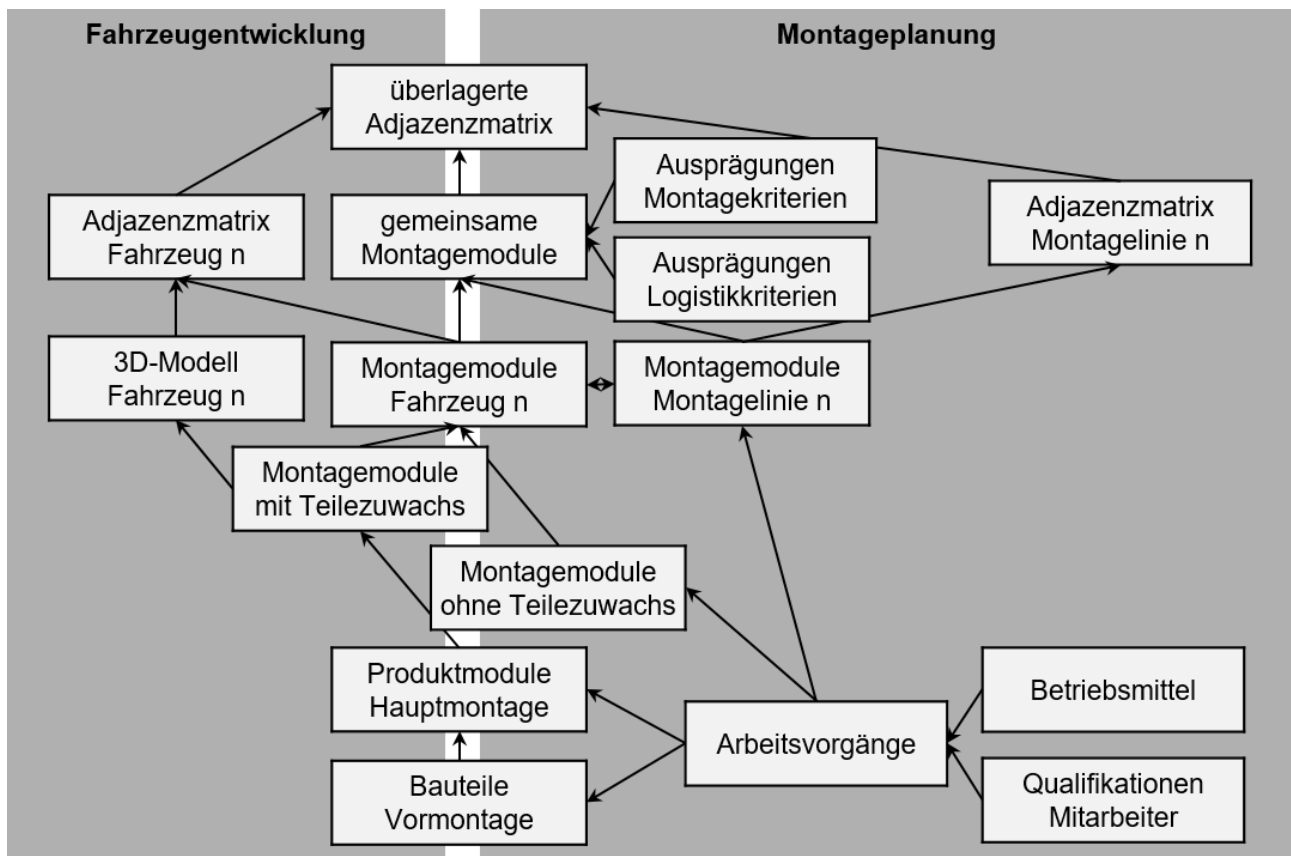


Abbildung 5-19: Verknüpfungen der Daten zwischen der Fahrzeugentwicklung und der Montageplanung

Eine durchgängige Datenstrukturierung anhand der Montagemodule unterstützt dabei das Simultaneous Engineering. Wie in Abbildung 5-20 exemplarisch für das Montagemodul „Sitze“ dargestellt, werden dem Nutzer modulspezifische sowie montagelinien- und fahrzeugspezifische Informationen angezeigt. Zu den modulspezifischen Daten zählen die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zu anderen Montagemodulen, die aus der überlagerten Adjazenzmatrix auslesbar sind. Des Weiteren sind die Ausprägungen der Montage- und

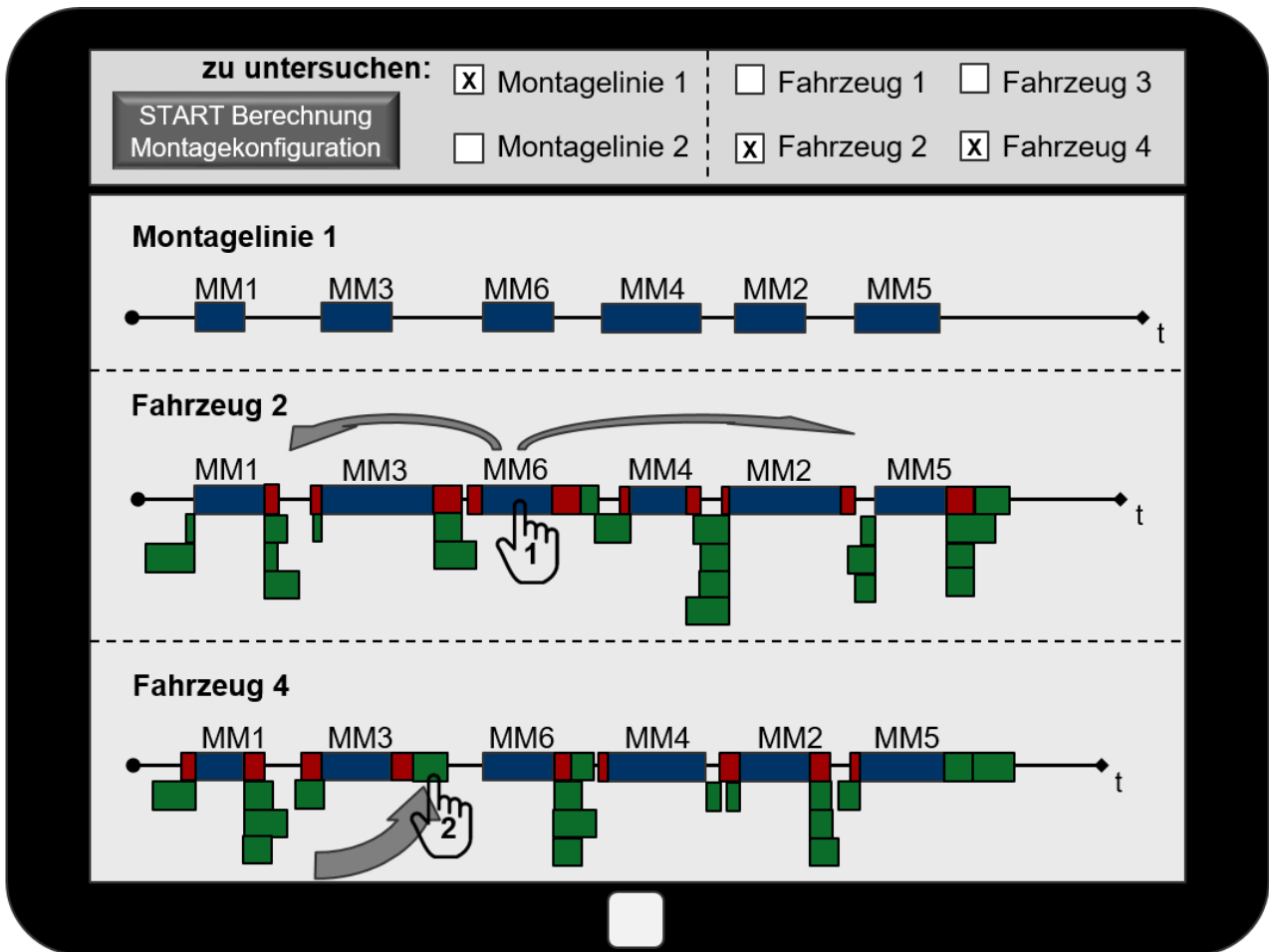


Logistikkriterien hinterlegt. Vorstellbar ist auch, dass den Montagemodulen die technischen Standards sowie die standortabhängigen Best-Practise-Lösungen hinterlegt werden. Zu den montagelinien- und fahrzeugspezifischen Daten zählen die jeweiligen Adjazenzmatrizen sowie die installierten bzw. benötigten Betriebsmittel. Die variantenmix-unabhängige Reduzierung der Durchlaufzeit durch die Erhöhung der AK-Dichte erfolgt für alle Fahrzeuge und Montagelinien übergreifend. Die variantenmix-abhängige Harmonisierung der Durchlaufzeit ist innerhalb der montagelinien- und fahrzeugspezifischen Montagemodule vorzunehmen (vgl. Kapitel 5.8).

Montagemodul Sitze		Montagemodul Himmel		Montagemodul Teppich		
variantenmix-unabhängige Reduzierung der DLZ		variantenmix-abhängige Harmonisierung der DLZ				
AK-Dichte		AK-Dichte	Automatisierungsgrad	Vormontage-Umfänge		
modulspezifisch	Vorgänger	(überlagerte Adjazenzmatrix)		..., Montagemodul n		
	Nachfolger			..., Montagemodul n		
	Montagekriterien	Kriterium_1_Ausprägung_3, Kriterium_n_Ausprägung_n				
	Logistikkriterien	Kriterium_1_Ausprägung_3, Kriterium_n_Ausprägung_n				
fahrzeugspezifisch und montagelinien-spezifisch	Beispiel Montagelinie 1	Vorgänger	(montagespezifische Adjazenzmatrix)		..., Montagemodul n	
		Nachfolger			..., Montagemodul n	
		Montagedauer Montagelinie 1 (AK-Dichte = x)	Stationsanzahl x AK-Dichte x Taktzeit			
		installierte Betriebsmittel Montagelinie 1	..., Betriebsmittel n			
	Beispiel Fahrzeug 2	Vorgänger	(fahrzeugspezifische Adjazenzmatrix)		..., Montagemodul n	
		Nachfolger			..., Montagemodul n	
		Produktmodule Fahrzeug 2	..., Produktmodul n			
		Montagedauer Fahrzeug 2 (AK-Dichte = x)	(... + AVO n) / AK-Dichte			
		benötigte Betriebsmittel Fahrzeug 2	..., Betriebsmittel n			
		Montagemodule VOR-fix	..., Montagemodul n			
		Montagemodule AB-fix	..., Montagemodul n			
		Montagemodule VOR-flexibel	..., Montagemodul n			
		Montagemodule AB-flexibel	..., Montagemodul n			

Abbildung 5-20: Beispiel für die Darstellung der Daten eines Montagemoduls

Liegen die Daten für alle Montagelinien und Fahrzeuge vor, kann deren gemeinsame Montierbarkeit auf neu zu planenden bzw. bestehenden Montagelinien kurzfristig überprüft und eine Grobplanung durchgeführt werden. Die prototypische Darstellung einer IT-basierten Grobbandbelegung anhand einer visualisierten Montagekonfiguration findet sich in Abbildung 5-21.



Verschiebung der strategischen Montagemodule (inkl. der VOR- u. AB-fixen Montagemodule), basierend auf den montage- bzw. fahrzeugspezifischen Freiheitsgraden (*Verblockung, Vertauschung, Parallelisierung*)

strategische Montagemodule



Zuteilung der flexiblen Montagemodule zwischen den strategischen Montagemodulen

VOR- u. AB-fixe Montagemodule

VOR- u. AB-flexible Montagemodule

Abbildung 5-21: Prototyp einer IT-basierten Grobbandbelegung anhand einer visualisierten Montagekonfiguration

Beispielsweise kann untersucht werden, auf welcher Montagelinie im Produktionsnetzwerk sich ein neues, batterieelektrisches Fahrzeug integrieren lässt. Dazu wird die fahrzeugspezifische Matrix nacheinander mit den linienspezifischen Matrizen überlagert. Die jeweils geeignete Montagekonfiguration kann im Anschluss visualisiert und ausgeplant werden. Bei der Verschiebung von Montagemodulen zur variantenmix-unabhängigen Reduzierung der Durchlaufzeit ist das Aufzeigen möglicher zulässiger Positionen auf der Montagelinie realisierbar. Dazu wird auf die fahrzeug- und montagespezifischen Freiheitsgrade zurückgegriffen. Auch die Vor- und Ab-flexiblen Montagemodule können dadurch in interdisziplinären Teams auf der Montagelinie positioniert werden.

Die entwickelte Planungsmethode ist für ein real existentes Planungsszenario heranzuziehen, um damit die Anwendbarkeit in der Praxis zu überprüfen. Dazu erfolgt im nächsten Kapitel die Validierung der Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage.

---

## **6 Validierung – Konfiguration modularer, fahrzeugflexibler Montagelinien in der Automobilindustrie**

Die Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen wurde bei einem Automobilhersteller angewandt. Dabei standen Realdaten für die Verifizierung der Planungsbausteine zur Verfügung. Die Planung erfolgte für eine Montagelinie im Green- und Brownfield. Für die Greenfield-Planung sollte eine Montagekonfiguration ermittelt werden, die eine gemeinsame Montage von zwei unterschiedlichen Fahrzeugarchitekturen auf einer Linie ermöglicht. Zusätzlich war für eine bestehende Montagelinie im Brownfield die Integrationsfähigkeit einer weiteren Fahrzeugarchitektur zu prüfen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Reflexion der Planungsergebnisse.

### **6.1 Erprobung der entwickelten Planungsmethode**

Für die Anwendung der Planungsmethode lagen die AVO-Zeiten in Listenform für ein repräsentatives Derivat der jeweiligen Fahrzeugarchitektur vor. Für die Planung im Greenfield wurde untersucht, ob eine front- und heckangetriebene Fahrzeugarchitektur gemeinsam auf einer Linie montierbar sind. Im Brownfield wurde die Integrationsfähigkeit einer zusätzlichen Fahrzeugarchitektur auf einer bestehenden Montagelinie untersucht bzw. welche Anpassungen dafür vorzunehmen wären. Hierfür lagen neben den AVO-Listen zusätzlich eine Bandbelegung der bestehenden Montagelinie sowie die jeweiligen Fahrzeuge als digitales 3D-Modell vor. Tabelle 6-1 gibt einen Überblick zu den vorhandenen Daten der Planungsfälle.

	<b>Greenfield</b>	<b>Brownfield</b>
<b>Fragestellung</b>	Können zwei unterschiedliche Fahrzeugarchitekturen, entgegen heutiger Praxis, gemeinsam auf einer Linie endmontiert werden?	Kann auf einer bestehenden Endmontagelinie, entgegen heutiger Praxis, eine zusätzliche Fahrzeugarchitektur integriert werden?
<b>betroffene Fahrzeugarchitekturen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• heckangetriebene Fahrzeugarchitektur</li> <li>• frontangetriebene Fahrzeugarchitektur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• heckangetriebene Fahrzeugarchitektur (aktuell)</li> <li>• Hocharchitektur für Geländefahrzeuge (zu integrieren)</li> </ul>
<b>vorliegende Daten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AVO-Zeiten (geringe Ausstattung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AVO-Zeiten (durchschnittliche Ausstattung)</li> <li>• digitale 3D-Fahrzeugmodelle</li> <li>• Bandbelegung der bestehenden Montagelinie</li> </ul>

Tabelle 6-1: Überblick der Realdaten für die Validierung

Die Erprobung der konzipierten Methode erfolgte anhand der acht Planungsbausteine. Die übergeordnete Struktur gab dabei die Gliederung vor (vgl. Abbildung 6-1): Festlegung der Planungsprämissen, Modularisierung der Montageprozesse, produktflexible Montagekonfigurationen und zeitliche Positionierung.

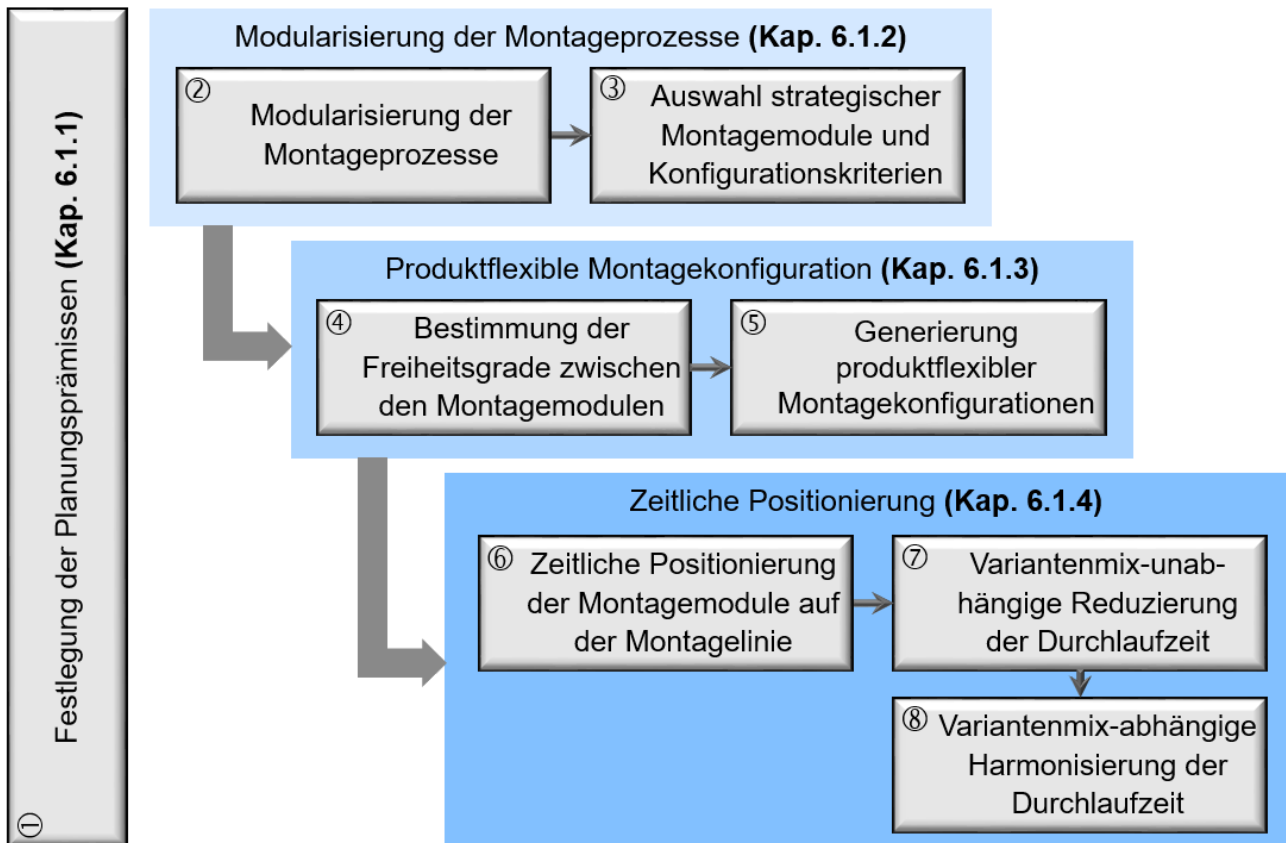


Abbildung 6-1: Bausteine zur Planung modularer, produktflexibler Montagelinien

Die Festlegung der Planungsprämissen, die Modularisierung der Montageprozesse und die Konfiguration produktflexibler Montagelinien wurden für beide Planungsfälle durchgeführt. Die zeitliche Positionierung erfolgte primär für die Greenfield-Planung.

### 6.1.1 Festlegung der Planungsprämissen

Zu Beginn der Planung erfolgte die **Festlegung der Planungsprämissen (vgl. Kap. 5.1)**. Dabei wurde sichergestellt, dass die technischen Standards und die Fahrzeugstandards die gemeinsame Montage der jeweils unterschiedlichen Fahrzeugarchitekturen zulassen bzw. die dafür notwendigen Anpassungen möglich sind (vgl. Tabelle 6-2).

	<b>Greenfield</b>	<b>Brownfield</b>
<b>Betriebsnutzungszeit</b>	nicht festgelegt	unverändert
<b>Montagetakt</b>	120 Sek.	unverändert
<b>durchschnittliche AK-Dichte</b>	1	2
<b>technische Standards</b>	✓	✓
<b>Fahrzeugstandards</b>	✓	✓

Tabelle 6-2: Planungsprämissen für die Validierung

Nach dem Festlegen der Planungsprämissen, wurden die Montageprozesse modularisiert.

### 6.1.2 Modularisierung der Montageprozesse

Die **Modularisierung der Montageprozesse (vgl. Kap. 5.2)** geschah in Zusammenarbeit mit der Montageplanung. Für die Brownfield-Planung standen Fahrzeuge der heckgetriebenen und Hocharchitektur als digitales 3D-Modell zur Verfügung. Den zuvor bestimmten Montagemodulen mit Teilezuwachs wurden die zu montierenden Baugruppen und Einzelteile zugeordnet. Verbrennungsmotorische und zukünftige, batterieelektrische Antriebe stellen unterschiedliche Anforderungen an das Montagemodul „Hochzeit“. Deshalb wurde dieses strategische Montagemodul für die Greenfield-Planung in folgende, voneinander entkoppelte Montagemodule getrennt: „Hinterachse“, „aufgerüstete Vorderachse“ und „Abgasanlage“. Für die Brownfield-Planung wurde die Option nicht genutzt, da das Auflösen der bestehenden, hochautomatisierten Hochzeitstationen negiert wurde. Eine derartige Setzung bestand für mehrere Umfänge. Daher unterscheiden sich die Montagemodule zwischen den Planungsfällen, wie Tabelle 6-3 verdeutlicht.

Die **Auswahl strategischer Montagemodule und Konfigurationskriterien (vgl. Kap. 5.3)** sollten grundsätzlich an den vorangegangenen Planungsschritt

anknüpfen. Allerdings zeigte sich, dass aufgrund des vorliegenden Erfahrungswissens in den Planungsbereichen bereits während der Modularisierung der Montageprozesse die strategischen Montagemodule bestimmt werden können. Einen Überblick über die strategischen Montagemodule der Green- und Brownfield-Planung gibt folgende Tabelle 6-3.

Montagemodule		Montagemodule	
Greenfield	Brownfield	Greenfield	Brownfield
Fahrzeugidentifikationsnummer			Kühleinheit
Türendemontage (Abschlagen)			Klimaleitungen
Cockpit u. Rückwand u. Kabelsatz Innenraum	Cockpit	Klimaleitungen	Klimaleitungen vor Hochzeit
Motorraumleitungssatz	Kabelsatz (Motor u. Innenraum)		Klimaleitungen nach Hochzeit
Mittelkonsole			Bremsleitungen vor Hochzeit
DVD Matten		Bremsleitungen	Bremsleitungen nach Hochzeit
Dachsysteme			Radkastenverkleidung
Himmel		Räder	
Bremskraftverstärker		Unterboden/CW-Teile	
Hydraulik- und ESP-Einheit		Befüllung	
Pedaleinheit		Betankung	
Teppich		Kantenschutz	
Sicherheitsgurte		Türenremontage (Anschlagen)	
Sitze vorn	Sitze	Stoßdämpfer u. Federn hinten	
Fondlehne		Federbein (Stoßdämpfer mit Federung) vorn	
Scheiben (Front/Heck/Seite)		Achse hinten	Hochzeit
Seitenverkleidungen (A-, B-, C-Säule)		Achsmodul vorn (inkl. Motor u. Getriebe u. Kühler)	
12V/48V Batterien	-	Abgasanlage	
Stoßfänger hinten			
Frontmodul			
Tankeinbau			
Kraftstoffleitungen			

Greenfield: heckangetriebene und frontangetriebene Fahrzeugarchitektur

Brownfield: heckangetriebene Fahrzeugarchitektur und Hocharchitektur

Tabelle 6-3: Strategische Montagemodule der Green- und Brownfield-Planung



Die Ausprägungen der Montage- und Logistikkriterien wurden für diese 36 Montagemodule an die derzeitige Ist-Situation angelehnt. So wurden in der Montage als Fördertechnik beispielsweise das C-Gehänge, Schubplattformen und Plattenförderer eingesetzt. Die Montageplanung forderte zunächst ein zusätzliches Montagekriterium ein, das für Simulationsdurchläufe eine zwangsweise Kopplung zwischen zwei Montagemodulen zulässt. Im Verlauf des Planungsprozesses wurde dieses jedoch nicht genutzt. Anhand einer Expertenbefragung wurden die Gewichtungen für die Montage- und Logistikkriterien festgelegt. Die Kriterien, deren Gewichtung und die auswählbaren Ausprägungen gehen aus Tabelle 6-4 hervor.

	Kriterien	Auswahlmöglichkeiten
Montagekriterien (80%)	Karosserieposition (30%)	Unterboden, ebenerdig, mittig, oben
	Fördertechnik (30%)	unabhängig, C-Gehänge, Schubplattform, Plattenförderer
	Bestromung (20%)	ja, nein
	Vormontagen (5%)	ja, nein
	Sicherheits- und Grubenrelevanz (10%)	weder noch, sicherheitsrelevant, Grube
	Zwangskopplung (5%)	Montagemodul 1, ..., Montagemodul 36
Logistikkriterien (20%)	Hauptumfänge (80%)	keine Logistik, I-Park, Route, Warenkorb, FTS
	Nebenumfänge (20%)	keine Logistik, I-Park, Route, Warenkorb, FTS

Tabelle 6-4: Montage- und Logistikkriterien

Für jedes der 36 Montagemodule wurden die Kriterien-Ausprägungen festgelegt. Im Montagemodul „Befüllung“ ist das Fahrzeug beispielsweise ebenerdig. Es befindet sich auf einem Plattenförderer und benötigt einen externen Stromanschluss. Ein Auszug einzelner Montagemodule und deren Kriterien-Ausprägungen findet sich in Tabelle 6-5.

Montage- und Logistikkriterien	Montagemodule (Beispiel Greenfield)				
	Dachsysteme	Himmel	Frontmodul	Tankeinbau	Befüllung
Karosserieposition	ebenerdig	ebenerdig	oben	Unterboden	ebenerdig
Fördertechnik	Schubplattform	Schubplattform	C-Gehänge	C-Gehänge	Plattenförderer
Bestromung	nein	nein	nein	nein	ja
Vormontagen	nein	ja	nein	nein	nein
Sicherheits- und Grubenrelevanz	weder noch	weder noch	weder noch	weder noch	Grube
Zwangskopplung	-	-	-	-	-
Hauptumfänge	I-Park	Route	I-Park	Warenkorb	keine Logistik
Nebenumfänge	Route	Route	Route	Route	keine Logistik

Tabelle 6-5: Kriterien-Ausprägungen einzelner Montagemodule (Auszug)

Nach der Auswahl der strategischen Montagemodule sowie dem Hinterlegen der Kriterien-Ausprägungen erfolgte die Generierung der fahrzeugflexiblen Montagekonfigurationen.

### 6.1.3 Produktflexible Montagekonfigurationen

Für die Konfiguration fahrzeugflexibler Montagelinien war zunächst für alle betrachteten Fahrzeugarchitekturen und für die bestehende Montagelinie die **Bestimmung der Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen (vgl. Kap.5.4)** notwendig. Dazu wurden in Workshops die Matrizen der Fahrzeuge sowie der Montagelinie durch die Planungsexperten befüllt. Dies stellte gleichzeitig die Speicherung des Wissens der Planungsexperten dar. Darüber hinaus wurden die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen anhand der vorliegenden 3D-Fahrzeugmodelle ermittelt. Dabei erfolgte die digitale Demontage und Montage

der zuvor definierten Produktmodule, denen die Baugruppen und Einzelteile zugeordnet waren. Abschließend wurden die Matrizen der betrachteten Fahrzeugarchitekturen sowie die der Montagelinie überlagert. Tabelle 6-6 zeigt die überlagerte Matrix der Brownfield-Planung für die heckgetriebene Architektur, die Hocharchitektur und die Montagelinie mit Freiheitsgraden.

	Fzg.ident.nummer	Türendemontage	Cockpit	Kabelsatz	Mittelkonsole	DVD Matten	Dachsysteme	Himmel	Bremskraftverstärker	Hydraulik- u. ESP-Ein.	Pedaleinheit	Teppich	Sicherheitsgurte	Sitze	Scheiben	Seitenverkleidungen	Stoßfänger hinten	Frontmodul	Tankeinbau	Kraftstoffleitung	Kühleinheit	Klimaleitung	Klimaleitung vor H.	Klimaleitung nach H.	Bremsleitung vor H.	Bremsleitung nach H.	Radkastenverkleidung	Räder	Unterboden u. CW-T.	Befüllung	Betankung	Kantenschutz	Türenremontage	Stoßdämpfer hinten	Federbein	Hochzeit		
Fzg.ident.nummer	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Türendemontage	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cockpit	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kabelsatz	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mittelkonsole	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
DVD Matten	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dachsysteme	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Himmel	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bremskraftverstärker	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hydraulik- u. ESP-Einheit	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pedaleinheit	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Teppich	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Sicherheitsgurte	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sitze	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Scheiben	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Seitenverkleidungen	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Stoßfänger hinten	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Frontmodul	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Tankeinbau	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Kraftstoffleitung	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Kühleinheit	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Klimaleitung	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Klimaleitung vor Hochzeit	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Klimaleitung nach Hochzeit	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Bremsleitung vor Hochzeit	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Bremsleitung nach Hochzeit	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Radkastenverkleidung	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Räder	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
Unterboden u. CW-Teile	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Befüllung	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Betankung	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Kantenschutz	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Türenremontage	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stoßdämpfer hinten	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Federbein	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hochzeit	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Tabelle 6-6: Überlagerte Matrix zweier Fahrzeugarchitekturen und einer Montagelinie für die Brownfield-Planung

Die Felder repräsentieren die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Montagemodulen. So bedeutet ein rotes Feld mit einer „0“, dass das Montagemodul auf der y-Achse nicht dem Montagemodul auf der x-Achse vorgelagert sein darf. Andernfalls ist eine „1“ eingetragen und das Feld ist grün. Ein Montagemodul kann sich selbst nicht als Vorgänger und Nachfolger haben, weshalb die Diagonale nicht befüllt wurde. Die Montagemodule „Fahrzeugidentifikationsnummer“, „Türendemontage“ und „Klimaleitung“ haben beispielsweise keine zwangsweisen Vorgänger und wurden aus diesem Grund als mögliche Startknoten ausgewählt.

Diese überlagerte Matrix bildete die Datengrundlage für die **Generierung produktflexibler Montagekonfigurationen (vgl. Kap. 5.5)**. Dazu wurde ein in Microsoft Excel erstelltes Konfigurations-Tool herangezogen. Dieses basiert auf dem in Kapitel 5.5 beschriebenen Algorithmus. Kann eine Montagekonfiguration aufgebaut werden, dann ist die Hocharchitektur integrierbar. Ist die Generierung einer Montagekonfiguration nicht möglich, dann liegt dies an Zyklen. Das bedeutet, dass zwischen Montagemodulen gleichzeitig eine Vorgänger- und Nachfolger-Restriktion besteht. Bei der Hocharchitektur musste beispielsweise der „Teppich“ vor der „Mittelkonsole“ montierbar sein. Im Gegensatz dazu war es bei der heckangetriebenen Fahrzeugarchitektur umgekehrt. Durch die Überlagerung der Matrizen war der „Teppich“ gleichzeitig ein zwangsweiser Vorgänger und Nachfolger der „Mittelkonsole“. Damit die Integration möglich ist, müssen derartige Zyklen aufgelöst werden. Dazu ist eine Montagereihenfolge zu bestimmen. Im diesem Fall wurde festgelegt, dass fahrzeugübergreifend die „Mittelkonsole“ vor dem „Teppich“ verbaut wird (vgl. Tabelle 6-7). Darüber hinaus erlaubten Freiheitsgrade in der Montagelinie die Neupositionierung einzelner Montagemodule. Bei der Montagelinie ohne Freiheitsgrade war

folglich nur eine Lösung möglich, die zum Zeitpunkt der Planung bestehende Montagekonfiguration.

Die Integrationsuntersuchung ergab, dass die Hocharchitektur in die bestehende Montagekonfiguration integrierbar ist. Allerdings wären dazu konstruktive Anpassungen bei der Hocharchitektur vorzunehmen, um die Zyklen zu eliminieren (vgl. Tabelle 6-7). Alternativ könnte auch die heckangetriebene Fahrzeugarchitektur konstruktiv verändert werden. Da diese bereits auf der Linie montiert wird, würde dies zusätzlich Anpassungen der Montagelinie nach sich ziehen. Das Ergebnis zeigt, dass die notwendigen Fahrzeuganpassungen bei der Hocharchitektur reduziert werden können, indem Freiheitsgrade in der Montagelinie, und damit Anpassungen der aktuellen Montagekonfiguration, zugelassen werden.

<b>konstruktive Anpassungen bei der Hocharchitektur zur Schaffung zusätzlicher Freiheitsgrade</b>			
<b>Montagelinie ohne Freiheitsgrade</b>		<b>Montagelinie mit Freiheitsgrade</b>	
Pedaleinheit	→ Teppich	Pedaleinheit	→ Teppich
Sicherheitsgurte	→ Teppich		
Mittelkonsole	→ Teppich	Mittelkonsole	→ Teppich
Stoßfänger hinten	→ Radhausverkleidung		
Frontmodul	→ Kühleinheit	Frontmodul	→ Kühleinheit

Tabelle 6-7: Konstruktive Fahrzeuganpassungen zur Erzielung der Integrationsfähigkeit

In Tabelle 6-8 sind die Ergebnisse für drei Planungsszenarien dargestellt. Die Konfiguration der fahrzeugflexiblen Montagelinien wurde für die Greenfield-Planung sowie für die Brownfield-Planung mit und ohne Berücksichtigung der Freiheitsgrade in der Montagelinie durchgeführt. Eine exakte Lösung stellt da-

bei die Konfiguration für die Brownfield-Montage dar, wenn keine Anpassungen des bestehenden Montageablaufs zugelassen werden. Die Lösungen sind Montagekonfigurationen, die anhand der Kriterien am höchsten bewertet wurden. Die gering bewerteten Montagekonfigurationen wurden bereits während der Generierung der Montagekonfigurationen herausgefiltert und nicht weiter aufgebaut.

<b>Auszug alternativer Montagekonfiguration</b> (Ergebnis aus dem Konfigurations-Tool)			
<b>Greenfield</b>		<b>Brownfield</b>	
lineare Anordnung der Montagemodule	1 von 2304 Lösungen bei 6 Filterungen	Montagelinie ohne Freiheitsgrade  1 Lösung bei 0 Filterungen	Montagelinie mit Freiheitsgraden  1 von 128 Lösungen bei 3 Filterungen
1	Motorraumleitungssatz	Türendemontage	Türendemontage
2	Fahrzeugidentifikationsnummer	Fahrzeugidentifikationsnummer	Fahrzeugidentifikationsnummer
3	Türendemontage	Dachsysteme	Dachsysteme
4	Cockpit u. Rückwand u. Kabelsatz	DVD Matten	DVD Matten
5	Dachsystem	Kabelsatz (Motor- u. Innenraum)	Kabelsatz (Motor- u. Innenraum)
6	Teppich	Hydraulik- u. ESP-Einheit	Pedaleinheit
7	Mittelkonsole	Pedaleinheit	Himmel
8	DVD Matten	Bremskraftverstärker	Cockpit
9	Himmel	Sicherheitsgurte	Scheiben (Front/Heck/Seite)
10	Hydraulik- u. ESP-Einheit	Himmel	Klimaleitung
11	Bremsleitungen	Cockpit	Federbein vorn
12	Tankeinbau	Kantenschutz	Mittelkonsole
13	Kraftstoffleitung	Scheiben (Front/Heck/Seite)	Hydraulik- u. ESP-Einheit
14	Stoßdämpfer u. Federn hinten	Klimaleitung	Bremskraftverstärker
15	Federbein vorn	Federbein vorn	Teppich
16	Klimaleitungen	Mittelkonsole	Tankeinbau
17	12V/48V Batterie	Teppich	Kraftstoffleitung

18	Sicherheitsgurte	Seitenverkleidung	Klimaleitung vor Hochzeit
19	Pedaleinheit	Bremsleitung vor Hochzeit	Sicherheitsgurte
20	Seitenverkleidungen	Kraftstoffleitung	Kantenschutz
21	Scheiben (Front/Heck/Seite)	Tankeinbau	Seitenverkleidungen
22	Bremskraftverstärker	Klimaleitung vor Hochzeit	Stoßdämpfer hinten
23	Sitze	Stoßdämpfer hinten	Bremsleitung vor Hochzeit
24	Fondlehne	Hochzeit	Hochzeit
25	Kantenschutz	Bremsleitung nach Hochzeit	Bremsleitung nach Hochzeit
26	Achse hinten	Klimaleitung nach Hochzeit	Klimaleitung nach Hochzeit
27	Achsmodul vorn	Sitze	Unterboden u. CW-Teile
28	Stoßfänger hinten	Stoßfänger hinten	Sitze
29	Frontmodul	Frontmodul	Frontmodul
30	Abgasanlage	Klimaleitung	Klimaeinheit
31	Unterboden u. CW-Teile	Befüllung	Befüllung
32	Radkastenverkleidung	Betankung	Betankung
33	Räder	Unterboden u. CW-Teile	Radkastenverkleidung
34	Türenremontage	Radkastenverkleidung	Räder
35	Betankung	Räder	Türenremontage
36	Befüllung	Türenremontage	Stoßfänger hinten

Tabelle 6-8: Auszug generierter Montagekonfigurationen

Für die Greenfield-Planung wurde darüber hinaus eine Sensibilitätsanalyse durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass veränderte Kriterien und Kriterien-Gewichtungen sich auf die Montagekonfigurationen auswirken. Die zeitliche Positionierung der strategischen Montagemodule erfolgte nur für die Greenfield-Planung. Dazu wurde die in Tabelle 6-8 dargestellte Greenfield-Montagekonfiguration ausgewählt.

### 6.1.4 Zeitliche Positionierung

Die **zeitliche Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie** (vgl. Kap. 5.6) erfolgte für die im vorangegangenen Planungsschritt ausgewählte Greenfield-Montagekonfiguration. Über die den Montagemodulen zugeordneten AVO-Zeiten wurde die fahrzeugspezifisch benötigte Montagedauer ermittelt. Die restlichen AVOs wurden anschließend den flexiblen Montagemodulen zugeordnet, was Abbildung 6-2 verdeutlicht. Beispielsweise steht die Nummer 34 bei der Greenfield-Planung aus Tabelle 6-8 für das Montage- modul „Türenremontage“.

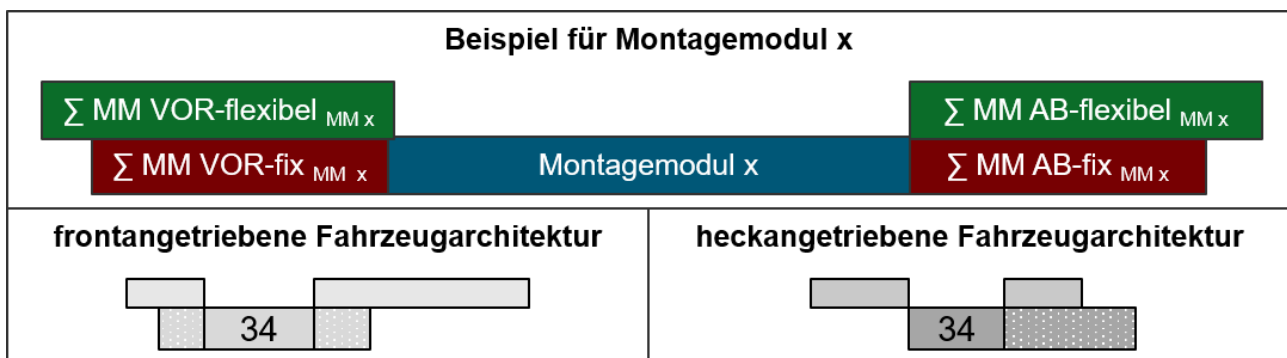


Abbildung 6-2: Zuteilung der flexiblen zu den strategischen Montagemodulen

Bei diesem Planungsfall widerspiegelten die strategischen Montagemodule ca. 45% der gesamten Montagedauer. Ungefähr 10 % der Montagezeit für das Gesamtfahrzeug entfielen auf die Vor-fixen und Ab-fixen Montageumfänge und ca. 45% der gesamten Montagedauer repräsentierten die Vor-flexiblen und Ab-flexiblen Montageumfänge. Ein vergleichbares Ergebnis zeigte sich auch bei der Brownfield-Planung.

Die architekturenspezifische Positionierung der Montagemodule erfolgte unter Einhaltung der ausgewählten, fahrzeugflexiblen Montagekonfiguration. Die Zeiten der Montagestationen sowie die der Montagemodule wurden maßstabs-



getreu für eine durchschnittliche AK-Dichte von „1“ abgebildet. Die strategischen Montagemodule wurden für beide Fahrzeugarchitekturen jeweils am Beginn der gleichen Montagestation positioniert (vgl. Abbildung 6-3). Montage-seitige Restriktionen sind bei einer Greenfield-Planung nicht zu berücksichtigen.

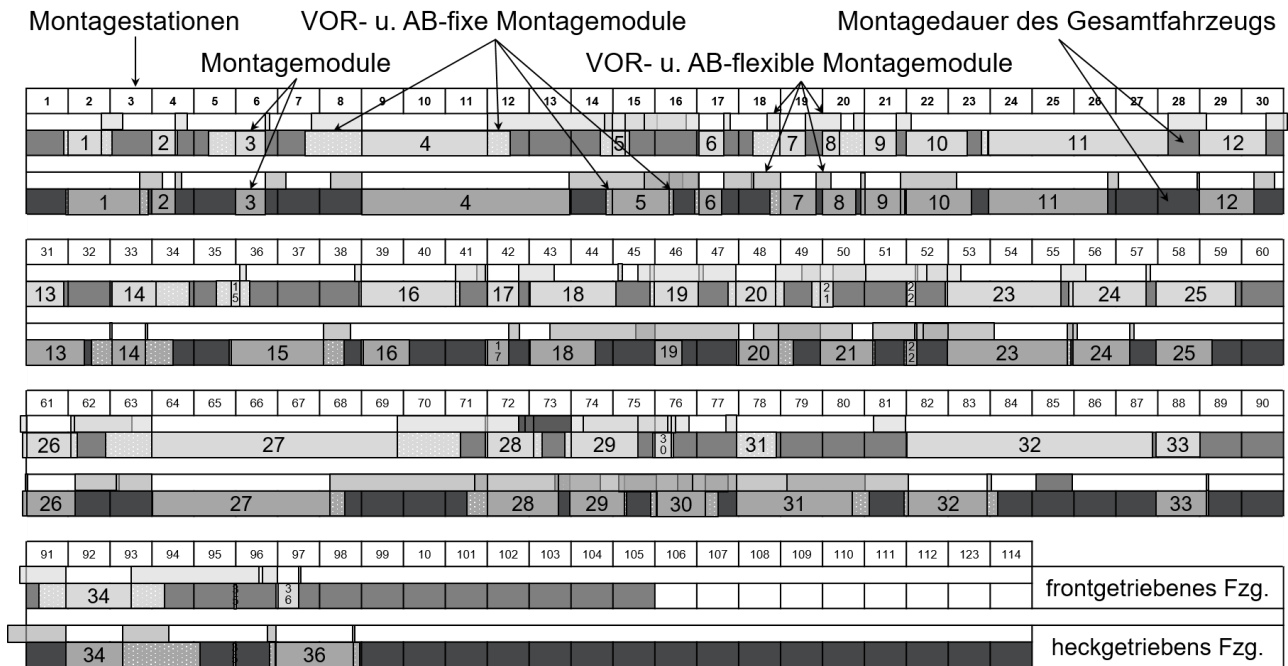


Abbildung 6-3: Zeitliche Positionierung der Montagemodule unter Einhaltung der ausgewählten Montagekonfiguration

Von der Möglichkeit einer **variantenmix-unabhängigen Reduzierung der Durchlaufzeit (vgl. Kap 5.7)** über die Erhöhung der AK-Dichte sowie Verblockung, Vertauschung und Parallelisierung der strategischen Montagemodule wurde abgesehen. Eine **variantenmix-abhängige Harmonisierung der Durchlaufzeit (vgl. Kap. 5.8)** innerhalb der fahrzeugspezifischen Montagemodule durch die Anpassung der AK-Dichte und des Automatisierungsgrads sowie der Vormontageumfänge wurde ebenfalls nicht durchgeführt, da zum Zeitpunkt der Planung noch keine verlässlichen Prognosen über den Variantenmix vorlagen.

## 6.2 Reflexion der Planungsergebnisse

Im Rahmen der Erprobung wurde nachgewiesen, dass die entwickelte Planungsmethode die Zielsetzung erfüllt: die Nutzung von Freiheitsgraden zwischen zuvor definierten Montagemodulen für die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien. Übertroffen wurde das Ziel dahingehend, dass die Planungsmethode auch für Baureihen unterschiedlicher Fahrzeugarchitekturen angewendet werden konnte. So ließ sich aufzeigen, dass entgegen heutiger Praxis zwei unterschiedliche Fahrzeugarchitekturen gemeinsam auf einer Linie montierbar sind. Zudem zeigte die Analyse auf, welche fahrzeug- und montageseitigen Anpassungen für die Integration einer zusätzlichen Fahrzeugarchitektur auf einer Montagelinie im Brownfield notwendig wären. Die Variantenmixflexibilität blieb bei den generierten Montagekonfigurationen jeweils uneingeschränkt. Die Plausibilität und Realisierbarkeit der Ergebnisse wurde abschließend von mehreren Planungsexperten mit mehrjähriger Berufserfahrung bestätigt.

Entgegen der bisherigen Planungsvorgehensweise erfolgte die Standardisierung nicht für die Montagereihenfolge, sondern für die Montagemodule an sich. Dabei zeigte sich, dass Montagemodule für unterschiedliche Fahrzeuge gleichermaßen bestimmt werden können, auch architekturübergreifend. Die Fokussierung auf die strategisch relevanten Montagemodule war für die Grobbandbelegung nachweislich ausreichend. Im vorliegenden Fall repräsentierten die strategischen Montagemodule ca. 45% der gesamten Montagedauer eines Fahrzeuges.

Der wissenschaftliche, qualitative Mehrwert der entwickelten Planungsmethode ist der objektive Aufbau von Montagekonfigurationen. Durch die methodische Nutzung der Freiheitsgrade wird die Konfiguration fahrzeugflexibler

Montagelinien unterstützt. Hinzu kommt, dass durch die Berücksichtigung der Kriterien-Ausprägungen während des Konfigurationsprozesses die Qualität der Planungsergebnisse sichergestellt wird.

Die Integrationsuntersuchung wurde mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methode durchgeführt. Diese Untersuchung erfolgte parallel anhand konventioneller Workshops. Die Planungsexperten ordneten dabei einzelne Bauteile der heckgetriebenen Architektur und der Hocharchitektur den Bandabschnitten und den Montagestationen händisch zu. Eine Abschätzung der dafür aufgewendeten Planungsdauer durch die Planungsexperten ermöglicht einen Vergleich mit der hier konzipierten Methode. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-9 dargestellt. Liegen die Daten vor, lässt sich durch die neu entwickelte Planungsmethode die Dauer für die Erstellung alternativer Montagekonfigurationen und damit auch die Mitarbeiterkosten gegenüber dem konventionellen Planungsprozess um ca. 70% reduzieren. Ein weiterer Vorteil ergibt sich daraus, dass die Daten je Fahrzeug nur einmal zu erheben sind. Dadurch können Montagekonfigurationen für jede Montagelinie innerhalb von einem halben Tag ermittelt werden. Gegenüber dem bisherigen Planungsvorgehen, bei dem der Planungsprozess erneut vollständig durchzuführen wäre, lässt sich die Planungsdauer dadurch um ca. 90% reduzieren.

	<b>konventionelles Planungs-vorgehen</b>	<b>neu entwickelte Planungs-methode</b>
Zuteilung der Bauteile zu den Montagemodulen (je Fahrzeug)	-	ca. 80 Personenstunden
Ermittlung der Montagezeiten (je Fahrzeug)	-	ca. 80 Personenstunden
Ermittlung der Freiheitsgrade (je Fahrzeug)	-	ca. 4 Personenstunden
Ermittlung der Freiheitsgrade (je Montagelinie)		ca. 4 Personenstunden
<b>Erstellung der Grobbandbelegung</b> (2 Fahrzeugarchitekturen auf einer Montagelinie)	ca. 100 Personenstunden	ca. 330 Personenstunden
Dauer für <b>alternative Montagekonfigurationen (gleiche Montagelinie und gleiche Fahrzeuge)</b>	ca. 30 Personenstunden	ca. 8 Personenstunden
Dauer für <b>alternative Montagekonfigurationen (andere Montagelinie und gleiche Fahrzeuge)</b>	ca. 100 Personenstunden	ca. 10 Personenstunden

Tabelle 6-9: Gegenüberstellung der Planungsdauer des konventionellen und des neu entwickelten Planungs-vorgehens (Schätzwerte)

Während der Validierung stellte insbesondere die schlechte Datendurchgängigkeit ein Unsicherheitsfaktor dar. So lagen die Fahrzeuge der Brownfield-Planung zwar als digitales 3D-Modell vor, nicht aber die Montagelinie. Auch die Arbeitsvorgänge waren zwar durch die Montageplanung an die Bauteile geknüpft, aber sie wiesen große Unterschiede im Detaillierungsgrad zwischen den betrachteten Fahrzeugen auf. Hinzu kam, dass innerhalb der AVO-Listen Montagetätigkeiten der Vormontage und Endmontage nicht vollständig getrennt vorlagen, was zusätzliche Arbeitsschritte notwendig machte. Darin begründet sich auch der erhöhte Zeitaufwand zur Erstellung der Grobbandbelegung, der gegenüber dem konventionellen Planungs-vorgehen ca. dreimal so hoch ist. Die konzipierte Methode sollte daher in die bestehende Software der Fahrzeugentwicklung und Montageplanung integriert werden. Dadurch ließen

sich die Bauteile mit den notwendigen Montageprozessen teilautomatisiert verknüpfen und getrennt für die Vor- und Hauptmontage ausgeben. Die Dauer für die Datenaufbereitung wäre dadurch reduzierbar (vgl. Tabelle 6-9).

Weitere Potenziale finden sich in der Bewertung variantenabhängiger Zeitunterschiede innerhalb der Fahrzeugarchitekturen, da dies für die Austaktung während der Feinplanung notwendig ist. Über die Modularisierung der Montagemodule wird diesem Umstand insofern begegnet, als variante Montageprozesse in die Vormontagen verlagert werden. In der Praxis ist das in der Regel nicht vollumfänglich realisierbar. Auch die Bestimmung der Montagemodule geschah zumeist nicht anhand eines strukturierten, methodischen Vorgehens, sondern basierte auf Erfahrungen in den Planungsbereichen. Dies war nicht zuletzt der Tatsache geschuldet, dass die Verantwortungs- und Planungsbereiche organisatorisch nach bisherigen Bandabschnitten strukturiert waren. Die Gefahr ist, dass die standardisierte Ablaufstruktur der Endmontage in die Fahrzeuge hineinkonstruiert wird. Dadurch wäre die Vorgabe der Montageplanung an die Fahrzeugentwicklung gleichzeitig auch das Ergebnis der Montagekonfiguration. Um dies zu vermeiden, müssen neben den Freiheitsgraden auch die Montage- und Logistikkriterien einen Ideal- und nicht einen Realzustand widerspiegeln.

---

## **7 Zusammenfassung und Ausblick**

Die entwickelte Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage der Automobilindustrie wird im Folgenden zusammengefasst dargestellt. Abschließend werden im Ausblick weitere Potenziale der Methode erörtert sowie weitere Anwendungsfälle vorgedacht.

### **7.1 Zusammenfassung**

Die Automobilindustrie sieht sich mit der Herausforderung eines wachsenden Produktportfolios konfrontiert. Dies resultiert aus neuen Fahrzeugtechnologien und dem Trend nach individuell konfigurierbaren Fahrzeugen, was sich durch weltweit abweichende Kundenanforderungen noch verstärkt. Die Nachfrageentwicklung lässt sich dadurch zukünftig kaum noch prognostizieren. Infolgedessen unterliegt auch das fahrzeugspezifische Nachfragevolumen nicht vorhersehbaren Schwankungen. Besondere Bedeutung ergibt sich daraus für das Gewerk der Montage, in dem ein Großteil der Fahrzeugvarianz entsteht. Diesen Herausforderungen kann begegnet werden, indem mehr als ein Fahrzeug bzw. eine Fahrzeugarchitektur variantenmix-unabhängig auf einer gemeinsamen Linie montierbar ist. Die Kapazität der Montagelinie kann dadurch bei einer Verschiebung der Nachfrage zwischen den Fahrzeugen bedarfsorientiert genutzt werden. Die Anzahl und Varianz der Arbeitsvorgänge in der automobilen Endmontage sowie deren gegenseitige Abhängigkeiten machen für die Grobplanung eine Modularisierung der Montageprozesse notwendig. Die Montagemodule beschreiben dadurch den Verbau von Baugruppen bzw. Bauteilen in der Endmontage. Eine Untersuchung zeigte, dass die realen Montagekonfigurationen bestehender Montagelinien, die sich aus den Montagemodulen zu-

sammensetzen, weder einheitlich sind noch einem Standard folgen. Die identifizierte Ursache ist die ständige Weiterentwicklung der standardisierten Montagekonfiguration durch neue Fahrzeugtechnologien und -konzepte. Daher wird der Standard in der Regel nur in Greenfield-Planungen umgesetzt. In Brownfield-Planungen wird der Standard aus Kostengründen meist nicht adaptiert, sofern neue Fahrzeuge auf der bestehenden Linie dennoch integrierbar sind. Die Konsequenz ist, dass jede Montagelinie einzeln ausgeplant werden muss. Zudem zeigt dies aber auch, dass Freiheitsgrade in der Anordnung der Montageprozesse bestehen. Aktuell werden sie jedoch nicht systematisch für die Montageplanung genutzt, auch wenn sie, insbesondere für die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien, herangezogen werden könnten. Die identifizierte Forschungslücke besteht folglich darin, dass vorhandene Freiheitsgrade in der heutigen Montageplanung nicht methodisch zur Planung von fahrzeugflexiblen Montagelinien genutzt werden. Geschlossen wird diese mit der Entwicklung einer Methode zur Modularisierung der Montageprozesse. Durch die Nutzung von Freiheitsgraden zwischen den Montagemodulen werden diese so angeordnet, dass eine fahrzeugflexible Montagekonfiguration erzielbar ist.

Es liegen sowohl Ansätze zur Modularisierung als auch zur Austaktung von Montagelinien vor. Auch der Vorteil fahrzeugflexibler Montagelinien wurde bereits untersucht und nachgewiesen. Allerdings ist kein Ansatz für die methodische Nutzung der Freiheitsgrade für die Konfiguration fahrzeugflexibler Montagelinien bekannt. Die Grundlagen für die Entwicklung einer Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen sind vielschichtig. Dazu zählen die Eingangsgrößen der Montageplanung ebenso wie die Steuergrößen der automobilen Endmontage. Für den Aufbau und die Bewertung von Montagevorranggraphen sind zudem die Grundlagen der Graphentheorie von Bedeutung.

Die entwickelte Planungsmethode besteht aus acht Planungsbausteinen. Zunächst sind die der Montageplanung zugrundeliegenden Prämissen festzulegen. Anschließend erfolgt die Identifikation der Montagemodule, die für alle betrachteten Fahrzeuge gleichermaßen gültig sind. Dazu werden die Montageprozesse einer bestehenden Montagelinie ebenso wie die notwendigen Prozesse zur Endmontage der Fahrzeuge modularisiert. Zu differenzieren ist dabei zwischen strategischen Montagemodulen, die fahrzeugübergreifend gültig sind und Vor- bzw. Ab-fixen und flexiblen Montagemodulen. Diese können fahrzeugspezifisch unterschiedlich sein und sind abhängig von der Anordnung der strategischen Montagemodule. Insbesondere die flexiblen Montagemodule weisen eine große Anzahl an Freiheitsgraden zu anderen Montagemodulen auf und können dadurch an zahlreichen Positionen in der Montagelinie angeordnet werden. Dies gilt unabhängig davon, ob es sich um eine Planung im Green- oder Brownfield handelt. Nach der Bestimmung der strategischen Montagemodule erfolgt die Erhebung der Freiheitsgrade zur Anordnung dieser Montagemodule. Diese sind fahrzeugspezifisch und im Falle einer Brownfield-Planung auch für die bestehende Montagelinie zu ermitteln. Dazu werden Adjazenzmatrizen herangezogen. Diese eignen sich zur Speicherung von Vorranggraphen und zur Erfassung der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Montagemodulen. Dabei ist jeweils zwischen zwei strategischen Montagemodulen festzustellen, ob eine zwangsweise Vorrangbeziehung besteht oder ob diese frei wählbar ist und damit einen Freiheitsgrad aufweist. Somit ist die Objektivität im Planungsprozess sichergestellt. Durch die zuvor durchgeführte Standardisierung der Montagemodule können die Adjazenzmatrizen überlagert werden. Das Ergebnis sind sämtliche fahrzeug- und linienübergreifende Restriktionen in den Vorgänger- und Nachfolger-Beziehungen. Eine derartige überlagerte Matrix repräsentiert einen Mischgraphen. Alle Pfade durch diesen Graphen, bei dem jedes Montagemodul exakt einmal durchlaufen



wird, erfüllen die Anforderung einer fahrzeugflexiblen Montagekonfiguration. Existieren mehrere gültige Montagekonfigurationen, sind diese durch das Heranziehen von Montage- und Logistikkriterien zu bewerten, wodurch der Auswahlprozess unterstützt wird. Anhand dieser Montagekonfiguration und den Montagemodulen fahrzeugspezifisch hinterlegten Montagezeiten lassen sich die Montagemodule auf der Montagelinie zeitlich positionieren. Da trotz der Fahrzeugmodularisierung dennoch fahrzeug- und linienspezifische Zeitunterschiede innerhalb der Montagemodule bestehen, müssen diese getrennt auf der Montagelinie positioniert werden. Dieser Herausforderung wird grafisch begegnet. Dazu wird die Montagelinie in Form eines Zeitstrahles dargestellt und die vorhandenen Montagezeiten der Montagemodule werden sowohl für die Montagelinie als auch für die Fahrzeuge darauf angeordnet. Da die strategischen Montagemodule die Montagedauer der Fahrzeuge nicht vollumfänglich widerspiegeln, sind die flexiblen Montagemodule zusätzlich zu positionieren. Abschließend ist die Reduzierung der Durchlaufzeit ohne Einschränkung des Variantenmix möglich. Hierzu sind eine fahrzeugübergreifende Erhöhung der AK-Dichte sowie die Verblockung, Vertauschung und Parallelisierung von Montagemodulen zu nutzen. Zudem können zwischen den Fahrzeugen unterschiedliche Montagezeiten innerhalb der Montagemodule harmonisiert werden. Dafür ist der Variantenmix festzulegen. Deshalb müssen diese Anpassungen innerhalb kurzer Zeit rückgängig gemacht werden können.

Die entwickelte Methode zur Planung modularer, fahrzeugflexibler Montagekonfigurationen wurde unter Nutzung von Realdaten eines Automobilherstellers verifiziert. Das Resultat für eine Planung im Greenfield war eine fahrzeugflexible Montagekonfiguration für zwei Baureihen unterschiedlicher Fahrzeugarchitekturen, die in der Vergangenheit nicht auf einer Linie montiert wurden. Für eine Brownfield-Planung ließen sich die fahrzeug- und/oder montageseitig

notwendigen Anpassungen für die Integration einer zusätzlichen Fahrzeugarchitektur auf einer bereits bestehenden Montagelinie aufzeigen. Die Realisierbarkeit der Ergebnisse der Green- und Brownfield-Planung bestätigten Planungsexperten. Es konnte damit nachgewiesen werden, dass fahrzeugübergreifend Montagemodule bestimmbar sind. Zudem können durch die methodische Nutzung der Freiheitsgrade zwischen den Montagemodulen fahrzeugflexible Montagelinien konfiguriert werden.

## **7.2 Ausblick**

Der Schwerpunkt bei der Entwicklung der Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen beschränkt sich in dieser Arbeit auf den Sektor der Automobilindustrie. Dennoch ist der Einsatz in anderen Industriezweigen vorstellbar, die sich mit der Planung einer Montagelinie konfrontiert sehen. Dazu müssten lediglich die der Planung zu Grunde liegenden Prämissen, die Montagemodule sowie die Kriterien zur Bewertung der alternativen Montagekonfigurationen neu definiert werden. Die Nutzung der Methode ist nicht nur auf die Hauptmontage beschränkt, sondern ist gleichermaßen auch für Vormontagen anwendbar.

Eine Ausweitung der Methode ist auch auf der Ebene der Arbeitsvorgänge denkbar. Lediglich die ersten beiden Planungsschritte würden entfallen, da die Planungsprämissen bereits festgelegt wären. Die Arbeitsvorgänge würden dabei die Montagemodule repräsentieren. Abhängig von der Anzahl und den Abhängigkeiten zwischen den Arbeitsvorgängen kann eine Fokussierung auf einzelne Arbeitsvorgänge zweckmäßig sein. Als Kriterien wären beispielsweise die Betriebsmittel, Produktansprachen etc. zu berücksichtigen, da diese Einfluss auf die Arbeitsvorgänge haben.

Grundsätzlich lassen sich für jedes Produkt alternative Reihenfolgen für den Verbau von Produktumfängen in der Montage bestimmen. Derzeitige Forschungsansätze untersuchen das Auflösen einer starren Verkettung und das freie Anfahren von zuvor definierten Montageabschnitten. Auf den Freiheitsgraden könnte die Steuerung derartiger Ansätze aufbauen. Dazu müssten diese für jedes Fahrzeug mit hinterlegtem Kundenauftrag ermittelt werden. Unter Nutzung der Freiheitsgrade könnte die fahrzeugspezifische Montagereihenfolge so festgelegt werden, dass die Kapazitätsauslastung der Montagemodule maximiert würde. Zu lösen wäre dazu der IT-seitige Ressourcenaufwand, da sämtliche Montagekonfigurationen aller Fahrzeuge heranzuziehen wären.

---

## Summary

The trend of a growing product portfolio is the result of new vehicle technologies and increasing options to customize the vehicles. Different customer requirements world-wide intensify this situation. This leads to a hardly predictable behavior of customer demand and an unforeseeable vehicle-specific demand volume. Especially the assembly line is affected as it contains the biggest part of the vehicle variability. Thus, it is necessary to plan vehicle-flexible assembly lines without any restrictions in the mix of variants. Thereby it is possible to shift the volume share of the different vehicles. For the planning of a final assembly line in the automotive industry it is necessary to modularize the assembly operations. That is required, because there are too many assembly operations, which are in a predecessor-successor-relationship. These assembly modules represent the processes to assemble product modules and components in the final assembly line. An analysis at an automotive manufacturer has shown that the real assembly sequence structures of existing assembly lines are neither equal nor follow the standard. The standard assembly sequence structure is adapted to new vehicle technologies and concepts regularly. That is the reason, why only new planned assembly lines in the greenfield follow this standard. To save money, normally the new standard is not implemented to already existing assembly lines in the brownfield as long as new vehicles can still be integrated. That requires a line-specific detail planning. The fact, that even assembly lines for the same vehicles are configured differently, means there are degrees of freedom in the arrangement of assembly processes. These degrees of freedom could be used methodically for planning vehicle-flexible assembly lines. In a greenfield-planning, an assembly configuration should be selected, which fulfills the requirements of current and future vehicles best. In a brownfield-planning it could be determined, if a further vehicle can be integrated on

the existing line or which adjustment are necessary. Thus, the identified research gap is that today the degrees of freedom between assembly processes are not used methodically to plan vehicle-flexible assembly lines. This gap will be closed by developing a method to modularize assembly processes and using the degrees of freedom between these assembly modules to configure vehicle-flexible assembly lines.

There are existing approaches to modularize vehicles and assembly operations as well as methods of line balancing. Also, the benefits of vehicle-flexible assembly lines are researched and scientifically proven. However, no methodical approach could be identified to use the degrees of freedom to configure vehicle-flexible assembly lines. The basis to develop a method for planning modular, vehicle-flexible assembly configurations are the input variables of the planning process, control factors of the final assembly line in the automotive industry and the theory of the structure and evaluation of priority graphs.

The developed planning method consists of eight planning blocks. First of all the planning premises have to be defined. Afterwards the assembly modules have to be identified, which are valid for all considered vehicles. Thereby the assembly processes of an existing line as well as the necessary processes to assemble the vehicles are modularized. It has to be differentiated between strategic assembly modules, which are valid for all focused vehicles and flexible assembly modules. These can be vehicle-specific different and are dependent on the arrangement of the strategic assembly modules. Especially the flexible assembly modules are characterized by a large number of degrees of freedom and they can be relocated cost- and time-efficient. Afterwards the degrees of freedom between the strategic assembly modules have to be determined for each vehicle and in a brownfield-planning also for the existing assembly line. Therefore, the priority relations between two assembly modules

were determined by an adjacency matrix. If there is no restriction, it represents a degree of freedom. This approach ensures that the degrees of freedom and thus the generated assembly configurations are determined objectively. Due to the standardization of the assembly modules, the vehicle- and line-specific adjacency matrices can be matched with each other. The result is the information of the predecessor- and successor-relationship between the assembly modules of all vehicles and the assembly line, which have to be maintained strictly. An adjacency matrix represents a priority graph. All paths through the graph of the matched matrix, in which each assembly module is visited exactly one time, fulfills the requirement of a vehicle-flexible assembly configuration. If several assembly configurations exist, the selection process can be supported by evaluating the alternatives. According to the selected assembly configuration and the vehicle-specific assembly times of the assembly modules, the assembly modules can be located on the time line of the assembly line. Within the modularization of the vehicles, the assembly time spreading between the different vehicles can be reduced but not suspended. The assembly modules have to be located on the assembly time line separately, because there are vehicle-specific time differences. This challenge is solved graphically. For this purpose, the assembly times are visualized vehicle-specific for the assembly modules. The flexible assembly modules also have to be located on the assembly line, because the strategic assembly modules do not represent the whole assembly time of the vehicles. Finally, the throughput time can be reduced without restricting the variant mix. Therefore, the density of people in the assembly modules can be increased independently of the vehicle and the assembly modules can be blocked, interchanged and parallelized. Further on different assembly times in the assembly modules can be harmonized between the different vehicles, but these adaptations should be reversible within a short time, because it results in a limitation of the variant mix.

The developed planning method was verified on the basis of real data of planning projects in the automotive industry. For a greenfield-planning, an appropriate assembly configuration was detected with the developed method, which allows assembling two different vehicle architectures on a single assembly line. In the past, such a vehicle-flexible assembly configuration was not discussed. Furthermore, the ability to integrate additional vehicle architectures on an already existing assembly line in the brownfield was checked. To enable the integration, necessary adjustments were identified in order to increase the degrees of freedom in the precedence graphs of the vehicles and the assembly line. Finally, experts confirmed that the results of the two planning scenarios are realistic and realizable. In summary it was proven, that it is possible to define assembly modules, which represent the assembly processes of different vehicles and assembly lines and the degrees of freedom between these assembly modules can be used to configure product-flexible assembly configurations.

---

## Glossar

Adjazenzmatrix	In einer Adjazenzmatrix sind die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen der Knoten eines Vorranggraphen hinterlegt. Dabei sind die Knoten des Vorranggraphen in x- und y-Richtung aufgelistet (n X n-Matrix). Ist ein Knoten einem anderen nachgelagert, so ist dies in der Matrix als „1“ festgehalten, ansonsten ist eine „0“ zu notieren (Schmigalla 1970; Förster 1983).
AK-Dichte	Die AK-Dichte gibt an, wie viele Mitarbeiter in einer Montagestation tätig sind. Mit zunehmender AK-Dichte steigt auch die leistbare Montagezeit innerhalb einer Station. Über mehrere Montagestationen hinweg lässt sich eine durchschnittliche AK-Dichte berechnen.
Arbeitsvorgang	Ein Arbeitsvorgang (AVO) ist eine Tätigkeit, die sich nicht weiter unterteilen lässt, weshalb diese <i>„von einer Person oder einem Betriebsmittel vollständig durchgeführt werden“</i> muss (REFA 1990).
Automobil-Gewerk	Ein Automobilwerk besteht in der Regel aus den Gewerken: Presswerk, Rohbau, Oberflächenbehandlung und Montage.
Brownfield-Planung	Eine Planung im Brownfield entspricht der Umplanung einer bestehenden Montagelinie. Die Planung unterliegt dementsprechenden Restriktionen und dient der Weiterentwicklung der Linie.
Durchlaufzeit	Die Durchlaufzeit beschreibt die gesamte Dauer, die sich ein Fahrzeug während dem Montagebetrieb auf der Montagelinie befindet. Gleichmaßen kann die Durchlaufzeit auch für einzelne Montagemodule bestimmt werden.
Effizienz	Effizienz steht für ein geeignetes Kosten-Nutzen-Verhältnis und bedeutet damit auch Wirtschaftlichkeit.
Endmontage	Zur End- oder auch Hauptmontage zählen alle Tätigkeiten, die in der Endmontagelinie durchgeführt werden.



Fahrzeug	Im Rahmen dieser Arbeit entspricht ein Fahrzeug einem Derivat (vgl. Abbildung 2-2).
Fahrzeugarchitektur	Auf einer Fahrzeugarchitektur bauen unterschiedliche Baureihen auf (vgl. Abbildung 2-2). Der Unterschied liegt dabei primär beim Antrieb und dem Fahrwerk.
flexible Montagemodule	Die flexiblen Montagemodule zeichnen sich durch eine große Anzahl an Freiheitsgraden aus und können mit geringem Zeit- und Kostenaufwand neu auf der Montagelinie angeordnet werden. Deshalb werden diese beim Aufbau der Montagekonfigurationen nicht berücksichtigt.
Freiheitsgrad	Ein Freiheitsgrad wird zwischen zwei Montagemodulen erhoben und bedeutet, dass keine Vorgänger-Nachfolger-Restriktion zwischen den Montagemodulen besteht. Ein Montagemodul, das viele Freiheitsgrade zu anderen Montagemodulen aufweist, kann an mehreren Positionen in der Montagelinie angeordnet werden. Die Freiheitsgrade sowie die Vorgänger- und Nachfolger-Restriktionen aller Montagemodule beschreiben einen Vorranggraphen.
Greenfield-Planung	Eine Greenfield-Planung ist eine Neuplanung einer Montagelinie. Deshalb unterliegt diese keinen Restriktionen.
Lerneffekte	Der Mensch ist in der Lage zu lernen, was über Lernkurven beschreibbar ist. <i>„Dieses Gesetz besagt, dass mit jeder Verdoppelung der Stückzahl der Aufwand pro Stück um einen bestimmten Betrag reduziert wird. Die Steigung der Kurve ist ein Maß für die Lerngeschwindigkeit des Systems Produktion insgesamt. Die Kostenreduzierung ist auf die Summe aller Maßnahmen im System Produktion zurückzuführen, also auf konstruktive, technische und organisationale Maßnahmen“</i> (Westkämper et al. 2016).
Modularisierung	Die Modularisierung <i>„ist eine Aufteilung einer bestehenden Produktarchitektur in nach bestimmten Kriterien gebildete Einheiten (Module) mit spezifizierten Schnittstellen in Abhängigkeit von der Unternehmensstrategie“</i> (Schmieder et al. 2005).

---

Montageablaufstruktur	Montageablaufstrukturen beschreiben die Abfolgen von Montagetätigkeiten, die direkt hintereinander durchzuführen sind sowie Tätigkeiten, die nicht zwingend aufeinanderfolgen müssen, also Freiheitsgrade aufweisen. Diese können über Vorranggraphen dargestellt werden (Bullinger <i>et al.</i> 1986; Zeile 1995).
Montagekonfiguration	Eine Montagekonfiguration ist eine Möglichkeit zur linearen Anordnung der Montagemodule, also ein Pfad durch einen Vorranggraphen, bei dem jeder Knoten bzw. jedes Montage- modul exakt einmal durchlaufen wird.
Montagelinie	Eine Montagelinie ist die starre Verkettung linear angeordneter Montagestationen.
Montagemodul mit Teilezuwachs	Montagemodule mit Teilezuwachs dienen dem Verbau der Produktmodule. Die Anzahl der Montagestationen innerhalb eines Montagemoduls ist dabei abhängig von der benötigten Montagedauer, dem Montagetakt und der AK-Dichte. Neben dem Produktmodul sind daran u.a. die Montagezeiten (AVOs), die benötigten Betriebsmittel, die AK-Dichte und das Logistikkonzept gekoppelt.
Montagemodul ohne Teilezuwachs	Montagemodule ohne Teilezuwachs sind notwendige Tätigkeiten in der Endmontage wie Prüfen und Einstellen. Zwar sind an diese Montagemodule keine Produktmodule gekoppelt, dennoch sind u.a. die Dauer zur Durchführung der Tätigkeiten, benötigte Betriebsmittel und die AK-Dichte hinterlegt.
Montagereihenfolge	Die Montagereihenfolge repräsentiert die lineare Anordnung von Montageprozessen und bildet folglich keine Freiheitsgrade ab.
Montagestation	In einer Arbeitsstation können mehrere Arbeitsvorgänge zusammengefasst werden (Westkämper <i>et al.</i> 2006). Im Rahmen dieser Arbeit definiert sich eine Montagestation über die zurückgelegte Bandlänge eines Fahrzeuges innerhalb eines Montagetakts.

Montagetakt	Die Taktzeit ist die Dauer, die ein Fahrzeug in einer Montagestation verweilt, bis es an die darauffolgende Montagestation übergeben bzw. weitergetaktet wird.
Montagezeit pro Einheit (MTE)	Die in der Montage tatsächlich benötigte Zeit zum Endmontieren eines Fahrzeugs entspricht der MTE. Durch die Fahrzeugvarianz kann die MTE fahrzeugspezifisch unterschiedlich sein.
NP-schwer	Bei einem NP-schweren Optimierungsproblem existiert kein Algorithmus zur Lösung der schwierigsten Instanz des Problems mit polynomialem Aufwand (Domschke <i>et al.</i> 2015).
Produkt	In der vorliegenden Arbeit entspricht ein Produkt einem Derivat. Werden mehrere Produkte betrachtet, müssen diese nicht zwingenderweise derselben Fahrzeugarchitektur zugehörig sein (vgl. Abbildung 2-2).
Produktflexibilität	Im Kontext der Automobilindustrie ist Fahrzeugflexibilität gleichbedeutend. Unter Produktflexibilität wird verstanden, dass mehr als ein Fahrzeug, unabhängig vom Variantenmix, gemeinsam auf einer Linie endmontiert werden kann. Die Fahrzeuge können dabei auf unterschiedlichen Fahrzeugarchitekturen aufbauen.
Produktionslogistik	Die Produktionslogistik betrachtet die Lieferung des Materials vom Wareneingang bis zur Materialbereitstellung am Verbauport in der Montage.
Produktmodul	In dieser Arbeit werden Produktmodule definiert, die in der Endmontage verbaut werden. Dabei kann es sich um Einzelteile, Unterbaugruppen, Baugruppen und deren Zusammenschluss handeln (vgl. Abbildung 2-2).
strategisches Montage-modul	Die strategischen Montagemodule werden für die Generierung der Montagekonfigurationen herangezogen. Diese zeichnen sich durch eine geringe Anzahl an Freiheitsgraden aus und eine neue Positionierung auf der Montagelinie würde mit einem hohen Kosten- und Zeitaufwand einhergehen.

Variantenmix	Der Variantenmix beschreibt das Verhältnis zwischen den Fahrzeugtypen, die auf einer Linie endmontiert werden. Es ist damit der prozentuale Anteil der Fahrzeugtypen an der gesamten Kapazität einer Montagelinie. Ein homogener Variantenmix bedeutet im Kontext dieser Arbeit, dass die Fahrzeugtypen die Montagelinie gleichverteilt durchlaufen.
Variantenmixflexibilität	Variantenmixflexibilität bedeutet im Kontext dieser Arbeit, dass die Montagelinie keine Variantenmix-Restriktionen aufweist, d.h. das Mengenverhältnis der zu montierenden Fahrzeugvarianten bzw. Fahrzeugarchitekturen ist frei wählbar.
Verbauquote	Die Verbauquote gibt an, wie häufig ein Bauteil bzw. eine Baugruppe verbaut wird. Durch die sog. Verblockung wird angestrebt, dass in unterschiedlichen Fahrzeugen dieselben Bauteile bzw. Baugruppen verbaut werden.
Vormontage	Als Vormontage werden all die Montagetätigkeiten bezeichnet, die außerhalb der Endmontagelinie durchgeführt werden.
Vorranggraph	<i>„Ein Vorranggraph ist eine netzplanähnliche Darstellung von Teilaufgaben der Montage, wobei die Teilaufgaben als Knoten und die Abhängigkeitsbeziehungen als Verbindungslinien (Kanten) zwischen den Knoten dargestellt werden. Die Teilaufgaben werden zum Zeitpunkt der frühesten Ausführbarkeit eingetragen. Das Ende der von einem Knoten ausgehenden Kante verdeutlicht den Zeitpunkt, zu dem die Teileverrichtung spätestens ausgeführt sein muss“ (Westkämper et al. 2006).</i> In der vorliegenden Arbeit entsprechen die Knoten den Montagemodulen.

---

## Literaturverzeichnis

- Aggteleky 1990  
Aggteleky, Béla. 1990.  
*Fabrikplanung: Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung.*  
2. vollst. überarb. u. erw. Aufl.  
München : Hanser.  
ISBN 3-446-15800-6
- Aisenbrey et al. 2015  
Aisenbrey, Simon, Küber, Christian & Foith-Förster, Petra.  
Planungsmethodik in der Automobil-Montage: Identifizierung von Vor- bzw. Hauptmontageumfängen.  
*productivITy* 2015 (3), S. 15–17
- Altemeier 2009  
Altemeier, Simon. 2009.  
*Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie unter expliziter Berücksichtigung des Unterstützereinsatzes und unterschiedlicher Planungszeiträume*, zugl. Diss.  
Paderborn : HNI.  
HNI-Verlagsschriftenreihe; 262.  
ISBN 978-3-939350-81-1
- Ammer 1985  
Ammer, Ernst-Dieter. 1985.  
*Rechnerunterstützte Planung von Montageablaufstrukturen für Erzeugnisse der Serienfertigung*, zugl. Diss.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
IPA-IAO Forschung und Praxis; 81.  
ISBN 978-3-642-82412-8
- Bock 2000  
Bock, Stefan. 2000.  
*Modelle und verteilte Algorithmen zur Planung getakteter Fließlinien: Ansätze zur Unterstützung eines effizienten Mass Customization*, zugl. Diss.  
Gabler Edition Wissenschaft.  
Wiesbaden : Dt. Univ.-Verl.  
Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre.  
ISBN 978-3-8244-7227-7
- Boysen 2005  
Boysen, Nils. 2005.  
*Variante fließfertigung*, zugl. Diss.  
Wiesbaden : Dt. Univ.-Verl.  
Betriebswirtschaftliche Forschung zur Unternehmensführung; 49.  
ISBN 978-3-8350-0058-2
- Brehm 2003  
Brehm, Carsten R. 2003.  
*Organisatorische Flexibilität der Unternehmung: Bausteine eines erfolgreichen Wandels*, zugl. Diss.  
Gabler Edition Wissenschaft.  
Wiesbaden : Dt. Univ.-Verl.

- Strategische Unternehmensführung.  
ISBN 978-3-8244-7952-8
- Brocke 2011  
Brocke, Thomas. 2011.  
*Konzept zur Komplexitätsbeherrschung in der Automobilindustrie*, zugl. Diss.  
München : Dr. Hut.  
Bericht / Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig; 81.  
ISBN 978-3-8439-0250-2
- Brückner et al. 2015  
Brückner, Lissy, Popp, Julian & Küber, Christian.  
Anmeldenr.: 102015013585.6.  
*Riegelkonzept zur Bereitstellung von Produktionsmaterial*.  
Daimler AG
- Brunner 2016  
Brunner, Nils. 2016.  
*Entwicklung eines Plattformkonzeptes für die Planung von Montagesystemen*, zugl. Diss.  
Aachen : Shaker.  
Schriftenreihe Industrial Engineering; 18.  
ISBN 978-3-8440-4578-9
- Bullinger et al. 1986  
Bullinger, Hans-Jörg, Ammer, Dieter, Dungs jr., Karl, Seidel, Uwe A. & Weller, Bernd. 1986.  
*Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis*.  
München, Wien : Hanser.  
ISBN 3-446-14606-7
- Bullinger et al. 2009  
Bullinger, Hans-Jörg, Spath, Dieter, Warnecke, Hans-Jürgen & Westkämper, Engelbert. 2009.  
*Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung*.  
3. neu bearb. Aufl.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 978-3-540-87595-6
- Deutschländer 1989  
Deutschländer, Arthur. 1989.  
*Integrierte rechnerunterstützte Montageplanung*, zugl. Diss.  
München : Hanser.  
Produktionstechnik - Berlin; 72.  
ISBN 3-446-15779-4
- DIN 8593  
DIN 8593-0. 2003.  
*Fertigungsverfahren Fügen*.  
Berlin : Beuth
- Domschke et al. 1997  
Domschke, Wolfgang, Scholl, Armin & Voß, Stefan. 1997.  
*Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte*.  
2. überarb. und erw. Aufl.  
Berlin, Heidelberg : Springer.

- Springer-Lehrbuch.  
ISBN 3-540-63560-2
- Domschke et al. 2015  
Domschke, Wolfgang, Drexl, Andreas, Klein, Robert & Scholl, Armin. 2015.  
*Einführung in Operations Research*.  
9. überarb. u. verb. Aufl.  
Berlin, Heidelberg : Springer Gabler.  
ISBN 978-3-662-48216-2
- Dörmer 2013  
Dörmer, Jan. 2013.  
*Produktionsprogrammplanung bei variantenreicher Fließproduktion: Untersucht am Beispiel der Automobilmontage*, zugl. Diss.  
Wiesbaden : Springer Gabler.  
Springer Gabler Research.  
ISBN 978-3-658-02092-7
- Feldmann 1997  
Feldmann, Christoph. 1997.  
*Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung*, zugl. Diss.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
Forschungsberichte IWB; 104.  
ISBN 978-3-662-06845-8
- Förster 1983  
Förster, Alfred. 1983.  
*Strukturierung von Teilflußsystemen der Fertigung im Maschinenbau*, zugl. Diss.  
Chemnitz (ehem. Karl-Marx-Stadt)
- Fusch 2004  
Fusch, Thomas. 2004.  
*Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie*, zugl. Diss.  
München : Herbert Utz.  
Forschungsberichte IWB; 188.  
ISBN 3-8316-0467-3
- Golz 2014  
Golz, Jenny. 2014.  
*Materialbereitstellung bei Variantenfließlinien in der Automobilendmontage*, zugl. Diss.  
Wiesbaden : Springer Gabler.  
Produktion und Logistik.  
ISBN 978-3-658-04067-3
- Grunwald 2002  
Grunwald, Stefan. 2002.  
*Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung*, zugl. Diss.  
München : Herbert Utz.  
Forschungsberichte IWB; 159.  
ISBN 978-3-8316-0095-3

- Hernández Morales 2003      Hernández Morales, Roberto. 2003.  
*Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*,  
zugl. Diss.  
Düsseldorf : VDI-Verl.  
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft;  
149.  
ISBN 978-3-18-314916-2
- Jonas 2000      Jonas, Christian. 2000.  
*Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung  
von Montageanlagen*, zugl. Diss.  
München : Herbert Utz.  
Forschungsberichte IWB; 145.  
ISBN 3-89675-870-5
- Kemper et al. 2010      Kemper, Hans-Georg, Baars, Henning & Mehanna, Walid.  
2010.  
*Business Intelligence - Grundlagen und praktische Anwen-  
dungen: Eine Einführung in die IT-basierte Management-  
unterstützung*.  
3. überarb. u. erw. Aufl.  
Wiesbaden : Vieweg+Teubner.  
Studium.  
ISBN 978-3-8348-0719-9
- Klauke et al. 2005      Klauke, Adolf, Schreiber, Werner & Weißner, Rüdiger.  
2005.  
Neue Produktstrukturen erfordern angepasste Fabrikstruk-  
turen.  
In: Wiendahl, Hans-Peter, et al. (Hrsg.): *Planung modula-  
rer Fabriken*.  
München : Hanser, S. 244–255.  
ISBN 3-446-40045-1
- Klepsch 2004      Klepsch, Bernd. 2004.  
*Komplementäre Produkt- und Fabrikmodularisierung am  
Beispiel der Automobilindustrie*, zugl. Diss.  
Düsseldorf : VDI-Verl.  
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft;  
166.  
ISBN 3-18-316616-9
- Klug 2010      Klug, Florian. 2010.  
*Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundla-  
gen der Logistik im Automobilbau*.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
VDI-Buch.  
ISBN 978-3-642-05292-7
- Kluge 2011      Kluge, Stefan Jens. 2011.  
*Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Mon-  
tagesysteme*, zugl. Diss.



- Stuttgart : Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart.  
IPA-IAO-Forschung und Praxis; 510.  
ISBN 978-3-939890-81-2
- Kopenhagen 2014  
Kopenhagen, Frank. 2014.  
Modulare Produktarchitekturen.  
In: Schoeneberg, Klaus-Peter (Hrsg.): *Komplexitätsmanagement in Unternehmen*.  
Wiesbaden : Springer Gabler, S. 113–162.  
ISBN 978-3-658-01284-7
- Krüger 2004  
Krüger, Alexander. 2004.  
*Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme*, zugl. Diss.  
München : Herbert Utz.  
Forschungsberichte IWB; 186.  
ISBN 978-3-8316-0371-8
- Küber 2015  
Küber, Christian, 2016.  
DE 102015015915 A1.  
*Verfahren zur architekturübergreifenden Konfiguration einer Montage von Fahrzeugen*.  
Daimler AG
- Küber et al. 2016a  
Küber, Christian, Westkämper, Engelbert, Keller, Bernd & Jacobi, Hans-Friedrich. 2016.  
Method for a Cross-architecture Assembly Line Planning in the Automotive Industry with Focus on Modularized, Order Flexible, Economical and Adaptable Assembly Processes.  
*Procedia CIRP* 57, S. 339–344.  
DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.059
- Küber et al. 2016b  
Küber, Christian, Westkämper, Engelbert, Keller, Bernd & Jacobi, Hans-Friedrich. 2016.  
Method for Configuring Product and Order Flexible Assembly Lines in the Automotive Industry.  
*Procedia CIRP* 54, S. 215–220.  
DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.051
- Küber et al. 2016c  
Küber, Christian, Westkämper, Engelbert, Keller, Bernd & Jacobi, Hans-Friedrich. 2016.  
Planning Method for the Design of Flexible as Well as Economic Assembly and Logistics Processes in the Automotive Industry.  
*Procedia CIRP* 41, S. 556–561.  
DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.038
- Lachenmaier et al. 2015  
Lachenmaier, Jens F., Lasi, Heiner & Kemper, Hans-Georg. 2015.  
A Concept for Extracting and Sharing Technical Data from Digital Product Models for Subsequent Processing.

- IEEE* 2015, S. 987–996.  
DOI: 10.1109/HICSS.2015.122
- Landherr 2014  
Landherr, Martin Hubert. 2014.  
*Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung*, zugl. Diss.  
Stuttgart : Fraunhofer.  
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung; 39.  
ISBN 978-3-8396-0809-8
- Lasi 2009  
Lasi, Heiner. 2009.  
*Aufbau eines IT-basierten Integrationskonzepts zur Unterstützung von Produktentwicklungs- und Produktionsprozessen*, zugl. Diss.  
Lohmar : Eul.  
Reihe Wirtschaftsinformatik; 62.  
ISBN 978-3-89936-766-9
- Liker 2007  
Liker, Jeffrey K. 2007.  
*Der Toyota Weg: 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns*.  
München : FinanzBuch.  
ISBN 978-3-89879-188-5
- Lindemann et al. 2006  
Lindemann, Udo, Reichwald, Ralf & Zäh, Michael F. 2006.  
*Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
VDI-Buch.  
ISBN 10 3-540-25506-0
- Löffler 2011  
Löffler, Carina. 2011.  
*Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung*, zugl. Diss.  
Heimsheim : Jost-Jetter.  
IPA-IAO Forschung und Praxis; 519.  
ISBN 978-3-939890-90-4
- Lotter et al. 2012  
Lotter, Bruno & Wiendahl, Hans-Peter. 2012.  
*Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*.  
2. Aufl. 2012.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 978-3-642-29061-9
- Neuhausen 2002  
Neuhausen, Jörn. 2002.  
*Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion*, zugl. Diss.  
Aachen.  
URN: urn:nbn:de:hbz:82-opus-3081

- Neumann 2015  
Neumann, Michael. 2015.  
*Methode für eine situationsbasierte Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit in der Serienmontage*, zugl. Diss.  
Stuttgart : Fraunhofer.  
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung; 40.  
ISBN 978-3-8396-0816-6
- Neumann et al. 1993  
Neumann, Klaus & Morlock, Martin. 1993.  
*Operations Research*.  
München : Hanser.  
ISBN 3-446-15771-9
- NPE 2016  
Nationale Plattform Elektromobilität (NPE). 2016.  
*Wegweiser Elektromobilität: Handlungsempfehlungen der Nationalen Plattform Elektromobilität*.  
Berlin : Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), zuletzt geprüft am 27. Juli 2016.  
Verfügbar: [http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Wegweiser\\_Elektromobilitaet\\_2016\\_web\\_bf.pdf](http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Wegweiser_Elektromobilitaet_2016_web_bf.pdf)
- Popp et al. 2015  
Popp, Julian, Küber, Christian & Brückner, Lissy.  
Anmeldenr.: 102015013040.4.  
*Modulkatalog zur Auswahl wandlungsfähiger Logistikkonzepte*.  
Daimler AG
- Pröpster 2016  
Pröpster, Markus Hubert. 2016.  
*Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus*, zugl. Diss.  
München : Herbert Utz.  
Forschungsberichte IWB; 314.  
ISBN 978-3-8316-4547-3
- REFA 1990  
REFA. 1990.  
*Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme*.  
2. Aufl.  
München : Hanser.  
Methodenlehre der Betriebsorganisation; / REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation.  
ISBN 3-446-15967-3
- Rekiek et al. 2001  
Rekiek, Brahim, de Lit, Pierre, Pellichero, Fabrice, L'Eglise, Thomas, Fouda, Patrick, Falkenauer, Emanuel & Delchambre, Alain. 2001.  
A multiple objective grouping genetic algorithm for assembly line design.  
*Journal of Intelligent Manufacturing* (12), S. 467–485

- Roscher 2008  
Roscher, Jörg. 2008.  
*Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie*, zugl. Diss.  
Stuttgart : Universität Stuttgart.  
DOI: 10.18419/opus-4123
- Rudolf 2007  
Rudolf, Henning. 2007.  
*Wissensbasierte Montageplanung in der digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie*, zugl. Diss.  
München : Utz.  
Forschungsberichte IWB; 204.  
ISBN 978-3-8316-0697-9
- Schenk et al. 2004  
Schenk, Michael & Wirth, Siegfried. 2004.  
*Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 3-540-20423-7
- Schmieder et al. 2005  
Schmieder, Matthias & Thomas, Sven. 2005.  
*Plattformstrategien und Modularisierung in der Automobilentwicklung*.  
Aachen : Shaker.  
Berichte aus der Fahrzeugtechnik.  
ISBN 3-8322-3156-0
- Schmigalla 1970  
Schmigalla, Hans. 1970.  
*Methoden zur optimalen Maschinenanordnung*.  
Berlin : VEB Verlag Technik
- Scholl 1999  
Scholl, Armin. 1999.  
*Balancing and sequencing of assembly lines*, zugl. Diss.  
2. überarb. Aufl.  
Heidelberg, New York : Physica.  
Contributions to management science.  
ISBN 3-7908-1180-7
- Scholl et al. 2010  
Scholl, Armin & Domschke, Wolfgang. 2010.  
*Logistik: Rundreisen und Touren*.  
5. Aufl.  
München : Oldenbourg.  
Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- u. Sozialwissenschaften.  
ISBN 978-3-486-59093-7
- Schuh et al. 2004  
Schuh, G., Harre, J., Gottschalk, S. & Kampker, A. 2004.  
Design for Changeability (DFC), Ergebnisse des EU-Verbundforschungsprojektes „Modular Plant Architecture“.  
*Werkstattstechnik online* 4 (4), S. 100–106
- Seidel 1998  
Seidel, Uwe A. 1998.  
*Verfahren zur Generierung und Gestaltung von Montageablaufstrukturen komplexer Serienerzeugnisse*, zugl. Diss.

- Berlin : Springer.  
IPA-IAO-Forschung und Praxis; 269.  
ISBN 978-3-540-64687-7
- Steinbauer 2012  
Steinbauer, Carola Maria Theres. 2012.  
*Modell zur Konfiguration der Kleinserienmontage: Eine theoretische und empirische Analyse*, zugl. Diss.  
München : Universitätsbibliothek der TU München.  
URN: urn:nbn:de:bvb:91-diss-20120626-1071915-1-9
- Thun 2002  
Thun, Jörn-Henrik. 2002.  
*Die zeitbasierte Fertigungsstrategie: Methoden zur Leistungssteigerung in Industriebetrieben*, zugl. Diss.  
Gabler Edition Wissenschaft.  
Wiesbaden : Dt. Univ.-Verl.  
ISBN 978-3-663-08012-1
- Ulrich 2001  
Ulrich, Hans. 2001.  
*Systemorientiertes Management: Das Werk von Hans Ulrich*.  
Bern, Stuttgart, Wien : Haupt.  
ISBN 3-258-06359-1
- VDI 2860  
VDI 2860. 1990.  
*Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole* : VDI
- VDI 5200  
VDI 5200. 2011.  
*Fabrikplanung - Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Fabrikplanung* : VDI
- Wallentowitz et al. 2009  
Wallentowitz, Henning, Freialdenhoven, Arndt & Olschewski, Ingo. 2009.  
*Strategien in der Automobilindustrie: Technologietrends und Marktentwicklungen*.  
Wiesbaden : Vieweg+Teubner.  
ATZ/MTZ-Fachbuch.  
ISBN 978-3-8348-0725-0
- Weiß 2000  
Weiß, Cornelius. 2000.  
*Methodengestützte Planung und Analyse von Endmontage-  
linien in der Automobilindustrie*, zugl. Diss.  
Karlsruhe : Inst. für Fördertechnik und Logistiksysteme
- Westkämper 2002  
Westkämper, Engelbert. 2002.  
*Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion: Forschungsstrategien, Ergebnisse, Anwendungen ; Forschungskolloquium SFB 467, 16. April 2002, Stuttgart*.  
Stuttgart : Fraunhofer-IRB.  
Forschung im Dialog.  
ISBN 978-3-8167-6128-0

- Westkämper 2004  
Westkämper, Engelbert. 2004.  
Technologiekalender als Instrument der strategischen Planung.  
In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Forschungs- und Technologiemanagement*.  
München : Hanser, S. 149–159.  
ISBN 3-446-22911-6
- Westkämper et al. 2000  
Westkämper, Engelbert, Zahn, E., Balve, P. & Tilebein, M. 2000.  
Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen.  
*Werkstattstechnik* 2000 (1-2), S. 22–27
- Westkämper et al. 2006  
Westkämper, Engelbert, Decker, Markus & Lamine, Jendoubi. 2006.  
*Einführung in die Organisation der Produktion*.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
Springer-Lehrbuch.  
ISBN 13 978-3-540-26039-4
- Westkämper et al. 2009  
Westkämper, Engelbert & Zahn, Erich. 2009.  
*Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 978-3-540-68890-0
- Westkämper et al. 2016  
Westkämper, Engelbert & Löffler, Carina. 2016.  
*Strategien der Produktion: Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis*.  
Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg.  
ISBN 978-3-662-48913-0
- Weyand 2010  
Weyand, Lars. 2010.  
*Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie*, zugl. Diss.  
Saarbrücken : LKF.  
Schriftenreihe Produktionstechnik; 46.  
ISBN 978-3-930429-75-2
- Wiendahl 2003  
Wiendahl, Hans-Peter. 2003.  
*Die wandlungsfähige Fabrik: Integrierte Sicht von Fabrikstruktur, Logistik und Produktionssystemen*, 20. - 21. März 2003 ; Tagungsband ; IFA-Fachtagung 2003.  
Hannover : Univ. Inst. für Fabrikanlagen u. Logistik.  
ISBN 3-00-011241-3
- Wiendahl et al. 2005  
Wiendahl, Hans-Peter, Nofen, Dirk, Klußmann, Jan Hinrich & Breitenbach, Frank. 2005.  
*Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*.

- München : Hanser.  
ISBN 3-446-40045-1
- Wiendahl et al. 2009  
Wiendahl, Hans-Peter, Reichardt, Jürgen & Nyhuis, Peter.  
2009.  
*Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten.*  
München, Wien : Hanser.  
ISBN 978-3-446-22477-3
- Wildemann 1998  
Wildemann, Horst. 1998.  
*Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung.*  
5. überarb. Aufl.  
München : TCW-Transfer-Centrum.  
TCW; 2.  
ISBN 978-3-931511-19-7
- Zeile 1995  
Zeile, Ulrich. 1995.  
*Montagestrukturplanung für variantenreiche Serienprodukte, zugl. Diss.*  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
IPA-IAO - Forschung und Praxis; 207.  
ISBN 978-3-642-47875-8
- Zenner 2006  
Zenner, Christian. 2006.  
*Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung, zugl. Diss.*  
Saarbrücken : LFT Univ.  
Schriftenreihe Produktionstechnik; 37.  
ISBN 978-3-930429-66-0

Diese Arbeit ist durch die taktische Montageplanung in der Automobilindustrie charakterisiert und ist in der Ebene der Produktionssysteme und -zellen angesiedelt.

Ein wachsendes Produktportfolio und kaum prognostizierbare Nachfrageentwicklungen erweisen sich als Herausforderung für die automobilen Endmontage. Eine Analyse ergab, dass bestehende Montagelinien meist nicht dem Standard-Montageablauf folgen. Die Baugruppen der Fahrzeuge können demnach in unterschiedlicher Reihenfolge montiert werden. Die sich daraus ableitende Forschungsfrage lautet: Können fahrzeug- und linienübergreifende Montagemodule bestimmt und Freiheitsgrade in den Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Montagemodulen methodisch für die Planung fahrzeugflexibler Montagelinien genutzt werden?

Die entwickelte Planungsmethode besteht aus acht Planungsbausteinen. Diese dienen primär der fahrzeug- und linienübergreifenden Modularisierung der Montageprozesse. Anschließend werden produktflexible Montagekonfigurationen generiert und bewertet. Basierend auf einer ausgewählten Montagekonfiguration erfolgt abschließend die zeitliche Positionierung der Montagemodule auf der Montagelinie.

