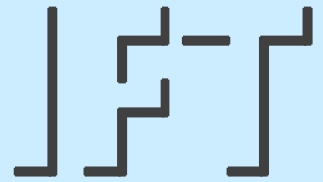


Berichte aus dem

**INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK
UND LOGISTIK**

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K.-H. Wehking

UNIVERSITÄT STUTTGART



Julian Popp

Neuartige Logistikkonzepte für eine flexible Automobilproduktion ohne Band

Februar 2018

**Neuartige Logistikkonzepte
für eine flexible Automobilproduktion
ohne Band**

Von der Fakultät 7: Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der
Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Julian Popp
aus Grünstadt

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Heinz Wehking

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

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Februar 2018

Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart

2018

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	x
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	xi
1 Einleitung	3
1.1 Ausgangssituation	3
1.2 Problemstellung und Motivation	9
1.3 ARENA2036	14
1.4 Ziele der Arbeit	16
1.5 Aufbau der Arbeit	19
2 Stand der Technik in der Automobilproduktionslogistik	21
2.1 Heutiger Stand der Montage in der Automobilindustrie	21
2.1.1 Grundlagen	21
2.1.2 Band und Takt	26
2.1.3 Verlagerung der Wertschöpfung	29
2.1.4 Nacharbeit	30
2.2 Flexible, wandlungsfähige und wandelbare Systeme	31
2.2.1 Flexibilität	31
2.2.2 Wandlungsfähigkeit	32
2.2.3 Wandelbarkeit	34
2.3 Heutige Logistikkonzepte zur Materialbereitstellung in der Automobilproduktion	35
2.3.1 Logistik und Intralogistik	37
2.3.2 Materialfluss	39
2.3.3 Materialsteuerung und Verlauf des Informationsflusses	42
2.3.4 Routenzugkonzepte	47
2.3.5 Crossdocking	49
2.4 Förder-, Lager- und Bereitstelltechnik in der Automobillogistik	50
2.4.1 Stetigförderer	51
2.4.2 Unstetigförderer	53

2.4.3	Förderhilfsmittel	57
2.4.4	Lagertechnik	61
2.4.5	Bereitstelltechnik	63
2.4.6	Technisches Materialflusssystem	67
2.5	Fazit	67
3	Neuartige Logistikkonzepte für eine wandelbare Automobilproduktion der Zukunft	70
3.1	Modulwerk	71
3.2	Matrixmontage	72
3.3	Montage- und Logistik-Groß-FTF	74
3.4	Kleine und mittelgroße FTF: KaTe und Doppelkufen	75
3.5	Erarbeitung der Konzepte	77
3.6	Konzeptbewertung	79
3.6.1	Nutzwertanalyse	80
3.6.2	Bewertung in Bezug auf die Wandlungsbefähiger	82
3.6.3	Fazit der Nutzwertanalyse und Bewertung in Bezug auf die Wandlungsbefähiger	84
3.7	Detaillierte Vorstellung der ausgewählten, neuartigen Konzepte	84
3.7.1	Riegelkonzept	85
3.7.2	Einzel-FTF-Konzept	88
3.7.3	Warenkorb-Konzept	89
3.8	Innovative förder-, lager- und handhabungstechnische Maschinen für die neuartigen Logistikkonzepte	91
3.8.1	Mini-RBG und Riegelgestell	92
3.8.2	Unterfahr-FTF	95
3.8.3	Einzel-FTF-Gestell	96
3.8.4	Warenkorb-Gestell	97
3.8.5	Neuartige Ladungsträger	98
3.9	Vernetzte Logistik als Steuerungssystem des Materialflusses	99
3.10	Fazit	101
4	Untersuchung der neuen Konzepte mit Hilfe von Simulationen	104
4.1	Übersicht der drei Simulationsstudien	104

4.2	Beschreibung der Simulationsszenarien	106
4.3	Sondersituation große Bauteile	108
4.4	Prüfen der möglichen Weiterverwendbarkeit bisheriger Simulationsmodelle .	109
4.5	Grundlagen von Simulationen	109
4.5.1	Ablauf einer Simulationsstudie	110
4.5.2	Modellarten	112
4.5.3	Phasen einer Simulationsstudie	114
4.5.4	Regelkreis der Modellnutzung	117
4.5.5	Simulationsprogramme	118
4.6	Simulationsdaten	120
4.7	Simulation einer Türenvormontage	121
4.7.1	Aufbau des Simulationsmodells	122
4.7.2	Konzeptauswahl	123
4.7.3	Überblick über die vier Bereitstellungsnetzwerke	124
4.7.4	Randbedingungen	125
4.7.5	Auftragserstellung	128
4.7.6	Bauteilbenennung	129
4.7.7	Simulationsmodell des Montagenetzwerks der Türenvormontage . . .	130
4.7.8	Montageablauf	131
4.7.9	Beschreibung der Bereitstellnetzwerke	131
4.7.10	Untersuchungsgegenstände	145
4.7.11	Durchführung der Simulationsläufe	146
4.7.12	Ergebnisse und Auswertung	147
4.7.13	Simulation von Störfällen	149
4.7.14	Durchführung der Störfall-Simulation	149
4.7.15	Ergebnisse der Störfall-Simulation	150
4.8	Simulation einer Endmontagelinie	151
4.8.1	Randbedingungen	152
4.8.2	Auftragserstellung, Bauteilbenennung und Konzeptauswahl	153
4.8.3	Untersuchungsgegenstände	153
4.8.4	Durchführung der Simulationsläufe	154
4.8.5	Ergebnisse und Auswertung	156

4.9	Simulation einer Montage in Matrixform	157
4.9.1	Produktionsmodell	158
4.9.2	Simulationsmodell einer Montage in Matrixlayout	161
4.9.3	Randbedingungen	163
4.9.4	Auftragserstellung, Bauteilbenennung und Konzeptauswahl	163
4.9.5	Untersuchungsgegenstände	163
4.9.6	Durchführung der Simulationsläufe	164
4.9.7	Ergebnisse und Auswertung	165
4.10	Verifikation und Validierung	167
4.11	Diskussion der Ergebnisse	168
4.12	Fazit der Simulationsstudien	169
5	Fazit und Ausblick	171
A	Anhang	174
A.1	Tabellen mit KLT-Maßen	174
A.2	Weitere Ansicht des Riegelsystems	175
A.3	Detailbeschreibung Kriterien Nutzwertanalyse	176
A.4	Beschreibung der Benutzeroberfläche von Plant Simulation	178
A.5	Bereitstellungsnetzwerke der Endmontage	179
A.6	Konzeptauswahl bei der Simulation der Matrixmontage	181
	Literatur	182

Abbildungsverzeichnis

1.1	Weltweite PKW-Absatzzahlen in den Jahren 1998, 2010 und 2014 nach Hersteller (eigene Darstellung, basierend auf Daten der OICA)	4
1.2	Fahrzeugmodelle des Herstellers Audi (eigene Darstellung, basierend auf Daten von Audi siehe Audi AG (2016))	7
1.3	Produktion VW Käfer 1973 (Quelle: Schaack (1973))	13
1.4	Fokusbereich der Arbeit (eigene Darstellung)	18
1.5	Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)	20
2.1	Zusammenhang der Gewerke in Anlehnung an Ihme (2006), S. 11 und Sillekens u. a. (2011), S. 4	23
2.2	Vormontage am Beispiel der Tür in Rund-, U- bzw. Ovalform in Anlehnung an Richter (2006), S. 191	24
2.3	Hängebahn zur Rädermontage bei Porsche im Werk in Leipzig (Quelle: Porsche AG (2016))	26
2.4	Interieurlinie mit Schubplattformen bei Porsche im Werk in Leipzig (Quelle: Porsche AG (2016))	27
2.5	Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an Spath (2008), S. 12	33
2.6	Fest verkettetes Montagewerk (eigene Darstellung)	35
2.7	Unternehmenslogistik in Anlehnung an Pfohl (2004) sowie Mathar und Scheuring (2012), S. 6	38
2.8	Materialfluss in der Automobilindustrie in Anlehnung an Boysen u. a. (2015), S. 109	39
2.9	Spannungsfeld der Materialversorgung in Anlehnung an Kampker (2014), S. 246	41
2.10	Bedarfssteuerung in Anlehnung an Große-Heitmeyer (2004), S. 69 nach Abels (2016), Folie 7	42
2.11	Verbrauchssteuerung in Anlehnung an Große-Heitmeyer (2004), S. 69 nach Lödding (2001), S. 27	43
2.12	JIS-Prinzip in Anlehnung an VDA-Empfehlung 5010 (2008), S. 13	45
2.13	Routenzugkonzept (eigene Abbildung)	48
2.14	Einstufiges Crossdocking in Anlehnung an ten Hompel und Schmidt (2005), S. 71	50
2.15	Routenzug (eigene Aufnahme)	54
2.16	Fahrwerksvarianten von FTF (Quelle: VDI 2510 (2005), S. 16	56
2.17	KLT (Quelle: SSI-Schäfer (2016))	58
2.18	Gitterbox (Quelle: SSI-Schäfer (2017b))	60

2.19 AKL (Quelle: SSI-Schäfer (2014))	63
2.20 Durchlaufregal (Quelle: SSI-Schäfer (2017a))	65
2.21 Warenkorb (Quelle: Daimler (2015))	66
3.1 Modulwerk für die zukünftige Automobilproduktion	71
3.2 Anordnung von Prozessmodulen im Matrixlayout nach Foith-Förster und Bauernhansl (2015), S. 389	73
3.3 Montage- und Logistik-Groß-FTF mit Unterboden und Werkern	75
3.4 Beispielhafte Materialanlieferung zum Montage- und Logistik-Groß-FTF	76
3.5 Kleine und mittelgroße FTF	77
3.6 Zehn Grundkonzepte für die Materialbereitstellung	79
3.7 Riegelkonzept (eigene Darstellung)	87
3.8 Detailansicht Riegelkonzept (eigene Darstellung)	88
3.9 Einzel-FTF-Konzept (eigene Darstellung)	89
3.10 Warenkorb-Konzept (eigene Darstellung)	91
3.11 Mini-RBG auf FTF und Riegelgestell sowie Unterfahr-FTF (eigene Darstellung)	93
3.12 Zwei Riegelgestelle mit Mini-RBG auf Schienen (eigene Darstellung)	94
3.13 Leeres Riegelgestell mit Rollen (eigene Darstellung)	95
3.14 Riegelgestell-FTF bzw. Unterfahr-FTF (eigene Darstellung)	96
3.15 Einzel-FTF-Gestell mit KLT und Unterfahr-FTF (eigene Darstellung)	97
3.16 Warenkorb-Gestell mit KLT und Unterfahr-FTF (eigene Darstellung)	98
3.17 Konzept für eine vernetzte Logistik mit CPS	101
4.1 Unterscheidung von Modellen in Bezug auf die Darstellung der Zeit in Anlehnung an Sommer (2015), S. 67 nach Shannon (1975), S. 7	112
4.2 Unterscheidung von Modellen in Bezug auf das Abbildungsmedium nach Haun (2014), S. 42 f.	113
4.3 Unterscheidung von Modellen in Bezug auf die Zustandsübergänge in Anlehnung an VDI 3633 (2013), S. 17 und Elmqvist u. a. (1993), S. 31	114
4.4 Vorgehensmodell bei einer Simulation nach Rabe u. a. (2008), S. 5 und VDI 3633-1 (2000), S. 11	115
4.5 Methodik der Modellnutzung in Anlehnung an Kuhn (1993), S. 1 und Hrdliczka u. a. (1997), S. 3 sowie Sauerbier (1999), S. 9	118
4.6 Zuordnung von Simulationsebene und Simulationsprogrammen, aktualisiert in Anlehnung an Kuhn (1993), S. 291 ff. Noche (2006), S. 10 und Eley (2012), S. 10 nach Wenzel (2000), S. 9	119
4.7 Übersicht des Montagenetzwerks im Simulationsmodell der Türenvormontage	123

4.8	Überblick der vier Bereitstellungsnetzwerke	126
4.9	Weglängen in der Türenvormontage mit 14 Stationen (eigene Darstellung)	128
4.10	Detailansicht Bauteil	130
4.11	Übersicht des Montagenetzwerks der Türenvormontage	131
4.12	Bereitstellnetzwerk des Einzel-FTF-Konzepts im Simulationsmodell	132
4.13	Detailansicht Bereich B des Einzel-FTF-Konzepts	133
4.14	Detailansicht Bereich A des Einzel-FTF-Konzepts	134
4.15	Bereitstellnetzwerk des Riegelkonzepts im Simulationsmodell	135
4.16	Detailansicht Bereich B des Riegelkonzepts	136
4.17	Detailansicht Bereich A des Riegelkonzepts	137
4.18	Flussdiagramm Erstbelieferung Riegelkonzept	139
4.19	Bereitstellnetzwerk des Warenkorb-Konzepts im Simulationsmodell	140
4.20	Detailansicht Bereich B des Warenkorb-Konzepts	141
4.21	Detailansicht Bereich A des Warenkorb-Konzepts	142
4.22	Bereitstellnetzwerk des Gitterbox-Konzepts im Simulationsmodell	143
4.23	Detailansicht Bereich B des Gitterbox-Konzepts	144
4.24	Detailansicht Bereich A des Gitterbox-Konzepts	145
4.25	Belieferte Konzepte je Station bei den Szenarien der Türenvormontage	147
4.26	Weglängen in der Endmontage mit 50 Stationen (eigene Darstellung)	153
4.27	Belieferte Konzepte je Station bei den Szenarien der Endmontage	155
4.28	Ansicht der Montagepfade in Matrixanordnung	160
4.29	Übersicht des Montagenetzwerks im Simulationsmodell der Matrixmontage	162
4.30	Belieferte Konzepte je Station bei den Szenarien der Matrixmontage	165
A.1	Beladenes Riegelgestell und Unterfahr-FTF (eigene Darstellung)	175
A.2	Ansicht der Benutzeroberfläche von Plant Simulation (eigene Darstellung)	178
A.3	Bereitstellungsnetzwerk des Einzel-FTF-Konzepts im Simulationsmodell der Endmontage	179
A.4	Bereitstellungsnetzwerk des Riegelkonzepts im Simulationsmodell der Endmontage	179
A.5	Bereitstellungsnetzwerk des Gitterbox-Konzepts im Simulationsmodell der Endmontage	180
A.6	Bereitstellungsnetzwerk des Warenkorbkonzepts im Simulationsmodell der Endmontage	180

Tabellenverzeichnis

1	Nutzwertanalyse der neuartigen Logistikkonzepte, entstanden in der Logistikarbeitsgruppe in ARENA2036 (detaillierte Erläuterung im Anhang siehe A.3)	81
2	Bezeichnungen der drei bestbewerteten, neuartigen Logistikkonzepte	82
3	Bewertung der neuartigen Logistikkonzepte in Bezug auf die Wandlungsbefähiger	84
4	Gegenüberstellung der Produktionsmenge zum Beweis der Umsetzbarkeit bei der Simulationsstudie der Türenvor- und Endmontage	105
5	Gegenüberstellung der Produktionsmenge zum Beweis der Umsetzbarkeit bei der Simulationsstudie der Montage im Matrixlayout	106
6	Untersuchungsszenarien in der Simulationsstudie der Türenvormontage	108
7	Ausschnitt aus der Konzepttabelle der Türenvormontage	124
8	Ausschnitt aus der Auftragsliste der Türenvormontage	129
9	Durchsatz der Türenvormontage auf Basis der Daten (Stand heute)	146
10	Auswertung der benötigten Betriebsmittel für den Materialfluss in der Türenvormontage	148
11	Konzepttabelle für die Simulation von Störfällen	150
12	Durchsatz der Endmontage auf Basis der Daten	154
13	Untersuchungsszenarien in der Simulationsstudie der Endmontage	154
14	Auswertung der benötigten Betriebsmittel für den Materialfluss in der Endmontage	157
15	Theoretischer Durchsatz der Matrixmontage	164
16	Untersuchungsszenarien in der Simulationsstudie der Matrixmontage	164
17	Auswertung der benötigten Betriebsmittel für den Materialfluss in der Matrixmontage	166
18	VDA R-KLT-System (Quelle: VDA4500)	174
19	VDA RL-KLT-System (Quelle: VDA4500)	174
20	VDA F-KLT-System (Quelle: VDA4500)	174
21	Ausgewählte Logistikkonzepte für die Simulation der Matrixmontage	181

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

1PL	First-Party Logistics Provider
2PL	Second-Party Logistics Provider
3PL	Third-Party Logistics Provider
4PL	Fourth-Party Logistics Provider
aHRL	automatische(s) Hochregallager
AKL	automatisches Kleinteilelager
ARENA2036	Active Research Environment for the Next generation of Automobiles 2036
CASE	Computer Aided Software Engineering
CKD	Completely knocked down
CPS	cyber-physische Systeme
DigitPro	Digitaler Prototyp
EHB	Elektrohängebahn
FlexProLog	flexible Produktionslogistik
ForschFab	Forschungsfabrik
FTF	fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	fahrerlose Transportsysteme
HRL	Hochregallager
IAO	Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
IFOY	International Forklift Truck of the Year
IFT	Institut für Fördertechnik und Logistik
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
ISO	International Organization for Standardization
JIRT	Just-in-real-time
JIS	Just-in-sequence
JIT	Just-in-time
KaTe	kleine autonome Transporteinheiten
Khoch3	Kreativität, Kooperation, Kompetenztransfer
KLT	Kleinladungsträger
LeiFu	Intelligenter Leichtbau mit Funktionsintegration
LeitFlexPro	Leitfaden für flexible Produktionslogistik
LLP	Lead Logistics Provider
MDI	Multiple Document Interface

MKD	Medium knocked down
OEM	Original Equipment Manufacturer
PKW	Personenkraftwagen
PM	Prozessmodul
PPS	Produktionsplanung- und Steuerung
PSA	Peugeot, Citroën und DS Automobiles
RBG	Regalbediengerät
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
SKD	Semi knocked down
SLT	Sonderladungsträger
TPS	Toyota-Produktionssystem
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer
ULT	Universalladungsträger
VDA	Verband der Automobilindustrie
WMS	Warehousemanagementsystem

Abstract

In this work new logistics concepts for automotive production in the premium segment are elaborated, assessed and simulated. In the introduction, today's challenges in the premium automotive market and their effects on logistics processes are presented. While new production concepts have been brought up recently due to production challenges, the logistics is lacking further development. Therefore new logistics concepts for production environments in the automotive industry are at the focus of this thesis.

The development of the new logistics concepts presented in this work used expert interviews and on-site surveys in production plants and logistics warehouses as input. Based on problem analysis and future requirements, the conceptual designing of new logistic concepts for the inbound material flow was undertaken. The results were 10 new concepts that were ranked using utility analysis and versatile analysis. The three top rated concepts, named "rack-concept", "AGV-concept" and "car-set-concept", were chosen for further detailing. Before analysing the three new concepts using simulation studies, the necessary operating resources for initial operation are explained.

The three concepts were simulated in discrete event simulation by use of a software plant simulation, to show their functionality for production logistics. To enhance the significance of the simulation, not only real production data was used but three simulation studies (pre-assembly, final assembly and assembly in the matrix layout) were performed. Whereas the first study is simulating the situation in a pre-assembly for doors, the second study has a final assembly line in focus. The third study uses a model of a production in matrix layout.

The results of the three simulation studies show that the three new concepts, taking into account the metal box concept for large volume parts, were able to supply the necessary material to produce the target number of doors and cars. The proof of feasibility for the concepts is therefore demonstrated by achieving the planned production quantity in the simulation runs. At the same time, the necessary amount of logistics utilities is determined in the simulation runs.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden neuartige Logistikkonzepte für die Automobilproduktion im Premiumsegment entwickelt und präsentiert. Im Vorfeld werden die Herausforderungen der heutigen deutschen Premiumhersteller von Automobilen beleuchtet und in Bezug auf die logistischen Auswirkungen analysiert. Darauf aufbauend werden neuartige Produktionskonzepte erarbeitet, die Ansätze für die Herausforderungen der Premiumhersteller liefern können. Auf Grundlage dieser neuartigen Produktionskonzepte und den Erkenntnissen von Expertenbefragungen und Ist-Aufnahmen in Produktionswerken und Logistikzentren werden im Rahmen dieser Arbeit neue Logistikkonzepte für den Fluß des Produktionsmaterials entwickelt, die zur Lösung der aktuellen Herausforderungen der Premiumhersteller genutzt werden können. Das Ergebnis sind 10 neue Konzepte, die über Nutzwertanalyse und Bewertung in Bezug auf Wandlungsbefähiger in eine Rangfolge gebracht werden. Die drei besten Konzepte werden für die weitere Detaillierung ausgewählt. Dies sind das Riegelkonzept, das Warenkorb- und das Einzel-FTF-Konzept. Bevor in Simulationsstudien eine Untersuchung dieser drei Konzepte stattfindet, werden die für eine Umsetzung der neuartigen Konzepte notwendigen Betriebsmittel präsentiert.

Abschließend werden die neuartigen Logistikkonzepte, unter Verwendung von Originaldaten, in drei Simulationsstudien untersucht und in Bezug auf Ihre Umsetzbarkeit geprüft. Während die erste Studie die Situation in einer Türenvormontage simuliert, hat die zweite Studie eine Endmontage mit Fließband im Fokus. Die dritte Studie nutzt das Modell einer Produktion im Matrixlayout. Der Beweis der Umsetzbarkeit der Konzepte kann in den Simulationsläufen durch das Erreichen der geplanten Produktionsmenge in vier unterschiedlichen Szenarien gezeigt werden. Gleichzeitig wird in den Simulationsläufen die jeweils notwendige Anzahl an logistischen Betriebsmitteln bestimmt. Das abschließende Ergebnis der drei Simulationsstudien ist der Beweis für die Funktionalität der neuartigen Konzepte, teilweise unter Verwendung des Gitterbox-Konzepts für großvolumige Bauteile.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Das Produkt Automobil bietet für die Forschung im Bereich der Logistik aufgrund großer Produktionszahlen und hoher Komplexität besondere Herausforderungen. Die Komplexität besteht aus Sicht der Logistik besonders in der großen Zahl an Einzelteilen, ca. 20.000 bis 40.000¹ pro Fahrzeug und den unterschiedlichen Materialien, mit ihren jeweils speziellen Anforderungen, aus denen ein Auto heute besteht.² Gleichzeitig gilt allgemein, insbesondere im Bereich der Produktion, die Bestrebung nach möglichst kostengünstiger Logistik³ mit geringen Beständen, der Fachbegriff dafür lautet lean logistics.⁴

Weiterhin stellt die gesamte Automobilindustrie in Deutschland laut Verband der Automobilindustrie (VDA) einen der wichtigsten Wirtschaftszweige dar.⁵ Besonders deutlich zeigt dies der Blick auf die Umsatzzahlen der einzelnen Wirtschaftsbereiche: Im Jahr 2014 war der Kraftfahrzeugbau mit einem Umsatz von 370 Mrd. Euro der stärkste Wirtschaftszweig der Industriebranche, gefolgt vom Maschinenbau mit 230 Mrd. Euro und der chemisch-pharmazeutischen Industrie mit 190 Milliarden Euro.⁶ Die Umsatzzahlen stehen auch für eine große Zahl an Beschäftigten in der Automobilindustrie, beispielsweise im Jahr 2015 insgesamt 792.500 Personen.⁷ Werden auch die Zulieferunternehmen mit in die Rechnung einbezogen, dann sind 1,7 Mio. Arbeitsplätze in Deutschland mit der Automobilindustrie verbunden.⁸ Zusätzlich ist Deutschland Exportweltmeister⁹ bei der Ausfuhr von Automobilen, im Jahr 2015 mit einer Summe von 190 Mrd. Euro.¹⁰ Danach folgen Japan mit 120 Mrd. Euro und die USA mit 110 Mrd. Euro.¹¹ Diese Zahlen verdeutlichen aber auch eine starke Abhängigkeit des deutschen Arbeitsmarkts vom weltweiten Automobilabsatz und somit auch vom Wohlergehen der deutschen Automobilhersteller. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass in der vorliegenden Arbeit nur auf die produzierten Personenkraftwagen (PKW) der Kraftfahrzeughersteller und nicht auf Nutzfahrzeuge oder Krafträder eingegangen wird.

⁰ Die vollständige Quellenangabe ist jeweils dem Literaturverzeichnis am Ende der Arbeit zu entnehmen.

¹ Die Zahlen variieren je nach Auto, liegen im Mittel aber in diesem Bereich, siehe Ihme (2006), S. 10 sowie Kleinhenz u. a. (2006), S. 16 und Klug (2011), S. 60 und Lawrenz (2001), S. 262.

² Vgl. Mößmer u. a. (2007), S. 14, Diez u. a. (2016), S. 7 sowie Ohno (2009), S. 35.

³ Dörnhöfer präsentiert in zwei Veröffentlichungen ein Kennzahlensystem für die Bewertung von schlanker Logistik im Umfeld der Automobilindustrie: Dörnhöfer und Günthner (2015), S. 710 f. sowie Dörnhöfer (2016).

⁴ Vgl. Klug (2008), S. 57, 60 und Althoff (2010), S. 80 ff. sowie Günthner und Boppert (2013).

⁵ Vgl. VDA (2010), S. 18 und Diez u. a. (2016), S. 7 f.

⁶ Vgl. Statista (2016a) sowie Statista (2016b).

⁷ Vgl. VDA (2016), S. 15.

⁸ Vgl. Gehr und Hellingrath (2007), S. VII.

⁹ Vgl. VDA (2016), S. 42.

¹⁰ Vgl. VDA (2016), S. 42.

¹¹ Vgl. eurostat (2017).

Im Rahmen der Globalisierung haben asiatische Kraftfahrzeughersteller¹² ihre Absatzzahlen bei PKWs seit 1998 weltweit ausgebaut, siehe hierzu Abbildung 1.1.¹³ Besonders deutlich wird die Entwicklung an den Zahlen des Herstellers Hyundai, dessen Absatz von ca. 990.000 Fahrzeugen im Jahr 1998 auf 7,6 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2014 anstieg, während Hersteller wie Ford, Daimler sowie Peugeot, Citroën und DS Automobiles (PSA) kaum Zuwachsraten erzielen konnten.¹⁴

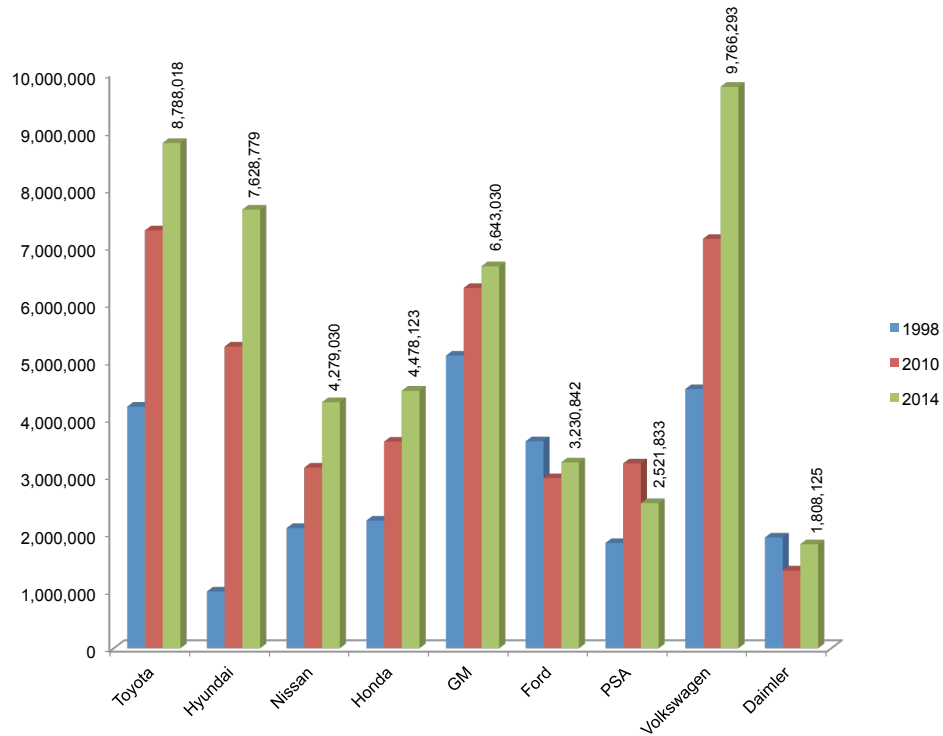


Abbildung 1.1: Weltweite PKW-Absatzzahlen in den Jahren 1998, 2010 und 2014 nach Hersteller (eigene Darstellung, basierend auf Daten der OICA)

Die weltweite Entwicklung der Absatzzahlen der asiatischen KFZ-Hersteller hat sich in ähnlichem Ausmaß sowohl auf ganz Europa als auch auf Deutschland übertragen.¹⁵ Beispielhaft stieg hierzulande der Anteil ausländischer Fahrzeugmarken in Bezug auf die Neuzulassungen von 9,7 % im Jahr 1960 auf über 30 % im Jahr 2005 an.¹⁶ Die asiatischen Hersteller¹⁷ konnten diese höheren Absatzzahlen durch preisgünstige Modelle mit hohem Qualitätsni-

¹² Kraftfahrzeughersteller werden häufig auch als Original Equipment Manufacturer (OEM) bezeichnet. (Vgl. Wittek (2013), S. 2) Als OEM sind in diesem Zusammenhang Hersteller aufzufassen, die unter einem Markennamen und mit Gesamtverantwortung Fahrzeuge, bestehend aus selbst gefertigten und fremd bezogenen Komponenten, auf dem Markt anbieten. (Vgl. Grünert (2010), S. 63).

¹³ Vgl. Diez u. a. (2016), S. 83 und Becker (2006a), S. 11 und 15 f.

¹⁴ OICA (1998), OICA (2010) und OICA (2014)

¹⁵ Vgl. Becker (2007), S. 16.

¹⁶ Vgl. Becker (2007), S. 16.

¹⁷ Dabei waren es zuerst die Hersteller aus Japan später auch aus Korea. Interessant in Bezug auf die Anteile der asiatischen Hersteller ist die Tatsache, dass bis zum Jahr 2000 eine Importbeschränkung für japanische Fahrzeuge in die EU bestand, die von den Herstellern durch den Aufbau von eigenen Werken in der EU jedoch umgangen wurde. (Vgl. Becker (2007), S. 16).

veau¹⁸, auf Basis von niedrigeren Lohnkosten und effizienten Produktionsprinzipien¹⁹, verbunden mit einem großen Maß an Grundausstattung ihrer Fahrzeuge, erreichen.²⁰ Als Reaktion auf diese Entwicklung haben sich bei den Automobilherstellern zwei unterschiedliche Produktstrategien durchgesetzt. Zum einen die Fokussierung auf das Premiumsegment und zum anderen die Fokussierung auf den Volumenmarkt.²¹ Die Hersteller im Premiumsegment zielen dabei mit ihrer Produktion „build-to-order“²² auf individuell nach Kundenwunsch²³ gefertigte Fahrzeuge²⁴ ab, die zu einem höheren Preis angeboten werden und damit größere Margen²⁵ ermöglichen.²⁶ Außerdem hebt sich ein Premiumhersteller durch seine Technologien und Qualität sowie häufig durch den Kundenservice von den Konkurrenten ab.²⁷ Die Hersteller im Volumenmarkt hingegen versuchen, sowohl durch effizientere Produktionsprozesse auf Basis einer niedrigen Zahl von Ausstattungsvarianten, bezeichnet als „build-to-stock“, als auch unter Verwendung von Skaleneffekten²⁸ im Einkauf ihre Fahrzeuge kostengünstiger zu produzieren.²⁹

Die deutschen Premiumhersteller entschieden sich für die erste Strategie und damit verbunden für eine immer stärkere Individualisierung und eine weitere Differenzierung des Fahrzeugspektrums.³⁰ Da besonders im Premiumsegment die Kundenpräferenzen und die Nachfragesituation entscheidend für die weitere Entwicklung eines Herstellers ist, müssen die deutschen Hersteller ständig auf Änderungen im Käuferverhalten in Bezug auf Modell- und Ausstattungswünsche sowie Kaufzeitpunkte reagieren.³¹ Deshalb konzentrieren sich die Hersteller mit ihren Produktionsstrategien auf build-to-order.³² Die von einem Premiumhersteller gefertigten Fahrzeuge befinden sich im oberen Preissegment und gehören meist zur oberen Mittelklasse bis hin zur Luxusklasse.³³ Passend zur Produktfokussierungsstrategie bietet

¹⁸ Vgl. Rinza und Boppert (2007), S. 17.

¹⁹ Vgl. Rinza und Boppert (2007), S. 17.

²⁰ Vgl. Becker (2007), S. 16 sowie Mößmer u. a. (2007), S. 4.

²¹ Vgl. Kirstein (2009), S. 13 und Diez (2005), S. 124 ff.

²² Der Begriff build-to-order bezeichnet die Produktion eines Produkts genau nach den Wünschen eines Kunden. (Vgl. Parry (2008), S. 35 ff. und Holweg und Pil (2004), S. 11).

²³ Der Frage nach Kundenwünschen und der Notwendigkeit einer Vielzahl von Optionen wird beispielsweise in Squire u. a. (2004), S. 460 f. diskutiert.

²⁴ Eine derartige Produktion von individuell gefertigten Massenprodukten wird auch als mass customization bezeichnet. (Vgl. Davis (1988), S. 205 und Volling (2009), S. 10).

²⁵ Laut Güttner und Sommer-Dittrich sowie Diehlmann ist es charakteristisch für einen Premiumhersteller höhere Gewinnspannen für ein Produkt mit vergleichbaren Funktionen und demnach ähnlichem technischen Gebrauch zu erzielen. (Vgl. Parry (2008), S. 56 und Diehlmann und Häcker (2010), S. 68) Dies führt zu Preisauflagen bis ca. 35 % gegenüber vergleichbaren Modellen anderer Hersteller im gleichen Segment. (Vgl. Köth (2010), S. 22).

²⁶ Vgl. Güttner und Sommer-Dittrich (2008), S. 56.

²⁷ Vgl. Diez (2005), S. 127.

²⁸ Skaleneffekte (engl. Economies of Scale) sind Kostensenkungen, die aufgrund von Anstiegen der Produktionslose und der Betriebsgrößen entstehen. (Vgl. Rennemann (2007), S. 14) Zunehmende Skalenerträge haben einen überproportionalen Anstieg des Produktionsoutputs in Relation zum Input bzw. Ressourcenaufwand zur Folge. (Vgl. Söllner (2008), S. 13).

²⁹ Vgl. Rinza und Boppert (2007), S. 17 f.

³⁰ Vgl. Mößmer u. a. (2007), S. 4 und Rennemann (2007), S. 9.

³¹ Vgl. Götz (2007), S. 17.

³² Vgl. Güttner und Sommer-Dittrich (2008), S. 56 und Kuhn und Hellingrath (2002), S. 163.

³³ Vgl. Diehlmann und Häcker (2010), S. 74.

ein Premiumhersteller grundsätzlich eine hohe Anzahl an Konfigurationsmöglichkeiten an, während ein Volumenhersteller nur eine begrenzte Auswahl an Modellvarianten und Zusatzausstattung aufweist.³⁴

Die im Jahr 2007 durch Zahlungsausfälle ausgelöste Finanzkrise übertrug sich ab dem Jahr 2008 auch auf die Realwirtschaft.³⁵ Die Auswirkungen dieser Wirtschaftskrise in der weltweiten Automobilindustrie waren Produktionsrückgänge um 10,4 % im Jahr 2009.³⁶ Besonders betroffen war die Automobilproduktion in den USA, die um 52 % von 10,8 Mio. Einheiten im Jahre 2008 auf 5,7 Mio. Einheiten im Jahre 2009 einbrach.³⁷ Aber auch die Fahrzeugbranche in Europa hat starke Rückgänge bei den produzierten Einheiten erlebt, teilweise (Spanien, Italien und Schweden) bis zu 35 % zwischen November 2007 und November 2008.³⁸ Dies hat zu einem Umdenken bei den großen Automobilherstellern geführt. Die Etablierung von flexiblen Produktionsnetzwerken mit skalierbaren Montagevorgängen und dazu passende Montagestationen mit hoher Wandlungsfähigkeit³⁹ wurde nun gefordert.⁴⁰

Die deutschen Automobilhersteller, die besonders häufig Premiumhersteller sind, namentlich Mercedes-Benz, BMW und Audi, stehen im Fokus dieser Arbeit.⁴¹ So wurden im Jahr 2010 80 % der weltweit verkauften Premiumfahrzeuge von deutschen Herstellern produziert.⁴² Dabei gelten für die deutschen Premiumhersteller folgende Rahmenbedingungen: Um die Produktionsstätten in Deutschland, trotz des höheren Lohnniveaus, verglichen mit osteuropäischen oder asiatischen Ländern, rentabel betreiben zu können, müssen in der Produktion effizientere Prozesse⁴³ zum Einsatz kommen und höhere Auslastungsgrade⁴⁴ der Mitarbeiter erreicht werden.⁴⁵ Im Umkehrschluss wird klar, dass ausländische Werke der Premiumhersteller trotz ineffizienter Prozesse, auf Basis der niedrigeren Lohnniveaus, auch noch einige Jahre länger wirtschaftliche Unternehmensergebnisse erzielen können.⁴⁶ Hiergegen müssen die Premiumhersteller mit Produktionswerken in Deutschland ständig effizientere Prozesse und höhere Auslastungsgrade⁴⁷ der Mitarbeiter erreichen, um die deutschen Standorte erhalten zu können.⁴⁸

³⁴ Vgl. Günthner (2007), S. 68.

³⁵ Vgl. Diez u. a. (2016), S. 16.

³⁶ Vgl. Hofmann u. a. (2011), S. 2 f. sowie OICA (2016)

³⁷ Vgl. Dörmer (2013), S. 8.

³⁸ Vgl. Rémond-Tiedrez (2009), S. 10.

³⁹ Der Begriff Wandlungsfähigkeit bezeichnet die Anpassbarkeit eines Systems außerhalb eines vordefinierten Rahmens, eine detaillierte Definition findet sich in Kapitel 2.2.2

⁴⁰ Vgl. Pfeiffer (2008), S. 143.

⁴¹ Vgl. Becker (2006a), S. 9.

⁴² Vgl. VDA (2010), S. 20.

⁴³ Vgl. Nof u. a. (2006), S. 55.

⁴⁴ Die operative Auslastung einer Montagestation ergibt sich anhand der Division des Produktionsvolumens durch die Produktionskapazität. Weitere Angaben zur Berechnung der Auslastung einer Montagelinie finden sich in Roscher (2008), S. 80 f.

⁴⁵ Vgl. Götz (2007), S. 17 sowie Sinn (2005), S. 5 und Deloitte (2014), S. 13

⁴⁶ Vgl. Rinza und Boppert (2007), S. 17.

⁴⁷ Vgl. Nof u. a. (2006), S. 55.

⁴⁸ Laut Gairing lag im Jahr 2009 die durchschnittliche Auslastung der weltweiten Automobilwerke bei ca. 63 % während jedoch erst ab einem Auslastungsgrad von 75 % wirtschaftlich rentabel produziert werden kann. Vgl. Gairing (2009), S. 75.

Die zuvor beschriebene Individualisierung der Fahrzeuge der Premiumhersteller hin zu einer build-to-order-Produktionsweise wird in zwei unterschiedlichen Arten umgesetzt, einerseits mit Modellvarianten- und -reihen⁴⁹ und andererseits mit dem Angebot von unterschiedlichen Ausstattungsoptionen. Als Beispiel für die Umsetzung bei den Fahrzeugmodellen ist in der Abbildung 1.2 das Modellspektrum des Fahrzeugherstellers Audi über den Verlauf der letzten Jahre dargestellt.

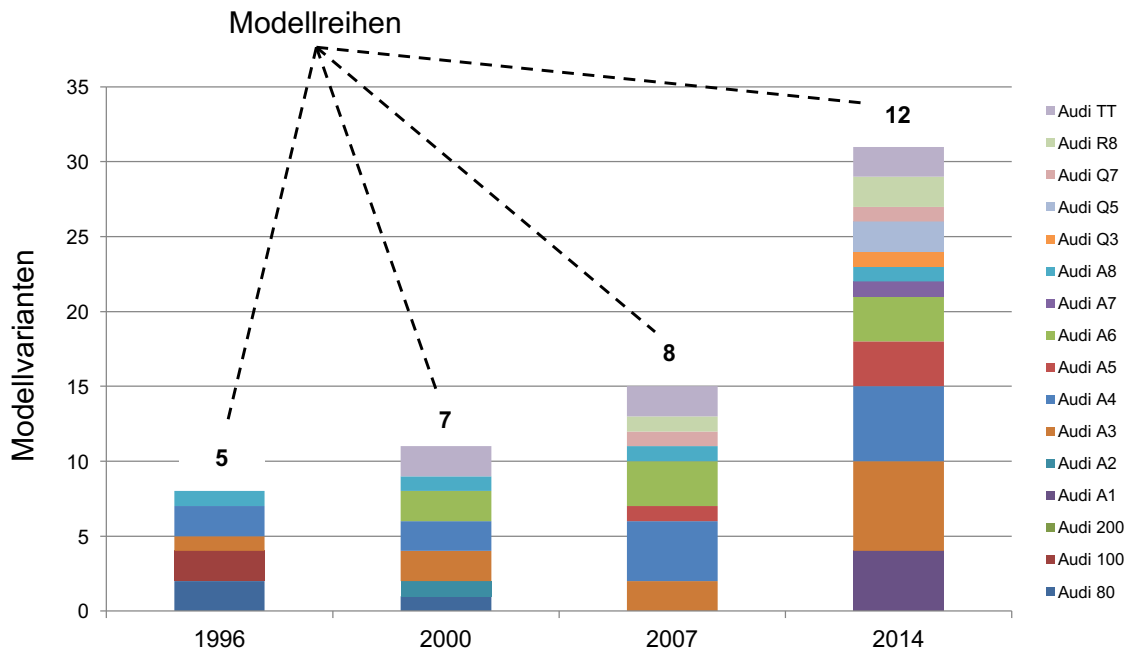


Abbildung 1.2: Fahrzeugmodelle des Herstellers Audi (eigene Darstellung, basierend auf Daten von Audi siehe Audi AG (2016))

Während die gesamte Anzahl der Modellvarianten auf der Ordinate abzulesen ist, findet sich die Verteilung für bestimmte Zeitpunkte in den letzten 20 Jahren auf der Abszisse. Die Angaben für die Modellreihen sind immer über den Säulen abgedruckt, jede Farbe in einer Säule stellt eine Modellreihe dar. Die Anzahl der Modellreihen (siehe die Zahl über den Jahressäulen) ist dabei von fünf (Audi 80, Audi 100, A3, A4 und A8) im Jahre 1996 auf 12 (A1, A3, A4, A5, A6, A7, A8, Q3, Q5, Q7, R8, und TT) im Jahre 2014 angestiegen. Gleichzeitig zum Anstieg der Modellreihen hat die Anzahl der Modellvarianten (z. B. A4 Limousine, A4 RS4, A4 allroad, A4 Kombi) zugenommen. Besonders deutlich erkennbar ist der Anstieg der Modellvarianten bei den drei unteren Abschnitten des Säulendiagramms im Jahr 2014, im Vergleich zu den Vorjahren. Die dargestellte Entwicklung findet sich jedoch nicht nur bei Audi sondern auch bei anderen Premiumherstellern.⁵⁰ Unter dem Dach der BWM Group mit ihren

⁴⁹ Eine (Fahrzeug-)Modellreihe ist beispielsweise der VW Golf mit den (Fahrzeug-)Modellvarianten Golf, Golf GTI, Golf R32, Golf Plus, Golf Variant und Golf Cabriolet. (Vgl. Esch u. a. (2013), S. 418 und Ostertag (2008), S. 2).

⁵⁰ Vgl. Ostertag (2008), S. 2f. und Lawrenz (2001), S. 282.

Marken BMW, Rolls Royce und Mini konnten beispielsweise schon im Jahr 2007 insgesamt 350 Modellvarianten gezählt werden.⁵¹ Verbunden mit dem Anstieg der Modellreihen und Modellvarianten hat auch die Anzahl der Fahrzeugtypen⁵² zugenommen, da immer neue Nischen besetzt wurden.⁵³

Die zweite Art der Individualisierung wird von den Premiumherstellern über eine große Zahl an Wahlmöglichkeiten vorangetrieben, beispielsweise in Bezug auf die Ausstattungsoptionen, verschiedenste technische Systeme und gerade in den letzten Jahren auch Motorantriebsvarianten.⁵⁴ Dies hat die Variantenzahlen bzw. Zahl der möglichen Kombinationen bei Premiumautomobilen⁵⁵ immer weiter erhöht.⁵⁶ In den letzten Jahren⁵⁷ kamen die Antriebsvarianten Hybrid, Elektro und Brennstoffzelle zu den zeitlich schon lange bestehenden Varianten der Verbrennungsmotoren hinzu.⁵⁸ Die Bewegung hin zur Elektromobilität⁵⁹ inklusive Diskussionen bezüglich des Verbots von Neuzulassungen von Verbrennerfahrzeugen in einigen Jahren, beispielsweise in den Niederlanden oder Norwegen⁶⁰, zwingt die deutschen Premiumhersteller dazu, mehr Elektrofahrzeuge anzubieten und zu produzieren.⁶¹ Getrieben wird diese Bewegung auch durch das rasante Aufstreben der Marke Tesla Motors, die mit ihren ersten Fahrzeugen (Roadster und Model S) besonders auf die Oberklasse im Premiumsegment gezielt hat.⁶² Die Integration der Elektrofahrzeuge in die Produktionsabläufe erfordert zusätzlichen Aufwand bei der Produktionsplanung und Materialbereitstellung, da die Montageeinhalte bei diesen Fahrzeugen gegenüber Verbrennerfahrzeugen abweichen. Laut Hüttenrauch, Wittek und Boysen wird sich der Trend zu weiteren Ausstattungsoptionen in Zukunft fortsetzen und die Varianten- und Derivatevielfalt weiter erhöhen, da die Automobilhersteller durch die Individualisierungsoptionen versuchen, Kundenwünsche bzw. -anforderungen zu erfüllen.⁶³ In diesem Zusammenhang wird in Bezug auf die hohe Zahl von kundenspezifi-

⁵¹ Vgl. MacDuffie u. a. (1996), S. 350 und Günthner (2007), S. 4.

⁵² Heutzutage kann dabei zwischen neun Fahrzeugtypen (Limousine, Kombi, Kleinbus, Pick-up, SUV, Roadster, Coupé, Sportwagen, Cabrio) und sechs Fahrzeugsegmenten (Micro, Mini, Kompakt, Mittelklasse, Premium und Luxus) unterschieden werden. (Vgl. Dannenberg (2005), S. 38) Jeder Hersteller leitet aus seinen Fahrzeugmodellen (z. B. Audi A4) mehrere Derivate (z. B. Kombi, Limousine) ab, die somit den Fahrzeugtypen entsprechen. (Vgl. Hüttenrauch und Baum (2008b), S. 119 ff.).

⁵³ Vgl. Becker (2006a), S. 27.

⁵⁴ Vgl. Aoki u. a. (2014), S. 373 und Becker (2006a), S. 9.

⁵⁵ Die hier skizzierten Veränderungen betreffen wie oben erwähnt besonders das Premiumsegment sind jedoch nicht hierauf begrenzt und finden sich auch bei Modellen für den Automobil-Volumenmarkt. Beispielsweise gab es schon im Jahr 2007, bei Betrachtung aller möglichen Kombinationen, den VW Golf in 10²³, den Ford Focus in 10¹⁶, den Opel Astra in 10¹⁷ und die Mercedes C-Klasse in 2²⁷ Varianten. (Vgl. Götz (2007), S. 17 und Röder und Tibken (2006), S. 1011).

⁵⁶ Vgl. Rennemann (2007), S. 12 und Vgl. Schlott (2005), S. 38.

⁵⁷ Die zukünftige Entwicklung der neuen Antriebsvarianten ist unklar, aber viele Autoren erwarten signifikante Steigerungsraten für die Zukunft. (Vgl. Wittek (2013), S. 13 sowie Mosquet u. a. (2011), S. 18 ff.).

⁵⁸ Vgl. Bauernhansl (2014), S. 13.

⁵⁹ Beispielsweise in China lässt sich der Trend zu Elektrofahrzeugen, mit 206.800 verkauften Fahrzeugen im Jahr 2015, eine Steigerung um 300 % gegenüber dem Vorjahr, besonders deutlich erkennen. (Vgl. VDA (2016), S. 16).

⁶⁰ Vgl. Sorge (2016).

⁶¹ Vgl. Diehlmann und Häcker (2010), S. 8.

⁶² Vgl. Mangram (2012), S. 306.

⁶³ Vgl. Hüttenrauch und Baum (2008b), S. 120 sowie Wittek (2013), S. 15 und Boysen u. a. (2015), S. 107.

schen Varianten von der Produktion der Losgröße eins⁶⁴ gesprochen, was dazu führt, dass die Endmontage als Variantenfließfertigung bezeichnet wird.⁶⁵

1.2 Problemstellung und Motivation

Im ersten Teil der Einleitung wurden die wesentlichen, aktuellen Herausforderungen für die deutschen Premiumhersteller in Bezug auf Produktion und Logistik aufgezeigt. Dabei können fünf Themenbereiche⁶⁶ identifiziert werden, die ersten vier betreffen externe Anforderungen und der fünfte ist eine interne Herausforderung. Die Clusterung dieser fünf Herausforderungen für die Premiumhersteller mit den jeweils darin enthaltenen Detailproblemen ist in dieser Form neu. Sie wurde auf Basis von in der Literatur einzeln beschriebenen Veränderungen und Trends der Automobilproduktion erstellt. Die jeweiligen Literaturangaben sind im Text der folgenden Seiten dieses Unterkapitels eingearbeitet. Dies sind zum einen der Bedarf zur Entwicklung einer build-to-order-Produktionsweise (Losgröße eins). Zum zweiten das Interesse am Angebot von zusätzlichen Fahrzeugmodellen zur Erweiterung des Angebots für die Kunden. Zum dritten entwickelt sich zunehmend ein Bedarf an zusätzlichen Motorantriebsvarianten (z. B. Elektroantriebe) und als viertes erfordern globale Absatzkrisen bzw. Absatzschwankungen und die Reaktionen darauf eine ausreichende Flexibilität der Produktionsabläufe.⁶⁷ Hinzu kommen, als fünfte und interne Herausforderung, bei allen Premiumherstellern sehr ausgeprägte Beschränkungen der Produktionsflexibilität der einzelnen Werke.

Diese vorhandenen Restriktionen der einzelnen Montagelinien in den Werken führen dazu, dass auf einer Montagelinie jeweils nur ein Fahrzeugmodell gefertigt werden kann.⁶⁸ Dies ist der Fall, da montagetechnische Spezialvorgänge, abgestimmt auf wenige Fahrzeugtypen, durchgeführt werden oder besondere Abmessungen der Transporteinrichtungen, beispielsweise die Abstände der Aufnahmepunkte der Montagebänder, nur auf einzelne Fahrzeugmodelle anpassbar sind. Dadurch können Produktionsverlagerungen von einem Montageband auf ein anderes oder von einem Werk in ein anderes entweder gar nicht oder nur mit hohem finanziellen und zeitlichen Aufwand umgesetzt werden. Diese Modellbeschränkungen auf den Montagelinien führen, besonders in Krisenzeiten oder bei Absatzschwankungen, zu erheblichen betriebswirtschaftlichen Problemen für die Produktionsunternehmen. Wenn plötzlich einige Modelle aufgrund eines günstigen Preises oder gelungenen Designs besonders ge-

⁶⁴ Die Losgröße eins beschreibt die Produktion von individuellen Produkten, das Produktionslos (Anzahl gleicher Produkte im Fertigungsablauf) ist hierbei eins. (Vgl. Vogel-Heuser u. a. (2017), S. 77) Übertragen auf Montagelinien ist ein produziertes Fahrzeug anders ausgestattet als das nächste zu produzierende Fahrzeug.

⁶⁵ Vgl. Boysen (2007), S. 11.

⁶⁶ Die fünf Herausforderungen fokussieren sich dabei auf den Bereich der vorliegenden Arbeit und sollen nicht als vollständige Aufzählung angesehen werden. Viel mehr gibt es weit mehr Herausforderungen für die Premiumhersteller in anderen Bereichen und besonders unter Zugrundelegung von anderen Zielrichtungen oder Forschungsinteressen.

⁶⁷ Vgl. Klug (2011), S. 60.

⁶⁸ Beispielsweise kann auf der S-Klasse-Montagelinie im Mercedes Benz Werk in Sindelfingen nur die S-Klasse gefertigt werden. Weitere Modelle des gleichen Herstellers, beispielsweise die E-Klasse, müssen auf anderen, eigenen Montagelinien gebaut werden.

fragt sind und möglicherweise andere Modelle weniger nachgefragt werden, können diese Nachfrageschwankungen bisher kaum über die Werke verteilt werden. Stattdessen arbeiten dann einige Werke am Maximum ihrer Auslastung und können die Nachfrage möglicherweise trotzdem nicht bedienen, während andere Werke mit niedriger Auslastung, ähnlich wie in der Wirtschaftskrise 2009, extrem unwirtschaftlich produzieren.⁶⁹ Wenn die Nachfrage nach einem Modell die Auslastung der Montagelinie oder des Werks bestimmt, hat dies daher negativen Einfluss auf die Profitabilität der Werke.⁷⁰

Japanische Automobilwerke unterscheiden sich in dieser Beziehung deutlich von deutschen Werken. So werden in Japan laut einer Untersuchung von Staeblein im Schnitt 3,8 Fahrzeugmodelle auf einer Montagelinie gefertigt, während es in Deutschland im Schnitt nur 1,6 Fahrzeugmodelle je Montagelinie sind.⁷¹ Allerdings wird dieser Durchschnittswert für Deutschland besonders durch den Hersteller BMW verbessert. Dieser stellt in Bezug auf die Produktionsflexibilität eine Ausnahme dar, insbesondere das Werk in Regensburg. Der Hersteller produziert an diesem Standort auf einem Hauptband aktuell acht Fahrzeugmodellreihen.⁷² Eine weitere Ausnahme im nahen Ausland ist das Automobilproduktionswerk in Bratislava in der Slowakei. Dort laufen die Fahrzeuge Touareg von Volkswagen, Q7 von Audi und auf bestimmten Abschnitten auch Cayenne von Porsche über ein Montageband.⁷³

Bei den deutschen Premiumherstellern setzt sich bei den verantwortlichen Produktionsplannern in letzter Zeit mehr und mehr die Erkenntnis durch, dass effiziente Produktionsumgebungen in wechselhaften Märkten nur dann realisierbar sind, wenn unterschiedliche Fahrzeugtypen, idealerweise ohne lange Umbauarbeiten, in mehreren Werken⁷⁴ und möglicherweise auch auf mehreren Montagelinien eines Automobilherstellers gebaut werden können.⁷⁵ Daraus resultiert eine Notwendigkeit zur Erhöhung der Flexibilität der Produktionssysteme⁷⁶, um die vorhandenen Produktionskapazitäten jedes einzelnen Werks⁷⁷ optimal zu nutzen.⁷⁸ Der Europa-Chef von GM Carl-Peter Forster formulierte in einem Interview im Jahr 2007 seine Bestrebung mit dem Satz: „Wir wollen die Flexibilität zwischen den einzelnen Baureihen

⁶⁹ Vgl. Holzhauser (2016), S. 85.

⁷⁰ Vgl. Götz (2007), S. 16 f.

⁷¹ Vgl. Staeblein und Aoki (2015), S. 263 und Aoki u. a. (2014), S. 376.

⁷² Vgl. Kleinhenz u. a. (2006), S. 15 und Regensburg (2016) sowie Mößmer u. a. (2007), S. 11 sowie Vgl. Götz (2007), S. 17.

⁷³ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 108.

⁷⁴ Zum Beispiel sollen bei Bedarf besonders stark nachgefragte Modell in mehreren Werken in größerer Stückzahl produziert werden.

⁷⁵ Vgl. Götz (2007), S. 17.

⁷⁶ Vgl. Warnecke (1999), S. 41.

⁷⁷ Allerdings sind bauliche Veränderungen der bestehenden Werke, sogenannte Brown-Field-Werke, häufig nicht ohne weiteres möglich, da die über Jahre gewachsenen Werke mit der darum angeordneten Infrastruktur und Bebauung physischen Begrenzungen unterliegen. Bei neu zu bauenden Werken (sogenannten Green-Field-Werken), können die Hersteller von Anfang an innovative Konzepte für die Logistik zum Einsatz bringen, indem sich beispielsweise Zulieferer direkt auf dem oder rund um das Werksgelände ansiedeln. (Vgl. Alford u. a. (2000), S. 107 und Klug (2010), S. 202) Zur Erläuterung: In der VDI-Richtlinie 5200 werden vier Planungsfälle: Neubauplanung (Green-Field), Umplanung (Brown-Field), Revitalisierung und Rückbauplanung festgelegt. (Vgl. VDI 5200 (2009)).

⁷⁸ Vgl. Nof u. a. (2006), S. 55.

erhöhen und als langfristiges Ziel möglichst jedes Auto in jedem Werk bauen können.“⁷⁹

Während die Produktionssysteme in der Automobilproduktion der Vergangenheit Logistikkonzepte für Produktionswerke mit starrem Band (siehe Erklärungen in Kapitel 2.1) entwickelt und passend dazu implementiert haben, müssen, aufgrund der beschriebenen Herausforderungen in der Automobilindustrie (Variantenvielfalt, Antriebsvielfalt und Kapazitätsverschiebungen), nun neue und innovative Montage- und Logistikkonzepte erarbeitet und eingeführt werden, die wandlungsfähige und flexible Produktionsprozesse unterstützen.⁸⁰ Dementsprechend übertragen sich auch die insgesamt fünf Herausforderungen der Premiumhersteller auf die Produktionslogistik⁸¹ und erfordern Umstellungen in der Materialversorgung. Im Folgenden werden daher diese fünf Aspekte in Bezug auf die Anforderungen einer Produktionslogistik der Zukunft diskutiert.

1. und 2. Herausforderung: Build-to-order- Produktionssysteme sowie Produktion von zusätzlichen Fahrzeugmodellen

Während die beschriebenen, umfangreichen Ergänzungen im Produktangebot durch zusätzliche Fahrzeugmodelle und Ausstattungsvarianten stattgefunden haben, wurden in der zugehörigen Produktionslogistik angepasste Veränderungen⁸², beispielsweise die Einführung von Supermärkten, Routenzügen, Kanban und Warenkörben, vorgenommen.⁸³ Während Supermärkte eine Vorab-Kommissionierung in einem vom Montageband mehr oder weniger weit entfernten Bereich erlauben, sind die Routenzüge für den Transport der im Supermarkt zusammengestellten Ladungsträger zum Verbauort verantwortlich.⁸⁴ Warenkörbe sind Gestelle mit darauf befindlichen, speziell für ein Fahrzeug zusammengestellten, Montageteilen. Diese Gestelle folgen am Montageband dem aufzubauenden Fahrzeug mehrere Stationen, damit die Montagemitarbeiter jeweils die zugeordneten Teile für das Fahrzeug aus dem Warenkorb entnehmen und verbauen können. Porsche nutzt das Prinzip der Materialbereitstellung per Warenkorb in seinem Werk in Zuffenhausen sehr erfolgreich, um auf einem Montageband 16 unterschiedliche Motoren zu fertigen.⁸⁵ Jeder Motor mit seinen notwendigen Montageteilen wird im Supermarkt vorkommissioniert⁸⁶ und dann unter Verwendung des kommissionierten Warenkorbs für den genauen Motor auf der Montagelinie zusammengebaut. Detaillierte Erklärungen dieser Logistikobjekte und der zugehörigen förder-, lager- und handhabungstechnischen Maschinen erfolgen in Kapitel 2.3. Für die Zukunft stellt sich

⁷⁹ Götz (2007), S. 17.

⁸⁰ Vgl. Mößmer u. a. (2007), S. 12.

⁸¹ Da sich diese Arbeit mit Logistikvorgängen in der Automobilproduktion beschäftigt, wird Produktionslogistik als Synonym zu Automobilproduktionslogistik verwendet. Automobilproduktionslogistik bezeichnet den Vorgang der Materialversorgung von Montagestationen in einem Automobilwerk. Eine detaillierte Erläuterung inklusive Abgrenzung findet sich in Kapitel 2.3.1.

⁸² Vgl. Krog und Statkevich (2008), S. 188 sowie Göpfert u. a. (2013), S. 90.

⁸³ Vgl. Klug (2011), S. 60.

⁸⁴ Vgl. Scheel und Chilian (2007), S. 308 und Battini u. a. (2012), S. 212.

⁸⁵ Vgl. Interne Porsche-Präsentation aus dem Jahr 2008 die dem IFT vorliegt.

⁸⁶ Vorkommissionierung bedeutet, dass für die Bereitstellung von Baugruppen am Montage- oder Verbauort Einzelbauteile vorsortiert werden, damit die Montagezeit und der Platzbedarf des Materials geringer ist. (Vgl. Göpfert und Schulz (2017), S. 391).

jedoch die Frage, ob die Automobilhersteller mit ihren aktuellen Systemen den Herausforderungen des Variantenanstiegs nachkommen können, wie sie durch aktuelle Bestrebungen hin zur Produktion der Stückzahl eins (build-to-order) zu erwarten sind.⁸⁷

Gerade bei kurzfristigen Änderungen der Produktionsreihenfolge, beispielsweise aufgrund von Fehlmaterial oder Ablaufverzögerungen, ist wesentlicher Aufwand in der Logistik notwendig, da schon sequenziertes, also in Produktionsreihenfolge sortiertes, Material für die geänderte Reihenfolge umsortiert werden muss, auch bezeichnet als Resequenzierung.⁸⁸ Darüber hinaus werden, dank der Variantenvielfalt, für die Materialbereitstellung der benötigten Montageteile an den Produktionslinien immer größere Flächen notwendig.⁸⁹ In einigen Automobilwerken, z. B. bei Audi in Ingolstadt, ist die von der Logistik belegte Werksfläche doppelt so groß wie die Montagefläche.⁹⁰ Teilweise sind in den Montagehallen mittlerweile bis zu 60 % Logistikfläche und nur die restlichen 40 % stehen als Montagefläche zur Verfügung.⁹¹ Diese Entwicklung setzt sich weiter fort, indem eine Verlagerung der Kommissionierung⁹² und/oder der Vormontage und Zwischenlagerung hin zu externen Dienstleistern (Kontraktlogistikern) immer weiter zunimmt.⁹³ Dies führt jedoch zu einem Anstieg der Logistikkosten, der in den letzten Jahren laut BVL-Studie auch zu beobachten ist.⁹⁴ Aus diesem Grund kann davon gesprochen werden, dass die Logistik sich mit Ihren aktuellen Abläufen und Vorgehensweisen mit dem Rücken zur Wand befindet.⁹⁵ Andere Autoren bewerten die Situation ähnlich und sprechen davon, dass heutige Logistiksysteme die neuen Anforderungen hinsichtlich Dynamik und Wandelbarkeit erst ansatzweise erfüllen.⁹⁶ Ein weiterer Anstieg in der Variantenzahl lässt sich zwar noch in die Systeme implementieren, beispielsweise durch Auslagerung der Sequenzierung an externe Dienstleister, führen jedoch zu komplexeren Prozessen und damit verbunden zu einem weiteren Anstieg der Logistikkosten.⁹⁷ Folglich werden innovative und flexible Lösungen mit schneller Anpassungsfähigkeit für die Logistik gefordert.⁹⁸

3. Herausforderung: Trend zu zusätzlichen Antriebsvarianten

Zusätzliche Antriebsvarianten beeinflussen die Festlegung der Montageinhalte an den jeweiligen Stationen. Während ein Elektrofahrzeug oder ein Hybridfahrzeug an einer Station mit seiner Batterie ausgestattet wird, erhält ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor beispielsweise dort seinen Kraftstofftank. Die Batterie muss im Logistikprozess aufgrund der Explosionsge-

⁸⁷ Vgl. Hüttenrauch und Baum (2008b), S. 121 sowie Kühn (2002), S. 1 und 10.

⁸⁸ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 107 sowie Grinninger (2012), S. 45 f.

⁸⁹ Vgl. Klug (2010), S. 4.

⁹⁰ Vgl. Schlott (2005), S. 39.

⁹¹ Vgl. Wehking und Popp (2015a), S. 328.

⁹² Kommissionierung bezeichnet die Zusammenstellung von bestimmten Artikeln aus einem bereitgestellten Sortiment auf Basis von Aufträgen. (Vgl. VDI 3590 (1993), S. 1)

⁹³ Vgl. Arnold (2006b), S. 88.

⁹⁴ Vgl. Straube und Pfohl (2008), S. 46 und Klug (2011), S. 60.

⁹⁵ Vgl. Wehking und Popp (2015a), S. 326 sowie Unruh (2014), S. 666.

⁹⁶ Vgl. Günthner u. a. (2010), S. 349.

⁹⁷ Vgl. Rennemann (2007), S. 13 und Bauer (2008), S. 260.

⁹⁸ Vgl. Krog und Statkevich (2008), S. 195 und Günthner (2008), S. 381.

fahr in Spezialbehältern transportiert werden, während der leere Kraftstofftank aus Sicht der Logistik ohne besondere Herausforderungen volumenoptimiert gehandhabt werden kann. Folglich müssen zwei unterschiedliche Logistikprozesse stattfinden.

4. Herausforderung: Absatzschwankungen

Absatzschwankungen bestimmter Modelle können von den Automobilherstellern in bestimmten Maßen (sogenannten Flexibilitätskorridoren, siehe Kapitel 2.2.1) mit geringen Einbußen der Wirtschaftlichkeit bewältigt werden. Basis dafür sind technische und organisatorische Gegebenheiten der Produktionswerke. Kommt es über die Flexibilitätskorridore hinaus zu größeren Nachfrageschwankungen, so fallen zusätzliche Kosten an, die die Wirtschaftlichkeit der Produktion negativ beeinflussen.

5. Herausforderung Flexibilitätsgrenzen der bestehenden Werke

Besonders deutlich wird diese Herausforderung beim Blick auf die Wertschöpfungsstrukturen in der Automobilindustrie. Die Verwendung von Montagebändern und gleichmäßiger Arbeitstakte entspricht im Kern immer noch dem arbeitsteiligen Prinzip von Taylor⁹⁹ und den Überlegungen von Taylor zur Fließbandproduktion.¹⁰⁰ Während vor einigen Jahren noch identische Fahrzeuge, siehe beispielsweise der VW Käfer in Abbildung 1.3, ohne Ausstattungsoptionen auf dem Montageband hintereinander gefertigt wurden, war die Materialbereitstellung leichter handhabbar.



Abbildung 1.3: Produktion VW Käfer 1973 (Quelle: Schaack (1973))

Das Montagematerial wurde an der jeweiligen Station in Ladungsträgern bereitgestellt und die Montagearbeiter haben das Material nach und nach aus dem Ladungsträger entnommen. Der Ladungsträger wurde also angebrochen und verbraucht, bevor der nächste Ladungsträger mit Material angebrochen wurde. Da in jedes zu produzierende Fahrzeug die gleichen Montageteile verbaut wurden, mussten keine Besonderheiten in Bezug auf die Bereitstellung

⁹⁹ Vgl. Taylor (1911), S. 48 f.

¹⁰⁰ Vgl. Diez u. a. (2016), S. 3 und Buhse (2008), S. 8 und Saurwein (1996), S. 19 und Scholtissek (2004), S. 18 sowie Bullinger u. a. (1993), S. 37.

unterschiedlicher Bauteilvarianten beachtet werden. Der Einzug von weiteren Ausstattungsoptionen der Fahrzeuge hat zu einem erweiterten Aufgabenspektrum in der Montage und der Logistik geführt, da je nach Ausstattung unterschiedliche Bauteile für die Fahrzeuge benötigt werden.¹⁰¹ Da über eine feste Verkettung von Wertschöpfungsschritten die Variantenzahl und -flexibilität jedoch begrenzt und vorab ein starrer Rahmen für die Taktzeit aller Montagestationen und für die Produktionsmenge definiert ist, sind diese Strukturen in Zukunft nicht mehr marktgerecht.¹⁰²

1.3 ARENA2036

Besondere Bedeutung erlangt die vorliegende Forschung durch das Großprojekt Active Research Environment for the Next generation of Automobiles 2036 (ARENA2036) dessen Mission „[...] die Entwicklung einer nachhaltigen Industrie 4.0 und ein Technologiewandel, der individuelle Mobilität mit niedrigem Energieverbrauch realisiert“,¹⁰³ ist. Dies soll durch wandlungsfähige Produktionen und funktionsintegrierten Leichtbau erreicht werden.¹⁰⁴

Die Idee für das Forschungsprojekt ARENA2036 entstand, unter Federführung des Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), unter anderem in Folge der schwierigen Absatzsituation für Automobile in den Krisenjahren¹⁰⁵ 2007-2009.¹⁰⁶ Weitere Anstöße für die Forschungsinhalte der ARENA2036 sind die im Kapitel 1.1 dargestellten Veränderungen in der Produktion hin zur Losgröße eins, neuartige Antriebskonzepte (z. B. Hybrid-, Brennstoffzellen- oder Elektroantrieb) die Gewichtszunahmen der KFZ trotz neuartiger Materialien und der Anstieg der Ausstattungsvarianten. Das IPA hat sich passende Forschungspartner in Industrie und Forschung gesucht und einen Antrag beim BMBF gestellt. Nach Antragsgenehmigung wurde das Forschungsprojekt im Jahr 2013 an der Universität Stuttgart initiiert. Es handelt sich dabei um Projekt, welches als Kooperationsmodell in öffentlich-privater Partnerschaft entstanden ist, um Experten aus Industrie und Wissenschaft zusammenzubringen.¹⁰⁷ Hierfür wurde auf dem Universitätscampus in Vaihingen zum Ende des Jahres 2016 eine 8.500 m² große ARENA2036-Versuchshalle in Betrieb genommen. In dieser sollen bis zu 100 Forscher aus Industrie und den beteiligten Firmen täglich zusammen arbeiten und Prototypen real testen sowie Versuche durchführen. Das Projektkonsortium setzt sich aus den Firmen Daimler AG, Robert Bosch GmbH, BASF SE, Faro Europe GmbH & Co. KG, Kuka AG, Festo AG & Co. KG, Artur Bär Maschinenbau GmbH, dem Deutschen Institut für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF), den Fraunhofer-Instituten Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) und IPA sowie sechs Instituten der Universität

¹⁰¹ Vgl. Kuhn und Hellingrath (2002), S. 163.

¹⁰² Vgl. Bauernhansl (2014), S. 21.

¹⁰³ ARENA2036 (2015), S. 1.

¹⁰⁴ Vgl. ARENA2036 (2015), S. 1.

¹⁰⁵ Erläuterungen zu dieser Krise in der Automobilindustrie siehe Kapitel 1.2.

¹⁰⁶ Ergebnis von Expertengesprächen mit Beteiligten von ARENA2036.

¹⁰⁷ Vgl. ARENA2036 (2015), S. 1.

Stuttgart und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zusammen.¹⁰⁸ Weitere Partner sollen im Verlauf des Projekts dazukommen.

Das gesamte Forschungsprojekt ARENA2036 besteht aus den folgenden vier Forschungssäulen:

- Forschungsfabrik (ForschFab)
- Intelligenter Leichtbau mit Funktionsintegration (LeiFu)
- Digitaler Prototyp (DigitPro)
- Kreativität, Kooperation, Kompetenztransfer (Khoch3)

Das Ziel der Forschungssäule ForschFab ist es, die Automobilproduktion der Zukunft ohne Band zu erforschen und gleichzeitig die Flexibilität und die Wandlungsfähigkeit der Produktionssysteme zu erhöhen.¹⁰⁹ Im Teilprojekt LeiFu werden funktionsintegrierende Module auf Basis von faserverstärkten Kunststoffen erforscht. Im Projekt DigitPro soll die Einführung von großserienfähigen Prozessen für Faserverbundkunststoffe in der Automobilindustrie anhand eines durchgängigen Datenaustauschformats unterstützt werden. Im vierten Teilprojekt Khoch3 wird die Zusammenarbeit von Forschern und Industrievertretern unterschiedlicher Disziplinen in den Arbeitssitzungen analysiert, um mit neu entwickelten Methoden die Arbeit der Technologieforschung und der Produktentwicklung bestmöglich zu unterstützen. Dazu werden Methoden entwickelt, um die Arbeitsbereiche der Technologieforschung und der Produktentwicklung besser aufeinander abzustimmen.¹¹⁰

Die Produktionsforschung¹¹¹ und die damit verbundene Forschung im Bereich der Produktionslogistik, die in dieser Arbeit behandelt wird, sind in die Säule der ForschFab einzuordnen. Für die Zielerreichung der ForschFab ist der Aufbau wandlungsfähiger Fabrik-, also Montage- und Logistikstrukturen im Rahmen der Fahrzeugmontage ein zentraler Faktor.¹¹² Denn während bisher eingesetzte Produktionssysteme in der Automobilindustrie, wie in Kapitel 1.2 beschrieben, nur über geringe Möglichkeiten der Wandlungsfähigkeit verfügen, müssen neuartige Konzepte und Betriebsmittel¹¹³ zusätzliche Funktionen bieten, um die Wandlungsfähigkeit zu erhöhen und die wirtschaftliche Produktion der Losgröße eins zu ermöglichen.

Dabei sind die Bestrebungen der Forschungssäule ForschFab jedoch nicht nur das Ablösen der starren Fördertechnik und das Erweitern der identischen Taktzeiten (Automobilprodukti-

¹⁰⁸ Vgl. Unruh (2014), S. 668.

¹⁰⁹ Vgl. Bauernhansl (2014), S. 21.

¹¹⁰ Vgl. Middendorf u. a. (2016), S. 506 sowie ARENA2036 (2015), S. 1.

¹¹¹ Produktionsforschung sorgt sowohl für eine Aufrechterhaltung des bisherigen Outputniveaus von Produktionen als auch für die Entwicklung von technischen Innovationen für die Weiterentwicklung von Produktionen. (Vgl. Abele und Reinhart (2011), S. VI).

¹¹² Vgl. Steegmüller (2014), S. 116.

¹¹³ Für die Einsatzfähigkeit von neuen Montage- und Logistikkonzepten müssen beispielsweise auch innovative Roboter für MRK-Anwendungen erforscht werden. Dies ist Teil der Tätigkeiten des Fraunhofer IPA im Projekt ARENA2036.

on ohne Band) sondern vielmehr ein neuartiges Schema für die Ablauffolge der im Aufbau befindlichen Fahrzeug durch die Montage. Zusätzlich wurden die im Rahmen dieser Arbeit analysierten fünf Herausforderungen der deutschen Premiumhersteller in Bezug auf die Produktionslogistik (Individualisierung, Modellvielfalt, Absatzschwankungen, Antriebsvarianten und Produktionsbegrenzungen der Montagewerke), siehe Kapitel 1.2, in die Forschung in der ForschFab in ARENA2036 eingebracht, untersucht und darauf aufbauende Lösungsmöglichkeiten für die Logistik der Zukunft entwickelt.¹¹⁴

1.4 Ziele der Arbeit

Unter den aktuellen Anforderungen an eine wandelbare und flexible Produktionsweise erscheint die bisher praktizierte Methode der Automobilmontage mit Band und identischen Arbeitstakten nicht weiter zeitgemäß.¹¹⁵ Die zukünftige Automobilproduktion soll dabei in einer Schachbrett oder Matrixform stattfinden, siehe Details in Kapitel 3.2. Die zugehörigen Logistikkonzepte sind nicht mehr passend für diese Herausforderungen.¹¹⁶ Durch die revolutionäre Forderung der ForschFab in ARENA2036 zur Auflösung von identischen Arbeitstakten und zum Ablösen der Montagebänder in der Automobilproduktion ergibt sich ein Forschungsbedarf, um die Lücke zwischen bekannten sowie heutzutage genutzten Logistikkonzepten auf der einen Seite und den zukünftigen Anforderungen an die Produktionslogistik, hinsichtlich Wandelbarkeit und Flexibilität, auf der anderen Seite zu schließen.¹¹⁷ Diese Forschungslücke betrifft einerseits die Auswahl geeigneter Produktionsverfahren und andererseits die Entwicklung von neuartigen, effizienten¹¹⁸ Logistikkonzepten.¹¹⁹ Letzteres ist Gegenstand dieser Arbeit und beinhaltet die Berücksichtigung der fünf Herausforderungen an die deutschen Premiumhersteller. Das Ziel besteht darin, innovative Logistikkonzepte zu entwickeln, die den fünf Herausforderungen, siehe Seite 11, gerecht werden. Die Umsetzbarkeit dieser innovativen Konzepte muss anhand von Simulationsstudien untersucht werden. Da bestehende Simulationen für Automobilmontagen mit Band und identischen Arbeitstakten sowie deren Produktionslogistik nicht weiter nutzbar sind, müssen auch neue Simulationen für die geänderten Produktionsabläufe erstellt werden.

Die Entwicklung der neuen Logistikkonzepte¹²⁰ soll an bestehenden und heute eingesetzten Konzepten anknüpfen und das Ziel verfolgen, eine wandlungsfähige und flexible Produk-

¹¹⁴ Das Aufgreifen und Berücksichtigen der fünf Herausforderungen erfolgt in Kapitel 3 im Zusammenhang der Erstellung der neuartigen Logistikkonzepte.

¹¹⁵ Vgl. Wehking und Popp (2015a), S. 326.

¹¹⁶ Vgl. Friedli und Schuh (2012), S. 186.

¹¹⁷ Vgl. Wehking und Popp (2015a), S. 326.

¹¹⁸ Laut Klug ist eine schlanke und somit effiziente Logistik durch hohe Flexibilität und kurze Durchlaufzeiten erreichbar. (Vgl. Klug (2014), S. 51).

¹¹⁹ In Studien von Mößmer, Schedlbauer und Günthner aus dem Jahr 2007 werden solche neuartigen Logistikkonzepte gefordert, jedoch keine konkreten Lösungen vorgestellt. (Vgl. Mößmer u. a. (2007), S. 12).

¹²⁰ An dieser Stelle wird von einer Mehrzahl von Logistikkonzepten gesprochen, da ein einziges Konzept die differenzierenden Materialflussbedarfe der Automobilindustrie (z. B. in Bezug auf Teileabmessungen, Variantenzahl oder Reaktionsfähigkeit) voraussichtlich nicht alleine erfüllen kann.

tionslogistik zu ermöglichen. Grundsätzlich müssen derartige, innovative Logistikkonzepte den gesamten Materialfluss vom ersten Zulieferer¹²¹ eines Montageteils über weitere Zulieferer bis hin zum Montagewerk umfassen. Aus diesem Grund werden in Ansätzen auch alle notwendigen, beteiligten Bereiche genannt und bei der Beschreibung der Neugestaltung des Informationsflusses noch weiter detailliert. Aber der Kern dieser Dissertation ist die Entwicklung von Konzepten für den Abschnitt der Logistik zwischen Wareneingang bzw. der ersten Ladekante eines PKW-Produktionswerks über zwischengeschaltete Lager bis zum Verbauort an der Montagestation, siehe hierzu Abbildung 1.4.¹²² Der fokussierte Bereich, dargestellt mit einer gestrichelten Linie in der Abbildung 1.4, kann als Inbound-Logistik¹²³ auf dem Werksgelände bezeichnet werden, ein Teilgebiet der Intralogistik¹²⁴. Dabei wird im Rahmen dieser Arbeit die nach dem Wareneingang erfolgende (Zwischen-)Lagerung sowie die Vereinzelung und die Sequenzierung des Produktionsmaterials mit betrachtet. Dies ist wesentlich, da bestehende Konzepte durch früh im Prozess stattfindende Vereinzelung und Sequenzierung, die meist auf Basis von Verdichtungsmaßnahmen des Materialstreifens stattfinden¹²⁵, Grenzen für die Wandlungsfähigkeit des Materialflusses darstellen.¹²⁶

Der Materialfluss vom Zulieferer bzw. Logistikdienstleister hin zum Wareneingang wird nicht in die Bearbeitung einbezogen. Zusätzlich zum betrachteten Bereich zwischen Wareneingang und Verbauort wird die Neugestaltung des Informationsflusses untersucht. Bei diesem Thema wird in der vorliegenden Arbeit auch auf die informationstechnische Anbindung (z. B. Abrufsteuerung von Material) der Zulieferer eingegangen, damit die Anknüpfungspunkte des neuartigen Informationsflusses dieser Produktionslogistik klar verstanden werden können.

Kompakt formuliert ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, neue Konzepte für eine wandlungsfähige und flexible Inbound-Produktionslogistik¹²⁷ für die Automobilindustrie mit einer Produktion ohne Band zu entwickeln, zu bewerten und anhand von Simulationen zu beweisen, dass solche Konzepte umsetzbar sind.

Während am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) im Umfeld von ARENA2036 insge-

¹²¹ Bei den Zulieferern können 1st-Tier (Systemintegrator), 2nd-Tier (Modul- und Systemlieferant oder Systemspezialist) und 3rd-Tier (Teile- und Komponentenlieferant) unterschieden werden, die je nach Position in der Wertschöpfungskette vorgelagert vom OEM tätig sind. (Vgl. Becker (2006a), S. 164 f. und Lawrenz (2001), S. 285 ff.).

¹²² Um die neuartigen Logistikkonzepte für den gesamten Materialfluss vom ersten Zulieferer eines Montageteils über weitere Zulieferer bis hin zum Montagewerk zu untersuchen, wären sehr umfangreiche Detailaufnahmen notwendig, die den Umfang dieser Arbeit wesentlich übersteigen.

¹²³ Im Rahmen der Inbound-Logistik wird Produktionsmaterial empfangen, gelagert und in die passenden Produktionsbereiche weitergeleitet. (Vgl. Klaus und Krieger (2012), S. 147 und Lai (2009), S. 38) Das Ziel lautet, die Materialbedarfe der Produktion oder Montage zu erfüllen.

¹²⁴ Eine detaillierte Beschreibung des Begriffs Intralogistik findet sich in Kapitel 2.3.1.

¹²⁵ Vgl. Klug (2006), S. 190.

¹²⁶ Vgl. Göpfert u. a. (2013), S. 198.

¹²⁷ Insgesamt lassen sich laut Klug in der Automobilproduktion drei Bereiche der Logistik unterscheiden, die Inbound-Produktionslogistik, die Inbound-Beschaffungslogistik und Outbound-Logistik. (Vgl. Klug (2011), S. 61 f.).

samt fünf Forschungsprojekte¹²⁸ durchgeführt wurden und werden, konzentriert sich diese Arbeit auf das erste Forschungsprojekt, die Entwicklung und Simulation von neuartigen Konzepten für die Inbound-Produktionslogistik von Automobilmontagewerken.

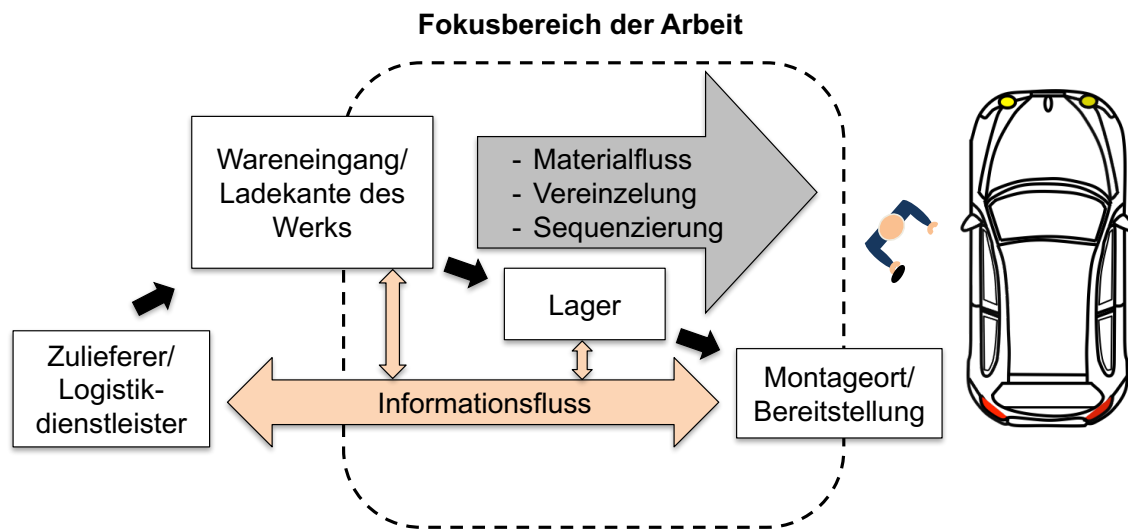


Abbildung 1.4: Fokusbereich der Arbeit (eigene Darstellung)

Unter Einbeziehung der fünf Herausforderungen für die Produktionslogistik der Premiumhersteller wird für die neu zu entwickelnden Logistikkonzepte im Rahmen dieser Arbeit die Erfüllung der folgenden drei Thesen gefordert. Diese Thesen zielen darauf ab, Lösungsmöglichkeiten für die fünf Herausforderungen zu liefern:

- These 1: Die innovativen Konzepte ermöglichen flexible Anpassungen (z. B. Veränderung der Reihenfolge, Anpassungen an der Ausstattungsvarianten, Reaktionen auf Materialengpässe) der Materialbereitstellung bei Änderungen in der Produktionsreihenfolge. Diese Reihenfolge wird in der deutschen Automobilindustrie häufig als Perlenkette bezeichnet.^{129 130}
- These 2: Die neuen Logistikkonzepte sind wandlungsfähig in Bezug auf die Anordnung der Montagestationen bzw. des Montagelayouts.

¹²⁸ Dies sind die Projekte flexible Produktionslogistik (FlexProLog), Leitfaden für flexible Produktionslogistik (LeitFlexPro), Montage- und Logistik-Groß-FTF, neuartiger Ladungsträger und Auswahlwerkzeug für die Logistik.

¹²⁹ Vgl. Weyer (2002), S. 57 und Klug (2006), S. 188.

¹³⁰ Teilweise wird statt Perlenkette in der Literatur auch von Vorplanung der Fertigungsabfolge gesprochen. (Vgl. Rothlauf (2010), S. 417). Der Begriff beschreibt die aneinandergereihten, zu produzierenden Fahrzeuge, die nach dem Einfrieren, also Festlegen der Montagereihenfolge, in genau dieser Reihenfolge durch die Montage laufen. (Vgl. Klug (2010), S. 391 sowie Klug (2011), S. 66 und Lawrenz (2001), S. 284) Je nach Hersteller erfolgt die finale Festlegung in einem Zeitrahmen zwischen 3 und 14 Tagen vor Montagebeginn der jeweiligen Fahrzeuge, wobei letzte Änderungen ca. 8 Stunden vor Produktionsbeginn erfolgen.¹³¹ Die Hersteller versuchen häufig, diese Reihenfolge durch die Gewerke Lackiererei und Endmontage aufrecht zu erhalten. (Vgl. Seidl und Baron (2015), S. 181 und Boysen u. a. (2015), S. 110) Für weitere Details zum Produktionssteuerungskonzept der Perlenkette siehe Weyer (2002).

- These 3: Die Sicherstellung des notwendigen Materialflusses zur Montage wird gewährleistet.

Die Erfüllung dieser Thesen soll anhand von Konzeptbewertungen erfolgen und unter Verwendung von Simulationsstudien validiert werden. Die Simulationsstudien werden anhand von bestimmten Produktionsszenarien und realen Materialdaten durchgeführt. Die Erfüllung der fünf Herausforderung für die deutschen Premiumhersteller soll schon bei der grundsätzlichen Konzeption der neuartigen Konzepte berücksichtigt werden.

1.5 Aufbau der Arbeit

Die Ziele der Arbeit werden durch folgende Vorgehensweise erreicht, siehe dazu Abbildung 1.5: Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel eins (Einleitung) ausgehend von den aktuellen Rahmenbedingungen an die Automobilproduktion und sich daraus ergebenden Herausforderungen der Premiumhersteller auf die notwendigen Veränderungen in der Produktionslogistik übergeleitet. Weiterhin wird das Forschungsprojekt ARENA2036 beschrieben. In Kapitel zwei (Stand der Technik) wird erst auf die Automobilproduktion im Allgemeinen und dann ausführlich auf den Teilbereich der bisherigen Logistikkonzepte für die Automobilproduktion eingegangen. Dies soll dem Leser den Einstieg in die Thematik erleichtern. Ein Teil der Erkenntnisse dieses Abschnitts basiert auf IST-Aufnahmen, verbunden mit einer Schwachstellenanalyse, die in unterschiedlichen Automobilwerken¹³² vorgenommen wurden. Dabei werden auch die über die Jahre entwickelten Konzepte Just-in-sequence (JIS)¹³³ und Just-in-time (JIT) betrachtet. Mithilfe der Untersuchung der bestehenden Anlieferungskonzepte für die Automobilproduktion werden in Kapitel drei Verbesserungspotentiale aufgedeckt und darauf aufbauend effizientere, sowie flexiblere Abläufe entwickelt.

¹³² Dies waren die Produktionswerke von Mercedes-Benz in Raststatt und Sindelfingen und von Audi in Neckarsulm.

¹³³ Erläuterung der Begriffe in Kapitel 2.3.2.

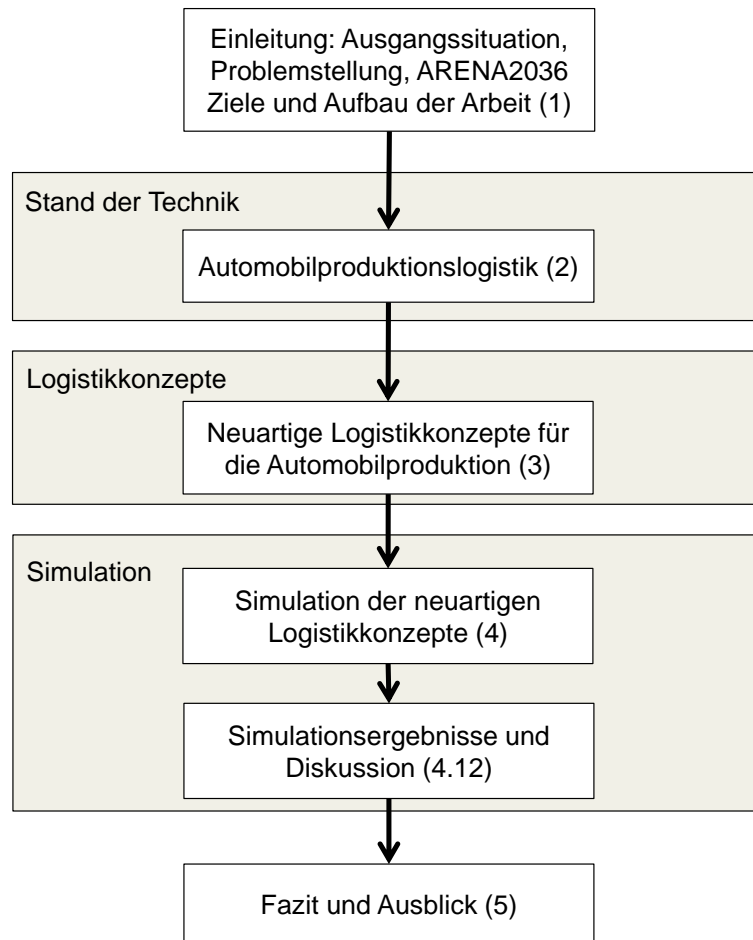


Abbildung 1.5: Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)

Anschließend wird die Entwicklung von zehn neuen Anlieferungskonzepten und die Durchführung einer Präferenzbewertung zur Aufstellung einer Rangfolge der Konzepte beschrieben. Danach erfolgt die Vorstellung der notwendigen neuen Konzepte für förder-, lager- und handhabungstechnische Maschinen, die zur Umsetzung der innovativen Anlieferungskonzepte notwendig sind. Basierend auf den Ergebnissen der Bewertung werden drei finale Konzepte ausgewählt und in Kapitel vier einer simulativen Überprüfung unterzogen. Die abschließende Diskussion der Arbeit erfolgt in Kapitel 5. Hier wird auch das Fazit gezogen und ein Forschungsausblick erarbeitet.

2 Stand der Technik in der Automobilproduktionslogistik

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Vorgänge in der heutigen Automobilproduktion beschrieben. Anschließend wird auf die bestehenden Konzepte der Materialversorgung in der Automobilmontage sowie den Informationsfluss, insbesondere für die Abrufsteuerungen, eingegangen. Abschließend erfolgt die Beschreibung der heutigen förder-, lager- und handhabungstechnischen Maschinen, die für die Materialversorgung eingesetzt wurden und werden.

2.1 Heutiger Stand der Montage in der Automobilindustrie

Laut Warnecke ist das Ziel der Montage ganz allgemein die Erstellung eines Produkts, welches aus unterschiedlichen Teilen besteht, um danach eine vorgegebene Funktion ausführen zu können¹³⁴. Der Überblick zu den Vorgängen in der Automobilmontage in diesem Kapitel dient als Grundlage für die Untersuchung der logistischen Abläufe in der Automobilindustrie in Kapitel 2.3. Einzelne Bestandteile der Fertigungsumgebung der Automobilindustrie werden in diesem Kapitel besonders ausführlich erläutert, da die im weiteren Verlauf der Arbeit neu entwickelten Logistikkonzepte in Kapitel 3 einen speziellen Bezug hierzu aufweisen.

2.1.1 Grundlagen

Grundsätzlich kann ein Automobilwerk¹³⁵ in folgende Abschnitte, sogenannte Gewerke, unterteilt werden:¹³⁶

- Presswerk
- Rohbau
- Lackiererei
- Montage

Diese Bereiche werden jetzt der Reihe nach vorgestellt, wobei insbesondere auf logistische Aspekte eingegangen wird. Der Gesamtprozess kann in der Abbildung 2.1 nachvollzogen werden. Der Hauptmaterialfluss des Produkts „Automobil“ ist grün dargestellt, während die Materialzulieferungen zu den Fertigungs- und Montagebereichen mit roten Pfeilen gekennzeichnet sind. Die unterschiedlichen Varianten A, B und C (Bereichsgrenzen) werden nach der Erklärung der Gewerke auf Seite 25 erläutert. Im Detail stellt sich der Produktionsprozess in einem Automobilproduktionswerk auf Basis der Gewerkestruktur folgendermaßen

¹³⁴ Vgl. Warnecke u. a. (1975).

¹³⁵ Ihme verwendet den Begriff Automobilfabrik. (Vgl. Ihme (2006), S. 10).

¹³⁶ Vgl. Borenich u. a. (2014), S. 58 sowie Wittek (2013), S. 24 sowie Ihme (2006), S. 11.

dar: Im **Presswerk** erfolgt die Bearbeitung von Blechteilen. Ausgehend von der Anlieferung des Rohmaterials, meistens in Form von sogenannten Coils¹³⁷ oder Blechplatten, werden in Pressen mithilfe von Werkzeugen vorgegebene Formen erzeugt. Da der Werkzeugwechsel im Presswerk relativ viel Zeit beansprucht, wird hier meist in sehr großen Produktionslosen gefertigt und es ist dementsprechend ein Pressteilelager oder ein Puffer¹³⁸ nachgelagert, siehe hierzu auch Abbildung 2.1. Hilfreich ist es, dass die geformten Blechteile aufeinander gestapelt relativ wenig Platz im Lagerbereich beanspruchen. Im **Rohbau**¹³⁹ werden die vorgeformten Blechteile mit Hilfe von Robotern verbunden. Heutzutage erfolgt die Materialverbindung meist über Punkt- oder Linienschweißen sowie seltener über Kleben oder Nieten. In mehreren Stationen werden dabei mehrere hunderte Einzelteile zu fertigen Rohkarossen verbunden.¹⁴⁰

¹³⁷ Coils sind rollenförmig aufgewickelte Blechstreifen.

¹³⁸ Puffer sind technische Anlagen, die zwischen unterschiedlichen Bereichen einer Produktion einerseits das im Aufbau befindliche Produkt aufnehmen, um dieses zu speichern, und zweitens das Produkt zu den passenden Zeitpunkten wieder ausgeben können. (Vgl. Bullinger u. a. (1993), S. 62 nach de Jong und Pawellek (1989), S. 23).

¹³⁹ Auch als Schweißerei oder Karosseriebau bzw. Karosserierohbau bezeichnet.

¹⁴⁰ Vgl. Wittek (2013), S. 24.

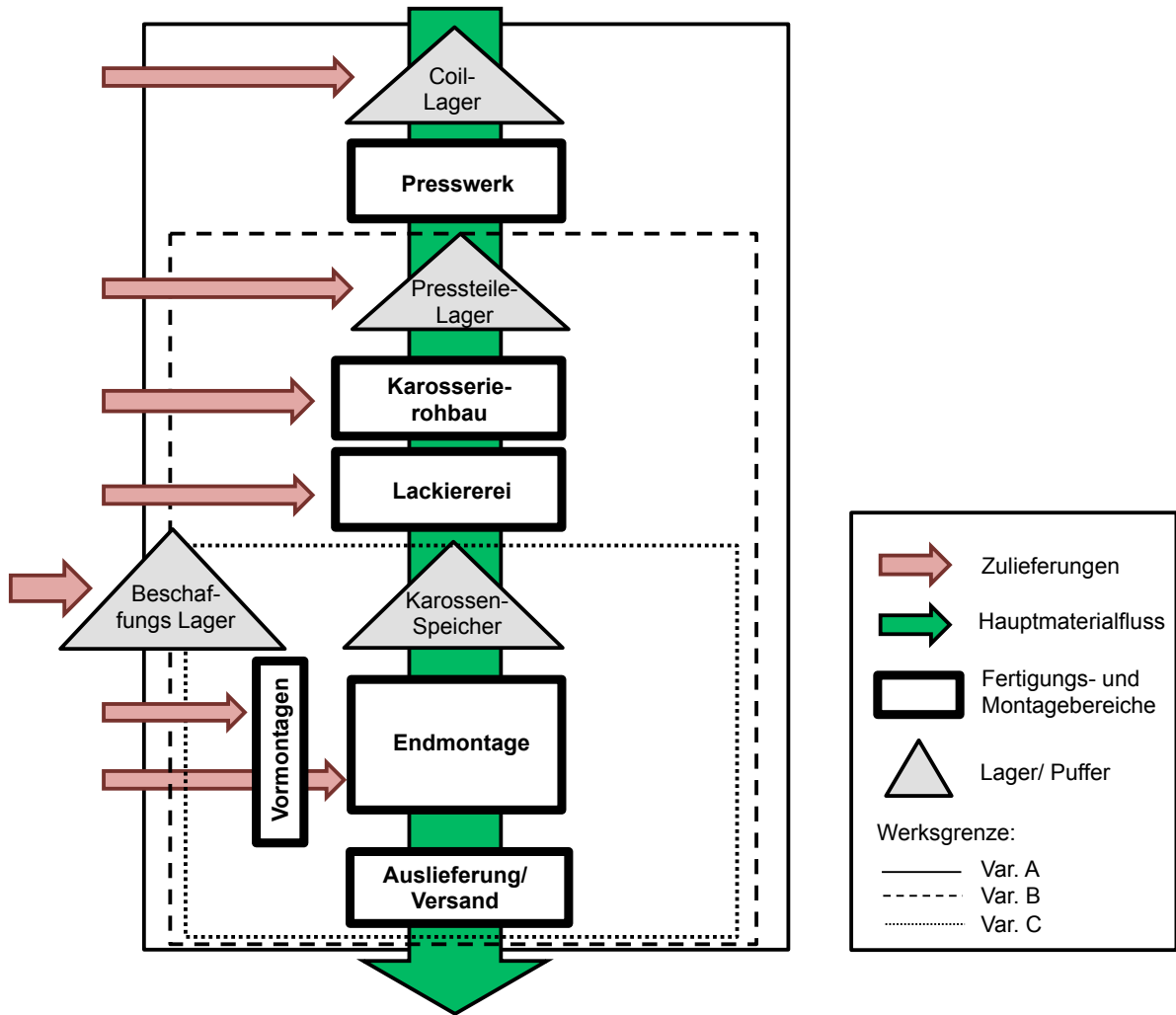


Abbildung 2.1: Zusammenhang der Gewerke in Anlehnung an Ihme (2006), S. 11 und Sillekens u. a. (2011), S. 4

Im Bereich der nachfolgenden **Lackiererei** wird durch thermische und chemische Oberflächenbehandlung eine durch den Kundenwunsch vorbestimmte Lackierung auf die Rohkarosse aufgebracht. Damit keine Farbunterschiede entstehen, werden die Türen der Fahrzeuge zusammen mit der Karosse lackiert und nach diesem Schritt wieder abmontiert, auch bekannt als abgeschlagen. Damit die Rüstarbeiten der Farbwechsel in der Lackiererei möglichst selten stattfinden müssen, werden gleichfarbige Karossen zu Blöcken zusammengefasst und gemeinsam lackiert.¹⁴¹ Im anschließenden Bereich der **Montage** erfolgt der Zusammenbau des Fahrzeugs indem die lackierte Karosse mit allen erforderlichen Bauteilen sowie dem Antrieb ausgestattet wird. Dabei sind die heutigen Montagelinien häufig als Liniemontage ausgeführt¹⁴² und meist für die Produktion eines Fahrzeugmodells¹⁴³ konzipiert

¹⁴¹ Vgl. Ihme (2006), S. 11.

¹⁴² Vgl. Richter (2006), S. 102.

¹⁴³ Wie in Kapitel 1.2 erwähnt, werden bei einigen Herstellern auch heute schon auf einer Montagelinie mehrere Fahrzeugmodelle montiert.

und gebaut. Die Endmontage, auch als Hauptlinie bezeichnet, kann grob in die drei Bereiche Inneneinbau, Fahrwerksbereich und Fahrzeugfertigstellung unterteilt werden.¹⁴⁴ Besonders großvolumige Bauteile wie die Front- und Heckstoßfänger oder die Sitze werden in Standorten der Zulieferer in Werksnähe, sogenannten Lieferantenparks¹⁴⁵, montiert und als vorgefertigte Module zum Montageort transportiert und dort am Fahrzeug montiert.¹⁴⁶ Zusätzlich zur Hauptlinie werden schon seit langer Zeit Motoren, Getriebe und Achsen sowie seit ca. 20 Jahren, auch Türen sowie Cockpits bzw. Armaturenbretter oder Mittelkonsolen in eigenen Vormontagelinien¹⁴⁷ zusammgebaut.¹⁴⁸ Dadurch können einerseits die Montagearbeitsplätze ergonomisch sinnvoller gestaltet werden und andererseits sinkt die Werkerdichte an den Montagestationen.¹⁴⁹ Die vormontierten Module treffen dann an der Türen- bzw. Cockpitmontagestation mit dem passenden Fahrzeug zusammen.¹⁵⁰ Die Vormontagen¹⁵¹ sind aus Layout- und Platzgründen¹⁵² meist als Rund-, U- oder Ovalbänder ausgeführt, siehe Abbildung 2.2.¹⁵³

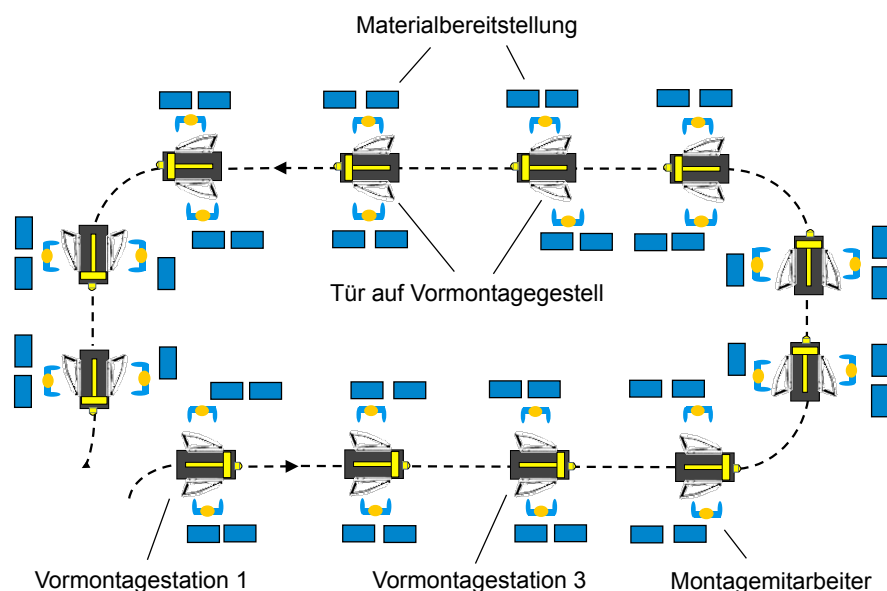


Abbildung 2.2: Vormontage am Beispiel der Tür in Rund-, U- bzw. Ovalform in Anlehnung an Richter (2006), S. 191

¹⁴⁴ Vgl. Wittek (2013), S. 24.

¹⁴⁵ Vgl. Hessenberger und Krcal (1997), S. 103 und Larsson (2002), S. 769 sowie Larsson (2002), S. 771 ff.

¹⁴⁶ Vgl. Bayer u. a. (2003), S. 154 und Klug (2006), S. 188.

¹⁴⁷ Die Vormontage wird teilweise auch als Modulmontage bezeichnet. (Vgl. Roscher (2008), S. 19).

¹⁴⁸ Vgl. Koch und Gericke (1986), S.181 f. und Ōno (1988), S. 49.

¹⁴⁹ Vgl. Koch und Gericke (1986), S. 181.

¹⁵⁰ Vgl. Herlyn und Herlyn (2012), S. 37.

¹⁵¹ Die Vormontage der Tür beginnt beispielsweise nach dem Abschlagen vom lackierten Fahrzeug. Ein Vormontagegestell nimmt dabei sowohl die linke als auch die rechte Tür auf. Anschließend werden Dichtungen, Fensterheber, Scheibe, Schloss, Türsteuergerät, Kabel und Innenverkleidung angebracht.

¹⁵² Vgl. Koch, Rueckel u. a. (2003), S. 182.

¹⁵³ Vgl. Herlyn und Herlyn (2012), S. 38.

Wie in der Abbildung 2.1 erkennbar, kann die Werksgrenze an mehreren Stellen gezogen werden, da sowohl das Presswerk als auch die Lackiererei hohe Investitionskosten und spezifisches Know-How erfordern.¹⁵⁴ Während bei der Variante A ein Werk alle Gewerke umfasst, bezieht sich die Variante B auf Produktionswerke ohne Presswerk. Aufgrund der erwähnten Investitionskosten für ein Presswerk, nutzen die Automobilhersteller Skaleneffekte zur Kostenreduktion, indem ein Presswerk mehrere Produktionswerke mit Bauteilen und vorgefertigten Baugruppen versorgt. Die Variante C besteht nur aus dem Gewerk Endmontage, es besitzt somit gegenüber der Variante B keinen Rohbau und keine Lackiererei. Dieses Werk bekommt aus einem anderen Werk der Varianten A oder B lackierte oder unlackierte Rohkarossen bzw. Karosserieteile oder vormontierte Baugruppen. Je nach Umfang und Bearbeitungsgrad der zugelieferten Teile lassen sich die Verfahren Semi knocked down (SKD)¹⁵⁵, Medium knocked down (MKD)¹⁵⁶ und Completely knocked down (CKD)¹⁵⁷ unterscheiden.¹⁵⁸

Durch graue Dreiecke sind in Abbildung 2.1 Lager und Puffer dargestellt. Ihr Zweck ist die Entkopplung¹⁵⁹ zwischen den Gewerken für den Fall von Störungen aber auch für die Umsetzung unterschiedlicher Schichtmodelle. Es gibt diese Puffer nicht nur nach dem Presswerk sondern auch zwischen Lackiererei und Montage als sogenannte Entkopplungspuffer.¹⁶⁰ Gerade für die Bereiche des Automobilwerks, die im Fertigungsprozess nach der Lackiererei folgen, sind diese Puffer sehr wichtig, da einerseits Fahrzeuge gleicher Farben zusammen lackiert werden, um Kosten für die Farbwechsel zu sparen und andererseits da Fahrzeuge aus unterschiedlichen Gründen mehrere Prozessdurchläufe¹⁶¹ benötigen.¹⁶² Die Puffer, die nach der Lackiererei angeordnet sind, werden häufig als Sortierpuffer¹⁶³ bezeichnet, da

¹⁵⁴ Vgl. Ihme (2006), S. 11.

¹⁵⁵ SKD sind teilzerlegte Bausätze eines Fahrzeugs, für die Endmontage an einem Standort. Die Fahrzeuge werden hierbei im Produktionswerk zerlegt, um Importbeschränkungen zu umgehen. (Vgl. Arnold (2006b), S. 82 und Vgl. Klaus und Krieger (2012), S. 516) Bei der SKD-Variante sind die Karosserieteile schon lackiert und komplett ausgestattet, sie müssen also nur noch zusammengebaut werden. (Vgl. Klug (2010), S. 329 und Urban und Stirzel (2006), S. 5 sowie Klippel (1993), S. 149).

¹⁵⁶ Bei MKD wird das Fahrzeug in noch mehr Einzelteile als bei SKD zerlegt (häufig zwischen 1.000 und 2.000 Teilepositionen) und inklusive einer lackierten, jedoch nicht ausgestatteten Karosserie versendet.

¹⁵⁷ CKD sind komplett zerlegte Bausätze eines Fahrzeugs für die Endmontage. Hintergrund ist, ähnlich wie bei der SKD-Variante, die Umgehung von Importzöllen. (Vgl. Arnold (2006b), S. 82) Das sogenannte CKD-Verfahren findet außerdem häufig im Rahmen von Markteintrittsstrategien Anwendung. Die CKD-Montagesätze stammen von Zulieferern bzw. aus einem Stammwerk mit Presswerk und müssen im Endmontagewerk zuerst zusammengeschweißt und lackiert sowie anschließend montiert werden. (Vgl. Klug (2010), S. 329 sowie Urban und Stirzel (2006), S. 5).

¹⁵⁸ Vgl. Ihme (2006), S. 11.

¹⁵⁹ Entkopplung bezeichnet alle Maßnahmen, die vorhandene Abhängigkeiten zwischen Montagestationen oder Montageschritten bzw. zwischen Mitarbeitern und Maschinen reduzieren oder eliminieren und dadurch den Nutzungsgrad des Montagesystems erhöhen. (Vgl. Freye (1997), S. 50 sowie Bullinger u. a. (1993), S. 23 und 50 ff.)

¹⁶⁰ Vgl. Conway u. a. (1988), S. 229, für die Dimensionierung solcher Puffer siehe beispielsweise Zeile (1995), S. 82 ff. und Sunarjo und Meinhardt (2007).

¹⁶¹ Mehrere Läufe durch den Lackierprozess kommen einerseits für spezielle Farben, die nicht in einem Durchgang aufgetragen werden können, aber auch zum Ausgleichen von Qualitätsproblemen zum Einsatz. (Vgl. Li (2004), S. 90 und Boysen u. a. (2011), S. 276).

¹⁶² Vgl. Li (2004), S. 90.

¹⁶³ Sortierpuffer werden auch Dispositionspuffer genannt und befähigen die Umsetzung der geplanten Produktionsreihenfolge für einen Fertigungsbereich unabhängig von der ausgeführten Auftragsreihenfolge des vorgelagerten Bereichs. (Vgl. Bullinger u. a. (1993), S. 63).

aus ihnen heraus die Fahrzeuge in der festgelegten Produktionsreihenfolge entnommen werden.¹⁶⁴

2.1.2 Band und Takt

Bei der getakteten Fließfertigung, auch als Fließmontage oder Taktmontage¹⁶⁵ bezeichnet, handelt es sich in der Automobilproduktion¹⁶⁶ um ein Produktionssystem mit Flussorientierung. Die im Aufbau befindlichen Werkstücke werden mit Hilfe eines kontinuierlichen Transportsystems in ergonomisch möglichst sinnvoller Lage für den Mitarbeiter von einer Bearbeitungs- oder Montagestation zur darauf folgenden Station bewegt, siehe Abbildung 2.3. Diese Vorgehensweise stellt hohe Anforderungen an die Materialbereitstellung, da Fehlteile in sehr kurzer Zeit zu Stillständen des Fließsystems führen können.¹⁶⁷



Abbildung 2.3: Hängebahn zur Rädermontage bei Porsche im Werk in Leipzig (Quelle: Porsche AG (2016))

Für den Transport der im Aufbau befindlichen Fahrzeuge durch die Montagestationen der Endmontagelinie finden sich in den Automobilwerken, insbesondere in den Volumenwerken, mehrheitlich starre Schubplattformen, Förderbänder, Plattenbandförderer¹⁶⁸ oder Hängebahnen, siehe Abbildung 2.4.¹⁶⁹

¹⁶⁴ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 110 und Aoki u. a. (2014), S. 380.

¹⁶⁵ Vgl. Zäpfel (1989), S. 186.

¹⁶⁶ Die Montagestruktur der Automobilwerke mit einer Mischung aus Automatikstationen und manuellen Montagestationen (auch als teilautomatisiert bezeichnet) ist in die Kategorie Großserienmontage einzuordnen. Abzugrenzen ist hiervon die Kleinserienmontage. (Vgl. Ihme (2006), S. 336) Als Kleinserienmontage oder Kleinserienfertigung wird eine Produktion bezeichnet, wenn die Jahresausbringungsmenge nur wenige 100 Stück beträgt und geringe Wiederholhäufigkeiten vorliegen. (Vgl. Köhler (1997), S. 6 nach Schomburg (1980), S. 70 sowie Böhl (2001), S. 7 f.).

¹⁶⁷ Vgl. Zäpfel (1989), S. 187.

¹⁶⁸ Beispielsweise in Form von stumpf aneinander stoßenden Platten aus Metall oder Holz, die von einem Kettenförderer bewegt werden. (Vgl. Arnold u. a. (2008), S. 626 und Bruns u. a. (2011), S. U79).

¹⁶⁹ Vgl. Bruns u. a. (2011), S. U79 und Linn (2017), S. 103.



Abbildung 2.4: Interieurlinie mit Schubplattformen bei Porsche im Werk in Leipzig (Quelle: Porsche AG (2016))

Teilweise existieren auch Montagekonzepte, die fahrerlose Transportsysteme (FTS)¹⁷⁰ für den Transport der Automobile verwenden.¹⁷¹ Die dabei zum Einsatz kommenden fahrerlosen Transportsysteme (FTF)¹⁷² sind in erster Linie als Transportmittel zwischen Montageschritten zu betrachten und verfügen nur teilweise über Hub- und Senkfunktionen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass FTF als Montagefahrzeuge zum aktuellen Zeitpunkt besonders bei Kleinserienfertigungen zum Einsatz kommen. Darüber hinaus ist die Verwendung von Montage-FTF in der Großserienfertigung meist auf die Vormontage einzelner Baugruppen (z. B. des Cockpits oder der Türen) beschränkt. Es ist also noch erhebliches Potential für Konzepte und die Nutzung solcher Montage-FTF in der Endmontage vorhanden.

Bei der Taktfertigung ist die Bearbeitungszeit an den Montagestationen durch eine gemeinsame Taktzeit für das gesamte Band vorgegeben.¹⁷³ Hierfür wird in der vorliegenden Dissertation der Begriff identische Arbeitstakte verwendet. Während eine Endmontagelinie in heutigen Automobilwerken aus ca. 200 Stationen besteht, liegt diese identische Taktzeit meist zwischen 60 und 100 Sekunden und ist abhängig von den gewählten Ausstattungsoptionen der zu montierenden Fahrzeuge.¹⁷⁴ Ein Vorteil bei der Taktfertigung ist der Entfall des Koordinierungsaufwands für die Kapazitätsabstimmung jeder einzelnen Montagestation.¹⁷⁵ Da unterschiedliche ausgestattete Fahrzeuge jedoch nicht die gleichen Montageinhalte besitzen, ergibt sich die Auslastung einer Station über die Mischung aller Fahrzeuge, die die Station durchlaufen.¹⁷⁶ Diese Mischung wird als Modell-Mix bezeichnet.¹⁷⁷ Die Aufgabe der

¹⁷⁰ Erläuterung von FTS siehe Kapitel 2.4.2.

¹⁷¹ Ein Beispiel hierfür ist die Fertigung des Audi R8 in Neckarsulm oder des Porsche 918 Spyder in Zuffenhausen oder die Produktion des BMW i3 in Leipzig.

¹⁷² Zur Erläuterung von FTF siehe Kapitel 2.4.2.

¹⁷³ Vgl. Boysen u. a. (2007), S. 760.

¹⁷⁴ Vgl. MacDuffie u. a. (1996), S. 353 und Boysen u. a. (2015), S. 116 und Grünz (2004), S. 158 sowie Ihme (2006), S. 337 und Aoki u. a. (2014), S. 379.

¹⁷⁵ Vgl. Zäpfel (1989), S. 187.

¹⁷⁶ Vgl. Rothlauf (2010), S. 471.

¹⁷⁷ Vgl. Meyr (2004), S. 451 und Becker (2006b), S. 306.

Produktionsprogrammplanung ist es, einen ausgeglichenen Modell-Mix zu erreichen, bei welchem die Montagestationen aufgrund vieler hintereinander zu montierender Fahrzeuge mit umfassenden Ausstattungsvarianten nicht überlastet bzw. bei vielen Fahrzeugen nacheinander mit geringen Ausstattungsvarianten nicht voll ausgelastet ist.¹⁷⁸ Der Taktzeitunterschied zwischen einem voll ausgestatteten Fahrzeug und einem gering ausgestatteten Fahrzeug wird als Zeitspreizung bezeichnet.¹⁷⁹ Das Ziel der Montageplanung ist es, durch geschickte Planung der Montageinhalte die Taktzeitspreizung so weit möglich zu reduzieren, da dies die geringsten Effizienzeinschnitte mit sich bringt.¹⁸⁰

Die Bestimmung der Taktzeit in einem Montagewerk ist umso komplexer, je mehr Varianten gebaut werden.¹⁸¹ Das Ziel ist eine Austaktung bei der die Mitarbeiter mit ihren Montagevorgängen in Bezug auf Ihre Arbeitszeit möglichst ausgelastet sind.¹⁸² Dies geht einher mit der Zuweisung und Sequenzierung der Fahrzeuge auf die Montagelinie. Vereinfacht ausgedrückt ist durch die Aneinanderreihung eines Fahrzeugs mit vielen Montageinhalten und somit langer Montagezeit¹⁸³ für eine Station festgelegt, dass die nächsten Fahrzeuge in der Produktionsreihenfolge an dieser Station geringere Montageinhalte haben, um über beide Fahrzeuge eine Takteinhaltung gewährleisten zu können. Bezeichnet werden solche Festlegungen als Sequenzierungsregeln oder Modell-Mix-Begrenzungen.¹⁸⁴ Wird diese Begrenzung nicht eingehalten, folgen durch den Taktausgleichsverlust¹⁸⁵ unwirtschaftliche Produktionszustände durch gering ausgelastete Montagemitarbeiter.¹⁸⁶ Beispielsweise müssen für die Installation eines Navigationsgeräts spezielle Montagevorgänge sowohl im Dach (GPS-Antenne), im Innenraum (Kombi-Instrument, Display) als auch im Radhausbereich (Sensoren) vorgenommen werden.¹⁸⁷ Der Montagemitarbeiter arbeitet dann am ersten Fahrzeug länger als die Taktzeit eigentlich vorgibt und holt dies mit dem zweiten Fahrzeug wieder auf. Die festgelegte Montagereihenfolge der Fahrzeuge wird, wie in Kapitel 1.4 beschrieben, als Perlenkette bezeichnet.¹⁸⁸

¹⁷⁸ Vgl. Meyr (2004), S. 451 und Staeblein und Aoki (2015), S. 261.

¹⁷⁹ Vgl. Klug (2010), S. 169.

¹⁸⁰ Vgl. Küber u. a. (2016), S. 339.

¹⁸¹ Vgl. Ihme (2006), S. 336.

¹⁸² Vgl. Roscher (2008), S. 21.

¹⁸³ Die Länge der Montagezeit wird durch die auszuführenden Arbeitsinhalte unter Beachtung der Taktzeit festgelegt. (Vgl. Freye (1997), S. 126 und Zäpfel (1989), S. 186).

¹⁸⁴ Vgl. Boysen u. a. (2011), S. 276 f. und Kildridge und Wester (1963)

¹⁸⁵ Dieser Wert gibt an, wie viel Zeit der Montagemitarbeiter in einem Takt für ein bestimmtes Fahrzeug keine Arbeitstätigkeit ausführt, also Leerzeit hat. Beeinflusst wird der Taktausgleichsverlust durch eine hohe Varianz bei den Fahrzeugen und somit auch bei den Arbeitsvorgängen, die zu einem Mehrbedarf von Montagemitarbeitern oder Stationen führen kann. (Vgl. Roscher (2008), S. 22).

¹⁸⁶ Vgl. Roscher (2008), S. 22.

¹⁸⁷ Vgl. Herlyn und Herlyn (2012), S. 220.

¹⁸⁸ Vgl. Herlyn und Herlyn (2012), S. 220 und Günthner (2008), S. 377 sowie Elkin (2006), S. 26.

2.1.3 Verlagerung der Wertschöpfung

Während vor einigen Jahrzehnten noch ein Großteil der Wertschöpfung¹⁸⁹ in den Automobilwerken selbst stattfand, hat dieser Wert seitdem massiv abgenommen.¹⁹⁰ Dieser Wandel ist anhand der Konzentration auf das Kerngeschäft¹⁹¹ zu erklären, die aufgrund des zunehmenden Wettbewerbs durch die Automobilhersteller vollzogen wurde.¹⁹² Zusätzlich zum wachsenden Preis- und Zeitdruck auf die Automobilhersteller, steigt die Komplexität der Kundenwünsche und die Forderung nach Innovationen nehmen zu. Dies führt zu einem zunehmenden Entwicklungsaufwand, der jedoch mit kürzeren Entwicklungszeiten und geringeren Kosten umgesetzt werden muss. Um dieser Herausforderung gerecht zu werden, waren die Automobilhersteller gezwungen, sich auf bestimmte Aufgaben und Entwicklungsfelder zu konzentrieren und andere Entwicklungen von Zulieferern¹⁹³ übernehmen zu lassen, um anschließend nur die fertigen Komponenten zu beziehen.¹⁹⁴ Dadurch sank der Eigenfertigungsanteil an den produzierten Fahrzeugen und der Anteil an fremdbezogenen Bauteilen¹⁹⁵ nahm zu. Während im Jahr 2003 im Schnitt der Eigenfertigungsanteil¹⁹⁶ der Automobilhersteller noch bei 36 % lag, hat sich dieser Wert bis ins Jahr 2015 auf 24 % verringert.¹⁹⁷ Der Spitzenreiter ist dabei der Porsche Cayenne mit einem Eigenfertigungsanteil von nur noch 9 %.¹⁹⁸ Lediglich bei innovativen Nischenfahrzeugen, die am Beginn eines neuen Technologielebenszykluses stehen (beispielsweise dem Toyota Prius Hybrid), liegt der Eigenfertigungsanteil des Herstellers bei ca. 70 %.¹⁹⁹ Für diese Arbeit ist besonders relevant, dass die Reduzierung des Eigenfertigungsanteils zu einem starken Anstieg der außerbetrieblichen Logistik führt.²⁰⁰

¹⁸⁹ Vgl. VDA (2008), S. 77.

¹⁹⁰ Vgl. Sanz u. a. (2007), S. 5.

¹⁹¹ Als Kerngeschäft ist hierbei die Konstruktion, die Endmontage und der Vertrieb sowie zugehöriger Service von Automobilen anzusehen. (Vgl. Consulting (2004), S. 12 und 18).

¹⁹² Vgl. Baum und Delfmann (2010), S. 7 und Sanz u. a. (2007), S. 395 f. und Ostertag (2008), S. 2 sowie Consulting (2004), S. 136.

¹⁹³ Diese Lieferanten werden dann als Modul- oder Systemlieferanten bezeichnet, wenn sie komplette Systeme oder integrierte Leistungen an den OEM liefern. (Vgl. Lawrenz (2001), S. 283).

¹⁹⁴ Vgl. Rennemann (2007), S. 14 f. und Kuhn (2002), S. 10.

¹⁹⁵ Der Fremdbezug von Bauteilen kommt, beispielsweise bei der Volkswagen AG dann zum Einsatz, wenn Komponenten oder Montageteile bei einem anderen Unternehmen günstiger, rascher, qualitativ hochwertiger oder zuverlässiger hergestellt werden können. (Vgl. Göpfert u. a. (2013), S. 162).

¹⁹⁶ Statt des Begriffs Eigenfertigungsanteil wird von einigen Autoren das Wort Fertigungstiefe verwendet. (Vgl. Göpfert (2016), S. 181 f.).

¹⁹⁷ Vgl. Proff und Proff (2013), S. 142 und Krcal u. a. (2008), S. 10 f. und Scholtissek (2004), S. 28 sowie Ahsen (2006), S. 116.

¹⁹⁸ Vgl. Wullenkord u. a. (2005), S. 7 und Brüggemeier (2007), S. 81 nach Scholtissek (2004), S. 1.

¹⁹⁹ Vgl. Krcal u. a. (2008), S. 21 f.

²⁰⁰ Vgl. Löffler (2011), S. 39.

2.1.4 Nacharbeit

In allen Automobilwerken ist die Tätigkeit der Nacharbeit präsent.²⁰¹ Gründe hierfür sind beispielsweise Qualitäts- oder Mengenprobleme der Zulieferer, Fehler in den logistischen Abläufen und Beschädigungen während der Montage. Nacharbeit ist laut DIN ISO 9000 definiert als „Maßnahme an einem fehlerhaften Produkt, damit es die Anforderungen erfüllt“.²⁰² Damit kann diese Tätigkeit als ein wiederholtes Ausführen oder die Korrektur von Arbeitsinhalten wegen Nichterfüllung der gesetzten Anforderungen beschrieben werden.²⁰³ In der Automobilindustrie kommen diese Tätigkeiten dann zum Einsatz, wenn Produktionsfehler auftreten, Montagematerial fehlt oder dieses mangelhaft ist. Die Fahrzeuge werden entweder ausgeschleust²⁰⁴ oder aber häufiger über die Montagelinie fast komplett aufgebaut und anschließend durch speziell geschultes Personal wieder zerlegt, um das fehlende oder mangelhafte Material auszutauschen.²⁰⁵ Zu beachten ist hierbei, dass die benötigte Zeit und die anfallenden Kosten für die Fehlerbehebung in Relation zum Komplettierungsgrad des Fahrzeugs um den Faktor 10 ansteigen, auch bezeichnet als „Zehnerregel der Fehlerkosten“.²⁰⁶ Die durchschnittliche Nacharbeitszeit pro Fahrzeug zählt zu den wesentlichen Kennzahlen in Bezug auf Produktionseffektivität²⁰⁷. Dies ist nicht ohne Grund, da sie sehr transparent den Produktivitätsgrad der Automobilfertigung im betreffenden Werk darstellt. In heutigen Montagesystemen liegt der Anteil an KFZ die einen Montageprozess ohne Nacharbeit oder Prozesswiederholungen verlassen im Schnitt bei 60 - 70 % und laut einer Untersuchung von Holweg und Pil maximal bei 85 %.²⁰⁸ Auch wenn das mittel- bis langfristige Ziel ist, fehlerfreie Prozesse in der Endmontage zu etablieren, sind Montagefehler, Zulieferfehler, Qualitätsprobleme und Lieferprobleme nie vollständig auszuschließen.²⁰⁹ Ein deutliches Beispiel von hohem zeitlichen Aufwand der Nacharbeit liefert der Kabelsatz: Während die Montage bis zu 360 Minuten betragen kann, beläuft sich die Zeit für den Austausch eines fehlerhaften Kabelsatzes auf ca. 16 Stunden.²¹⁰

²⁰¹ Vgl. Töpfer (2007), S. 137.

²⁰² DIN EN ISO 9000 (2005), S. 28.

²⁰³ Vgl. Hwang u. a. (2009), S. 188, Müller (2014), S. 14 und Ashford (1989), S. 141.

²⁰⁴ Das Verändern der Perlenkette durch Herausnehmen eines Fahrzeugs aus der Produktionslinie führt zu hohen Aufwänden sowohl für Montage als auch Logistik. (Vgl. Günthner (2008), S. 377) Kritisch ist hierbei besonders die Länge der Nacharbeitszeit, die je nach Fehler kurz oder sehr lang sein kann. (Vgl. Holweg und Pil (2004), S. 40).

²⁰⁵ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 107 und Meißner (2009), S. 64.

²⁰⁶ Vgl. Töpfer (2007), S. 137.

²⁰⁷ Bei Besuchen unterschiedlicher Produktionswerke wurden zwischen 20 und 35 Minuten pro Fahrzeug (im Schnitt) mitgeteilt. Hochgerechnet auf eine Produktionsmenge von 800 Fahrzeugen am Tag ergibt dies eine Nacharbeit von 266 Stunden pro Tag (bei Annahme von 20 Minuten je Fahrzeug). Geht man zur Vereinfachung von nur einem Mitarbeiter pro Nacharbeitsfahrzeug aus - der reale Wert beträgt eher 1,3 - dann ergibt sich bei 7,5 Stunden Arbeitszeit pro Tag, dass somit ca. 35 Mitarbeiter am Tag mit Nacharbeit beschäftigt sind.

²⁰⁸ Vgl. Meißner (2009), S. 9 und Holweg und Pil (2004), S. 40.

²⁰⁹ Vgl. Klug (2010), S. 90.

²¹⁰ Vgl. Endres und Wehner (2006), S. 325.

2.2 Flexible, wandlungsfähige und wandelbare Systeme

Die Begriffe Wandlungsfähigkeit, Wandelbarkeit und Flexibilität sind im Zusammenhang mit sich ändernden Produktionsanlagen sehr wesentlich. Aus diesem Grund werden die Begriffe an dieser Stelle erläutert. In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Definitionen für die drei Begriffe.²¹¹

2.2.1 Flexibilität

Westkämper definiert Flexibilität²¹² folgendermaßen: „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.“²¹³ Nach Pleschak ist Flexibilität „das Vermögen [eines Systems], auf Veränderungen der Ein- und Ausgangsgrößen sowie der Bedingungen der Produktion im Rahmen definierter Grenzen ohne Verlust an Stabilität und Effektivität reagieren [zu können].“²¹⁴ Weiterhin beschreibt Bullinger, dass bei flexiblen Systemen Anforderungsänderungen ohne Störungen des innerbetrieblichen Ablaufs rasch umgesetzt werden können.²¹⁵ Zusammenfassend beschreibt der Begriff Flexibilität²¹⁶ somit das Potential von Unternehmen und Prozessen auf Änderungen im Rahmen von vordefinierten Bereichen oder Korridoren²¹⁷ reagieren zu können.²¹⁸

Damit diese Reaktionen mit geringen Investitionen²¹⁹ durchgeführt werden können, muss das Unternehmen zusätzliche Ressourcen oder weitere Kapazitäten²²⁰ bereithalten. Hierzu zählen beispielsweise besondere Qualifikationen der Mitarbeiter, Schichtmodelle, Arbeitszeitkonten²²¹ oder freie Produktionskapazitäten von Anlagen und Maschinen sowie zusätzliche Lagerkapazitäten²²². Werden diese Flexibilitätsbereiche oder -korridore von vornherein bei der Auslegung eines Systems festgelegt, so steht ihnen in den nicht genutzten Zeiten nur eine passive Rolle zu.²²³ Bei Änderungen der Prozesse im Rahmen des Korridors kann meist direkt und ohne aufwändige Umbau- oder Erweiterungsmaßnahmen die Anpassung (z.

²¹¹ Siehe beispielsweise Kara und Kayis (2004), S. 466 ff. sowie De Toni und Tonchia (1998), S. 1587 ff. und ElMaraghy (2005), S. 262 f.

²¹² Abgeleitet aus dem Lateinischen von *flexibilis*, was biegsam oder geschmeidig bedeutet. (Vgl. Stowasser u. a. (1980))

²¹³ Vgl. Westkämper u. a. (2000), S. 24.

²¹⁴ Vgl. Pleschak (1988), S. 56.

²¹⁵ Vgl. Bullinger u. a. (1993), S. 36.

²¹⁶ Die Unterteilung in statische und dynamische Flexibilität soll an dieser Stelle nicht betrachtet werden. Informationen hierzu finden sich beispielsweise in: De Toni und Tonchia (1998), S. 1611 ff.

²¹⁷ Kuhn et al. beschreiben, dass ein System nur dann Flexibilität als Eigenschaft besitzt, wenn keine Veränderungen der Ressourcenausstattung oder der Struktur vorgenommen werden, um auf die Änderungen zu reagieren. (Vgl. Kuhn u. a. (2011a), S. 180).

²¹⁸ Vgl. Westkämper u. a. (2000), S. 24 und Wiendahl (2002), S. 127.

²¹⁹ Vgl. Nyhuis u. a. (2008), S. 87.

²²⁰ Vgl. Fleischmann u. a. (2006), S. 199 sowie Wittek (2013), S. 27.

²²¹ Vgl. Sillekens u. a. (2011), S. 4.

²²² Vgl. Schneeweiß (1992), S. 142.

²²³ Vgl. Spath (2008), S. 11.

B. höhere Produktionsmenge) kurzfristig umgesetzt werden, siehe Abbildung 2.5.²²⁴ Werden jedoch Änderungen notwendig, die nicht mehr im Flexibilitätskorridor liegen, dann müssen eventuell zusätzliche Maßnahmen (dargestellt durch das Fragezeichen in Abbildung 2.5) erfolgen, um den neuen Korridor für die Produktion oder die Dienstleistungen zu erreichen.

Als Vision für zukünftige Produktionssysteme werden aktuell sogenannte rekonfigurierbare Produktionssysteme und Maschinen untersucht und entwickelt, deren Kapazität und Funktionalität flexibel anpassbar ist.²²⁵ Das Ziel dieser Produktionssysteme ist erstens die Reduzierung der Vorlaufzeit bei Einführung neuer Systeme oder Optimierung bestehender Systeme und zweitens die rasche Integration von neuartigen Technologien bzw. neuen Funktionen.²²⁶

2.2.2 Wandlungsfähigkeit

„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.“²²⁷

Anhand dieser Definition wird deutlich, dass die Wandlungsfähigkeit eines Systems, im Vergleich zur Flexibilität, der Bereich außerhalb der vordefinierten Flexibilitätsbereiche ist, siehe Abbildung 2.5.²²⁸ Kuhn et al. sprechen deshalb in Bezug auf Wandlungsfähigkeit von einer Verschiebung der Flexibilitätsbereiche, wie dies in der Abbildung zu sehen ist.²²⁹ Die zentrale Frage lautet dementsprechend: Wie schnell kann das System über die bestehenden Flexibilitätskorridore hinaus, also den mit einem Fragezeichen dargestellten Bereich in Abbildung 2.5, angepasst werden und welche strukturellen Veränderungen sind dafür notwendig.²³⁰ Damit ein System hohe Wandlungsfähigkeit aufweist, werden Entwicklungs- und Anpassungsfähigkeit benötigt.²³¹ Dabei ist das Ziel die Minimierung des finanziellen und zeitlichen Umgestaltungsaufwands bei gleichzeitiger Minimierung der Zusatzkosten bzw. der Zusatzinvestitionen.²³² Dementsprechend ist für jedes System ein Abwägen zwischen vorgehaltener Flexibilität und Wandlungsfähigkeit²³³ notwendig.²³⁴ Es bleibt festzuhalten, dass

²²⁴ Vgl. Göpfert u. a. (2013), S. 179 sowie Schneeweiß (1992), S. 141.

²²⁵ Vgl. Lorenzer (2011).

²²⁶ Vgl. ElMaraghy (2005), S. 264.

²²⁷ Vgl. Westkämper u. a. (2000), S. 25.

²²⁸ Vgl. Wiendahl und Heger (2003), S. 34 f. sowie Heinecker (2006), S. 53.

²²⁹ Vgl. Kuhn u. a. (2011a), S. 180.

²³⁰ Vgl. Spath (2008), S. 12.

²³¹ Vgl. Schenk und Wirth (2004), S. 495.

²³² Vgl. Heinecker (2006), S. 54 f.

²³³ Ein Beispiel könnte hier die zusätzliche Halterung an einer Werkzeugmaschine sein. Für die normale Produktion und die Schwankungen im Rahmen der Flexibilitätskorridore wird diese Halterung nicht benötigt. Erfolgt jedoch eine große Änderung des Produkts, die zusätzliche Prozesse auf der Werkzeugmaschine erfordern, so können zusätzliche Geräte an der Haltestange befestigt werden. Ohne die Haltestange wäre der Umgestaltungsaufwand wesentlich höher.

²³⁴ Vgl. Spath (2008), S. 11.

Wandlungsfähigkeit als Faktor wesentlich für den Erfolg eines Unternehmens in einem turbulentem Umfeld verantwortlich ist.²³⁵

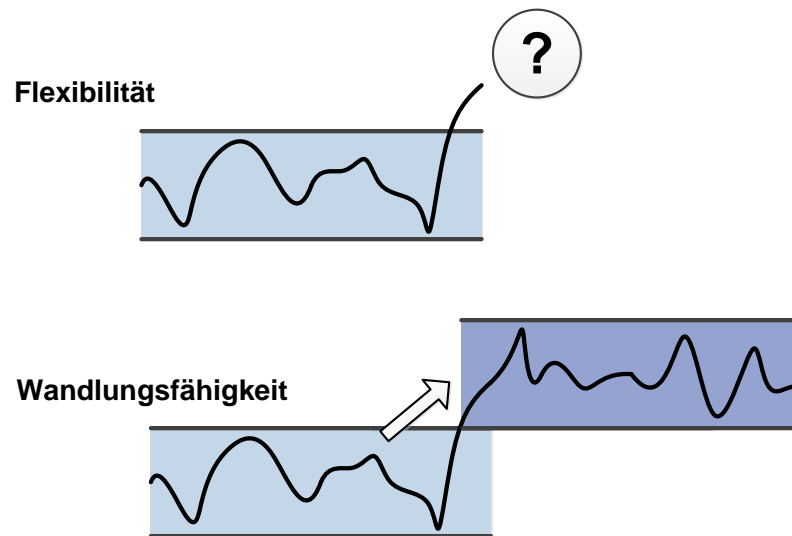


Abbildung 2.5: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an Spath (2008), S. 12

Funktionen zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit werden als Wandlungsbefähiger bezeichnet.²³⁶ Dabei können folgende Wandlungsbefähiger unterschieden werden²³⁷:

- Modularität bezeichnet die Austauschbarkeit von Funktionselementen oder -einheiten (beispielsweise Plug&Produce-Module²³⁸) ohne, dass dabei die Funktionen des Gesamtsystems behindert werden.²³⁹
- Universalität ist die Eigenschaft eines Systems differenzierende Anforderungen in Bezug auf die Technologie oder das Produkt zu erfüllen (beispielsweise Variantenflexibilität).
- Mobilität beschreibt die Fähigkeit von Objekten zur uneingeschränkten Bewegbarkeit im Raum bzw. in der Fabrik (beispielsweise eine Maschine auf Rädern).²⁴⁰
- Kompatibilität bezeichnet die Eigenschaft von Systemen sich in Bezug auf Material, Energie und Informationen zu vernetzen (beispielsweise standardisierte Softwareschnitt-

²³⁵ Vgl. Westkämper u. a. (2000), S. 22.

²³⁶ Vgl. Scholz-Reiter und Sowade (2011), S. 9.

²³⁷ Vgl. Hernández Morales (2003), S. 54 und Wiendahl und Heger (2004), S. 34 und Vgl. Nyhuis u. a. (2007), S. 289 f. und Wiendahl (2005), Folie 5 und Wiendahl u. a. (2007), S. 4 sowie ElMaraghy (2005), S. 269.

²³⁸ Plug&Produce-Module sind Produktionsmodule, die direkt nach einem Zusammenschließen funktionieren und Gegenstände produzieren können, ohne die Notwendigkeit einer aufwändigen und zeitintensiven Programmierung zur Abstimmung der Module untereinander. (Vgl. Westkämper (2001), S. 482) Weitere Beschreibungen inklusive aktueller Ansätze der Forschung hierzu finden sich beispielsweise in Vorderer u. a. (2016).

²³⁹ Vgl. Pleschak (1988), S. 56 und Hernández Morales (2003), S. 55.

²⁴⁰ Vgl. Hernández Morales (2003), S. 55.

stellen).

- Skalierbarkeit beschreibt die Möglichkeiten der Minimierung oder Maximierung eines Systems hinsichtlich Personen, Räumen und technischer Einrichtungen (beispielsweise flexible Arbeitszeiten).

Als Beispiel für die Erfüllung mehrerer Wandlungsbefähiger kann die Mensch-Roboter-Kollaboration angesehen werden. Die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine führt zu höherer Skalierbarkeit und Universalität der Anwendung. Während der Montagearbeiter Tätigkeiten übernimmt, die Achtsamkeit, komplexe Bewegungsabläufe oder besondere Feinfühligkeit erfordern²⁴¹, unterstützt der Roboter durch Übernahme monotoner Tätigkeiten wie Schrauben oder Einsetzen von schlecht handhabbaren Bauteilen (beispielsweise wegen besonderer Geometrie oder eines hohen Gewichts). Bei neuen oder zusätzlichen Montageumfängen führt der Mitarbeiter den Roboter per Hand. Dies führt zur Erfüllung des Wandlungsbefähigers Universalität. In Bezug auf die Skalierbarkeit kann die Produktionsmenge bei der Mensch-Roboter-Kollaboration kurzfristig angepasst werden. Bei Bedarf kann dann der Roboter eine programmierte Montageaufgabe allein erfüllen, benötigt hierfür aber mehr Zeit, das Ergebnis ist eine geringere Produktionsmenge. Werden höhere Mengen benötigt, dann unterstützt der Mitarbeiter den Roboter, da hierdurch die Bearbeitungszeit sinkt.

2.2.3 Wandelbarkeit

„Ein System wird als wandelbar bezeichnet, wenn seine räumliche Strukturierung sowie sein Verhaltensspektrum aufgrund einer Anpassung des Umfangs an Merkmale sowie deren Ausprägungen auch an zunächst unbekannte Gegebenheiten veränderbar ist.“²⁴²

Wandelbarkeit kann dementsprechend als die Eigenschaft eines Systems verstanden werden, auf unvorhergesehene und ungeplante Ereignisse zu reagieren²⁴³ oder bislang unbekannte Anforderungen²⁴⁴ erfüllen zu können.²⁴⁵ Im Gegensatz zur Flexibilität, bei der Veränderungen in bestimmten Korridoren möglich sind, stehen somit bei der Wandelbarkeit eher die unvorhersehbaren Ereignisse im Fokus. Wandelbarkeit kann zusammenfassend auch als Steigerung der Flexibilität bezeichnet werden.²⁴⁶

In der Automobilindustrie finden aktuell häufig in einem Zeitraum von vier bis sechs Jahren Modellwechsel statt.²⁴⁷ Dementsprechend werden die Faktoren Flexibilität und Wandlungsfähigkeit bei der Neugestaltung von Produktionslinien und -anlagen aktuell schon mit

²⁴¹ Ein Beispiel für eine derartige Tätigkeit wäre das Einclippen von Kunststoffteilen in der TÜRENVORMONTAGE.

²⁴² Vgl. Westkämper u. a. (2000), S. 24.

²⁴³ Vgl. Wilke (2006), S. 21.

²⁴⁴ Vgl. Westkämper u. a. (2000), S. 24.

²⁴⁵ Vgl. Günthner u. a. (2010), S. 330.

²⁴⁶ Vgl. Wilke (2006), S. 20.

²⁴⁷ Vgl. Dannenberg (2005), S. 37 und Gehr und Hellingrath (2007), S. VII sowie Ostertag (2008), S. 2.

einbezogen. Jedoch sind die festgelegten Flexibilitätskorridore aus Kostengründen bei der Neuinstallation meist viel zu gering. Darüber hinaus wird heute noch vielerorts an einer festen Verkettung der Produktionsbereiche und Montagestationen durch Förderbänder und starre Fördereinrichtungen festgehalten. Lediglich die Puffer zwischen den Gewerken²⁴⁸ sorgen für eine Entkopplung. Dies führt dazu, dass sich beim Betrachten heutiger Automobilmontagerwerke häufig die in Abbildung 2.6 dargestellte feste Verkettung der Bereiche wiederfindet.

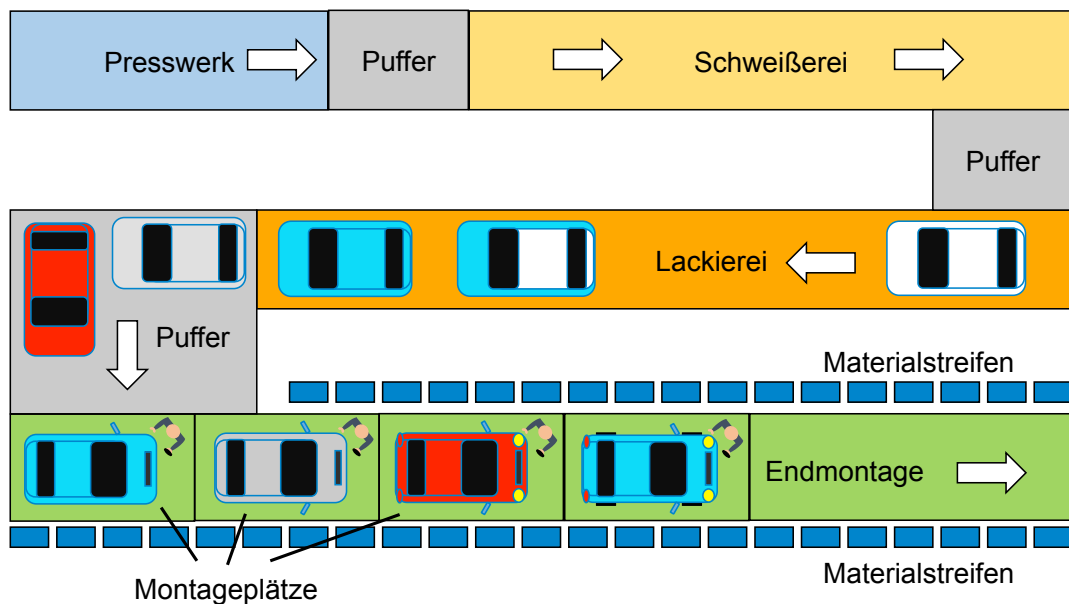


Abbildung 2.6: Fest verkettetes Montagewerk (eigene Darstellung)

2.3 Heutige Logistikkonzepte zur Materialbereitstellung in der Automobilproduktion

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Produktionslogistik in der Automobilindustrie vorgestellt. Im Rahmen der Ausarbeitung wurden in Automobilwerken und bei Logistikdienstleistern²⁴⁹ Bestandsaufnahmen²⁵⁰ durchgeführt. Darüber hinaus wurde durch Expertenbefragung²⁵¹ ein möglichst genaues Abbild der Situation in der Automobilproduktionslogistik geschaffen. Während vor 50 Jahren in der Automobilproduktion Fahrzeugmodelle gleicher Farbe mit sehr geringen Ausstattungsunterschieden produziert wurden, hat sich die Situation

²⁴⁸ Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, beispielsweise nach der Lackiererei, wenn gleichfarbige Fahrzeuge nacheinander lackiert werden, jedoch in Bezug auf die Ausstattung in einer anderen Sequenz montiert werden sollen.

²⁴⁹ Für eine ausführliche Definition des Begriffs Logistikdienstleister und der Unterteilung in 1 PL, 2 PL, 3 PL und 4 PL siehe beispielsweise Grünert (2010), S. 71 ff. und 411 f.

²⁵⁰ Die Bestandsaufnahme umfasste die Mercedes-Benz Produktionswerke in Raststatt und Sindelfingen, das Audi-Werk in Neckarsulm sowie Standorte der Zulieferer LGI und BERA in der Umgebung von Sindelfingen.

²⁵¹ Diese Befragung fand im Rahmen von drei Seminaren statt, die im Oktober 2015 am IFT ausgerichtet wurden.

seither verändert. Damals wurde das Material in großen Regalen am Montageband bereitgestellt. Der Montagemitarbeiter lief an den Regalen entlang und entnahm das passende Material und verbaute es.²⁵² Die Fördertechnik für die zu produzierenden Autos bestand beispielsweise aus Power & Free-Förderanlagen²⁵³. Kurze Zeit danach begann der Anstieg der Varianten durch mehr Wahlmöglichkeiten für die Kunden und zusätzliche Modelle der Automobilhersteller.²⁵⁴ Anfangs wurden die zusätzlichen Varianten noch in Regalen an den Montagestationen bereitgestellt. Doch über die Jahre wurde dieses Verfahren immer unwirtschaftlicher, da immer mehr Varianten bereitzustellen waren. Durch den aus Japan kommenden Kanban²⁵⁵-Ansatz²⁵⁶ und die Prinzipien JIT und JIS²⁵⁷ wurde die Materialbereitstellung effizienter organisiert und der Montagemitarbeiter von den Logistkivorgängen getrennt.²⁵⁸ Doch Durchlaufregale und verbrauchsgesteuerten Materialabruf²⁵⁹ funktionieren bei sehr variantenreichen Materialien nur begrenzt. Dementsprechend werden Montagebänder immer länger²⁶⁰, häufig nur damit mehr Material bereitgestellt werden konnte.²⁶¹ Vor einigen Jahren waren die Flächenkapazitäten an den Montagebändern derart ausgeschöpft, dass ein neues Konzept, der sogenannte Supermarkt²⁶², Einzug hielt.²⁶³ Diese Vorkommissionierbereiche, geführt entweder vom OEM selbst oder von Logistikdienstleistern²⁶⁴, befanden sich vor einigen Jahren noch in Randbereichen der Montagehallen. Doch auch hier ist mittlerweile nicht mehr genug Platz vorhanden.²⁶⁵ Aus diesem Grund wurden die Supermärkte in externe Hallen und Gebäude verlegt.²⁶⁶ Die vorkommissionierte Ware muss dann vom Supermarkt mög-

²⁵² Daimler (2015).

²⁵³ Zur Erläuterung von Power & Free-Förderern siehe Kapitel 2.4.1.

²⁵⁴ Vgl. Göpfert u. a. (2013), S. 90.

²⁵⁵ Aus dem Japanischen übersetzt bedeutet „Kanban“ Tafel, Brett oder Beleg. (Vgl. Bichler u. a. (2010), S. 91).

²⁵⁶ Die Idee des Kanban-Ansatzes wird in Kapitel 2.3.3 erläutert.

²⁵⁷ Erläuterung der beiden Begriffe findet sich in Kapitel 2.3.3.

²⁵⁸ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 111 sowie Rahman u. a. (2013), S. 175.

²⁵⁹ Erläuterung des verbrauchsgesteuerten Materialabrufs finden sich in Kapitel 2.3.3.

²⁶⁰ Wobei Kosten von mehr als 8.000 Euro pro Meter Montageband anfallen. (Vgl. Deechongkit und Srinon (2009), S. 2065).

²⁶¹ Vgl. Deechongkit und Srinon (2009), S. 2065.

²⁶² Der Begriff Supermarkt beschreibt im Zusammenhang mit der Automobilindustrie kleinere Lager- oder Puffersysteme, die sich meist auf dem Werksgelände in der Nähe der Montagestationen oder teilweise auch ausgelagert beim Dienstleister oder Zulieferer befinden. (Vgl. Battini u. a. (2012), S. 213) In diesen Supermärkten sind Materialien in Ladungsträgern für eine Kommissionierung möglichst zugänglich gelagert, teilweise erfolgen in den Supermärkten auch Vormontageumfänge. (Vgl. Emde und Boysen (2012)) Im Vergleich zur Materialbereitstellung direkt am Montageort hat dies den Vorteil, dass eine größere Variantenzahl bevorratet und/oder vorkommissioniert und/oder vormontiert werden kann. Im Anschluss an einen Materialabruf wird das Material in den Supermärkten kommissioniert und dann zum Montageort transportiert. (Vgl. Hartel (2015), S. 116 und Koether (2012), S. 141) Befindet sich der Supermarkt in der Produktionshalle wird das Material meist durch Routenzüge zum Montageort gebracht. (Vgl. Battini u. a. (2012), S. 209 ff.).

²⁶³ Vgl. Emde und Boysen (2012), S. 393.

²⁶⁴ Logistikdienstleister sind beispielsweise Speditionen, Verkehrslogistiker, Lagerlogistiker und Paket- oder Kurierdienste, wobei eine Klassifizierung meist über die ausgeübte Tätigkeit erfolgt. (Vgl. Mathar und Scheuring (2012), S. 20) Dabei lassen sich First-Party Logistics Provider (1PL), Second-Party Logistics Provider (2PL) Third-Party Logistics Provider (3PL) Fourth-Party Logistics Provider (4PL) und Lead Logistics Provider (LLP) unterscheiden, diese werden in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter behandelt. Die folgende Quelle bietet weiterführende Beschreibungen dieser Klassen: Mathar und Scheuring (2012), S. 20.

²⁶⁵ Vgl. Battini u. a. (2012), S. 210.

²⁶⁶ Vgl. Günthner und Boppert (2013), S. 297 f.

lichst effizient zu den Verbauorten transportiert werden. Während in der Vergangenheit der Gabelstapler²⁶⁷ das häufigste Flurförderfahrzeug für den innerbetrieblichen Materialtransport in der Automobilindustrie darstellte, rückt heute der Routenzug, siehe Kapitel 2.3.4, an diese Stelle nach.²⁶⁸

2.3.1 Logistik und Intralogistik

Logistik ist laut Jünemann²⁶⁹ „die wissenschaftliche Lehre der Planung, Steuerung und Überwachung der Material-, Personen-, Energie- und Informationsflüsse in Systemen“²⁷⁰. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird insbesondere der Materialfluss, der als „Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten, sowie bei der Verteilung von stofflichen Gütern innerhalb festgelegter Bereiche“²⁷¹ definiert ist, mit dem Fokus auf die Automobilproduktion betrachtet. Die Durchführung des Materialflusses ist Aufgabe der Materialwirtschaft und soll unter Berücksichtigung der 6R-Regel: das „richtige“ Material, zur „richtigen“ Zeit, in der „richtigen“ Menge und „richtigen“ Qualität zum „richtigen“ Ort, zum „richtigen“ (oder besten) Preis zur Verfügung zu stellen, erfolgen.²⁷²

Intralogistik ist laut VDMA²⁷³ und Bode et al.²⁷⁴ sowie Arnold²⁷⁵ definiert als der Bereich, der die „[...] Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlages in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen [...]“ umfasst. Dabei steht der Begriff innerbetrieblich nicht nur für die Bereiche innerhalb von Produktionsunternehmen sondern für eine ganze Breite von unterschiedlichen Betrieben²⁷⁶.

Die Automobilproduktionslogistik ist eine Art der Unternehmenslogistik.²⁷⁷ Das wirtschaftliche Ziel der Unternehmenslogistik ist eine derartige Gestaltung des Material- und Warenflusses, dass die logistische Leistung mit möglichst geringen Kosten erreicht werden kann. Zur Erreichung dieses Ziels sind es die Aufgaben der Unternehmenslogistik einerseits die Bestände und andererseits die Durchlaufzeiten möglichst gering zu halten.²⁷⁸ In der Un-

²⁶⁷ Erläuterung siehe Kapitel 2.4.2.

²⁶⁸ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 114.

²⁶⁹ Demgegenüber lautet die seven-rights-Definition für Logistik nach Plowman: „die Verfügbarkeit des richtigen Gutes, in der richtigen Menge, im richtigen Zustand, am richtigen Ort, zur richtigen Zeit, für den richtigen Kunden, zu den richtigen Kosten“ (Plowman (1964)) zu erreichen.

²⁷⁰ Vgl. Jünemann (1989), S. 11.

²⁷¹ Vgl. VDI 3300 (1973).

²⁷² Vgl. Schulte (1996), S. 19.

²⁷³ VDMA (2004).

²⁷⁴ Bode und Preuß (2004), S. 423.

²⁷⁵ Arnold (2006a), S. 1.

²⁷⁶ Wie beispielsweise Häfen, Terminals, Distributionszentren, Krankenhäuser oder auch Supermärkte. (Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 423).

²⁷⁷ Unternehmenslogistik ist nach Jünemann definiert als „die wissenschaftliche Lehre der Planung, Steuerung und Überwachung der Material-, Personen-, Energie- und Informationsflüsse in Unternehmen.“ (Jünemann (1989), S. 11).

²⁷⁸ Vgl. Zäpfel (1989), S. 93 sowie Warnecke (1999), S. 41.

ternehmenslogistik können die in Abbildung 2.7 dargestellten Subsysteme voneinander abgegrenzt werden können.²⁷⁹ Die Materialversorgung von Produktionseinheiten mit Roh- und Hilfsstoffen findet im Rahmen der Beschaffungs- und Produktionslogistik statt und kann unter dem Begriff Materiallogistik zusammengefasst werden.²⁸⁰ Davon abgegrenzt erfolgt der Abtransport von fertigen Produkten im Zuge der Distributionslogistik. Der Güterfluss in die entgegengesetzte Richtung wird als Entsorgungslogistik²⁸¹ beschrieben.²⁸² Der Materialfluss findet vom Beschaffungs- zum Absatzmarkt statt. Darüber hinaus zählt zu den Aufgaben der Logistik die Bereitstellung des Informationsflusses als Verbindung zwischen Absatz- und Beschaffungsmarkt.²⁸³ Übertragen auf die Themenstellung dieser Arbeit ist der Bereich der Produktionslogistik von besonderem Interesse.

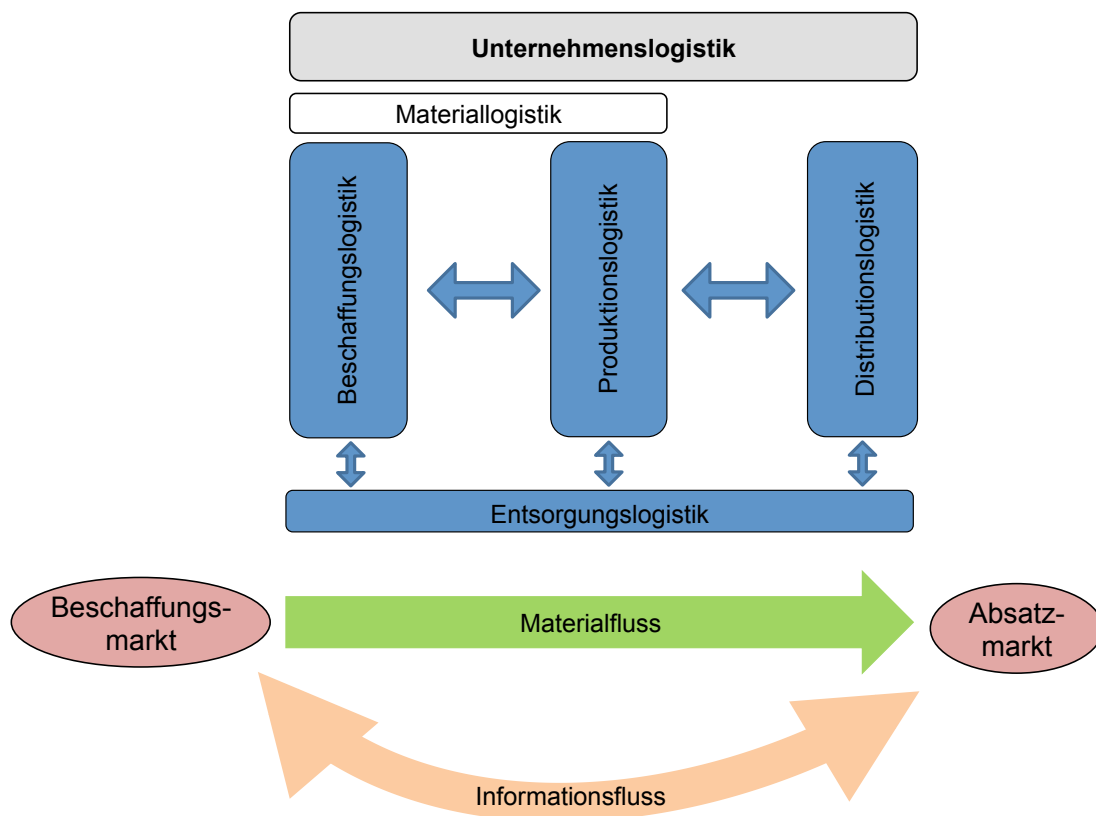


Abbildung 2.7: Unternehmenslogistik in Anlehnung an Pfohl (2004) sowie Mathar und Scheuring (2012), S. 6

²⁷⁹ Vgl. Schulte (1996), S. 9.

²⁸⁰ Vgl. Ihme (2006), S. 229.

²⁸¹ Anstatt Entsorgungslogistik wird heutzutage häufig von reverse logistics gesprochen, das gegenüber der Entsorgungslogistik zusätzliche Tätigkeiten, wie beispielsweise die Kontrolle, die Funktionsprüfung, die Bewertung, die Reinigung und die Zerlegung umfasst. (Vgl. Dekker u. a. (2013), S. 3 ff. und Steven (2015), S. 150 f.).

²⁸² Vgl. Ihme (2006), S. 17 und 359 sowie Pfohl (2010), S. 17.

²⁸³ Andere Autoren, beispielsweise Mathar und Scheuring, zählen weiterhin die Ersatzteillistik, die Instandhaltungslogistik, die Lagerlogistik und die Transportlogistik zur modernen Unternehmenslogistik hinzu. (Vgl. Mathar und Scheuring (2012), S. 10).

2.3.2 Materialfluss

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem eingehenden Materialfluss. Der rückwärtsgerichtete Fluss der Förderhilfsmittel, der Leerguttransport, zurück zu den Zulieferern wird nicht explizit betrachtet.²⁸⁴ Der Materialfluss kann für die Automobilproduktionswerke von der Materialproduktion beim Zulieferer bis zum Montageort in die Abschnitte Materialabruf, Transportlogistik, Wareneingang, Lagerung, Sequenzierung der Materialien, Transport zum Montageort und Bereitstellung am Montageort unterteilt werden, siehe hierzu Abbildung 2.8. Während Materialabruf und Transportlogistik einen Teil der externen Logistik darstellen, sind die letzten fünf Abschnitte Bestandteile der Intralogistik.²⁸⁵ Der Materialfluss kann dabei auf unterschiedlichen Transportwegen und unter Nutzung unterschiedlicher Lagerstufen beim Zulieferer oder Logistikdienstleister erfolgen, dies wird ab Kapitel 2.3.3 erläutert.²⁸⁶

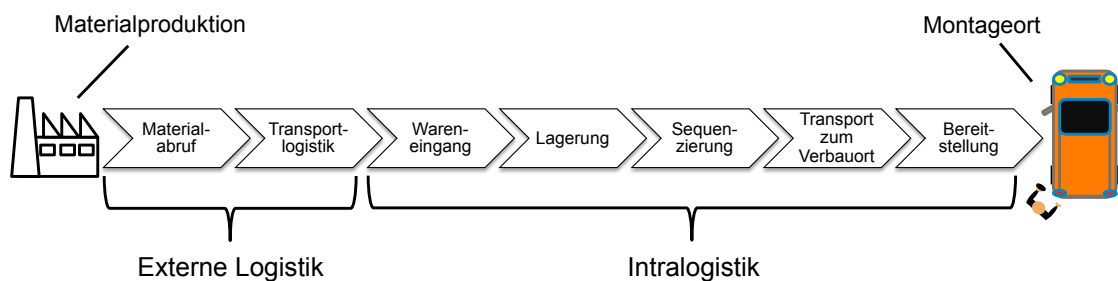


Abbildung 2.8: Materialfluss in der Automobilindustrie in Anlehnung an Boysen u. a. (2015), S. 109

Aus der Vogelperspektive durchläuft das Produktionsmaterial in der Unternehmenslogistik vom Zulieferer bis zum Montageort dabei drei wesentliche Prozessabschnitte:²⁸⁷

- Beschaffung
- Materialbereitstellung
- Zuführung

Beschaffungsprozesse finden zwischen dem Warenausgang des Vorlieferanten, teilweise sind dies auch Unternehmensbereiche, und dem Wareneingang des Abnehmers statt.²⁸⁸ Sie stellen ein Teilgebiet der Beschaffungslogistik, siehe hierzu Abbildung 2.7. Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Bereich der Intralogistik liegt, wird der Beschaffungsprozess und die zugehörige Klassifizierung von Materialien an dieser Stelle nicht weiter detailliert.²⁸⁹

²⁸⁴ Weiterführende Informationen zum rückwärtsgerichteten Materialfluss finden sich beispielsweise in Boysen u. a. (2015), S. 117.

²⁸⁵ Vgl. Bullinger und Lung (1994), S. 8.

²⁸⁶ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 288.

²⁸⁷ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 288.

²⁸⁸ Vgl. Lotter und Wiendahl (2006), S. 323.

²⁸⁹ Weiterführende Informationen zu diesem Thema finden sich beispielsweise in Nyhuis u. a. (2012), S. 292 ff. Vahrenkamp und Siepermann (2004), S. 98 und Corsten u. a. (1999), S. 682 ff.

An die Beschaffung schließt sich im Prozessablauf die Materialbereitstellung, als Prozess vom Wareneingang bis zur Lagerung am Verbauort, an.²⁹⁰ Der Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (REFA) definiert die Materialbereitstellung als „[...] das im Betrieb verfügbare Material für die Verwendung bei der Aufgabendurchführung in der benötigten Art und Menge termingerecht am Bereitstellungsplatz zur Verfügung zu stellen“²⁹¹. Das Ziel der Materialbereitstellung ist die Sicherstellung eines hohen Servicegrades bei gleichzeitiger Minimierung der Bestände, um die Kapitalbindungs- und Lagerungskosten gering zu halten.²⁹² Damit dieses Ziel erreicht werden kann, muss für unterschiedliche Produktionsprozesse und Materialien jeweils die optimale Bereitstellungsstrategie ermittelt werden.²⁹³ Einer der einflussreichsten Faktoren auf die Lagerdauer ist die Entfernung zwischen Zulieferer und Montagewerk. Kleine Entfernungen führen beispielsweise in Japan nur zu durchschnittlichen Lagerdauern von sechs Stunden, während es in den USA im Schnitt 15 Stunden und in Europa sogar 48 Stunden sind.²⁹⁴ Weiterhin sind auch die technischen Randbedingungen der Montagestationen und Materialien zu beachten. Dieses Spannungsfeld für die Materialversorgung von Produktionseinheiten zwischen den Interessen eines hohen Servicegrades, einer hohen Bereitstellungseffizienz und niedriger Bestände zur Erreichung wirtschaftlicher Vorgänge ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Das gleichzeitige Erreichen aller drei Ziele ist aufgrund des Zielkonflikts in der Praxis unmöglich.²⁹⁵ Dementsprechend können nur optimale Teillösungen angestrebt werden, wobei Terminverschiebungen und Wartezeiten in der industriellen Praxis eine erhebliche Herausforderung für die Optimierung darstellen.²⁹⁶

²⁹⁰ Vgl. Golz (2014), S. 29 und Lotter und Wiendahl (2006), S. 323.

²⁹¹ Arbeitsstudien REFA e. V. (1974).

²⁹² Vgl. Arnold (2006b), S. 86.

²⁹³ Vgl. Kampker (2014), S. 245.

²⁹⁴ Vgl. Holweg und Pil (2005), S. 50.

²⁹⁵ Vgl. Kampker (2014), S. 245 f.

²⁹⁶ Vgl. Köhler (1997), S. 16.

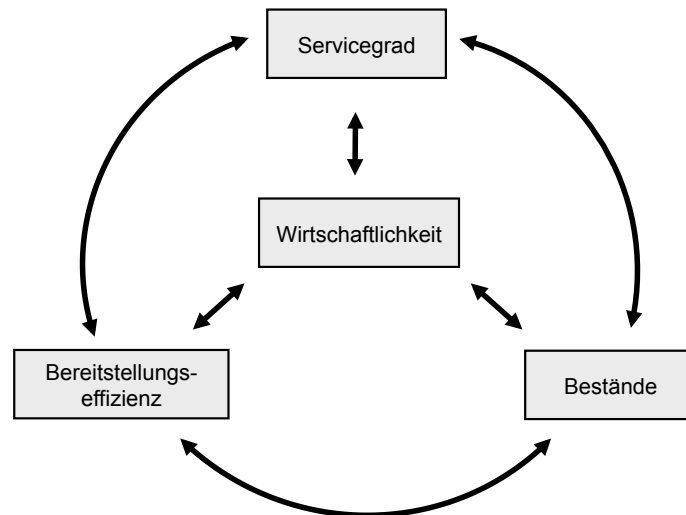


Abbildung 2.9: Spannungsfeld der Materialversorgung in Anlehnung an Kampker (2014), S. 246

Der Zuführungsprozess findet schließlich zwischen der Lagerung am Verbauort und der endgültigen Einbau- oder Montageposition, auch als Fügeposition bezeichnet, statt.²⁹⁷ Dementsprechend kann ein Zuführsystem als Schnittstelle zwischen intralogistischem Materialfluss und dem aufzubauenden Werkstück angesehen werden.²⁹⁸ Die einzelnen Aufgaben der Zuführung werden in der heutigen Montage meist vom Montagemitarbeiter übernommen. Besondere Beachtung liegt dabei auf einer möglichst ergonomischen Prozessgestaltung für den Montagemitarbeiter. Dadurch lassen sich, ohne gesundheitliche Nachteile, kontinuierlich hohe Arbeitsleistungen erbringen.²⁹⁹ Teilweise werden aber auch Roboter oder Manipulatoren für die Zuführung eingesetzt, die dem Mitarbeiter das Material in der passenden Ausrichtung und Höhe anreichen. Die automatische Zuführung lässt sich in folgende Schritte unterteilen:³⁰⁰

- Zuteilen oder Vereinzeln,
- Ordnen,
- Positionieren und
- Prüfung auf Lage und Anwesenheit.

Da dieser Bereich häufig in das Aufgabengebiet der Montagevorbereitung oder Montageplanung zählt, wird er in dieser Arbeit nicht weiter detailliert.³⁰¹

²⁹⁷ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 288.

²⁹⁸ Vgl. Hesse (2006), S. 244.

²⁹⁹ Vgl. Sanz u. a. (2007), S. 301 und Landau (2004), S. 3 und 169.

³⁰⁰ Vgl. Hesse (1993), S. 153 und Nyhuis u. a. (2012), S. 288 sowie Lotter und Wiendahl (2006), S. 324.

³⁰¹ Weiterführende Literatur zur Materialzuführung findet sich beispielsweise in Hesse (2012), S. 210, 247.

2.3.3 Materialsteuerung und Verlauf des Informationsflusses

In heutigen Supply Chains erfolgt der Informationsfluss durch vorgeschaltete Regelschleifen, die auf Basis der geplanten Produktionsreihenfolge mehr oder weniger detailliert auf Monate, Tage und Stunden vorausgeplant sind.³⁰² Dies sorgt für die Bereitstellung der korrekten Bauteile zum passenden Zeitpunkt und ermöglicht die Erstellung von wirtschaftlichen Produktionsgrößen bei den Zulieferern. Gleichzeitig sind Änderungen, die nach einem der festgelegten Planungszeitpunkte stattfinden, nur mit sehr hohem Aufwand in die bestehenden Materialabrufe einzuplanen. Grundsätzlich kann die Steuerung der Materialbereitstellung und somit der Informationsfluss in die zwei Arten **Bedarfssteuerung** und **Verbrauchssteuerung** unterteilt werden.³⁰³ Für die bedarfsgesteuerte Art (siehe Abbildung 2.10) wird, unter Verwendung einer zentralen Fertigungssteuerung und auf Basis des geplanten Produktionsprogramms³⁰⁴ und den daraus abgeleiteten Stücklisten für alle vorgelagerten Arbeitssysteme jeweils einzeln festgelegt, wann welche Stückzahlen an Material produziert und bereitgestellt werden müssen.³⁰⁵

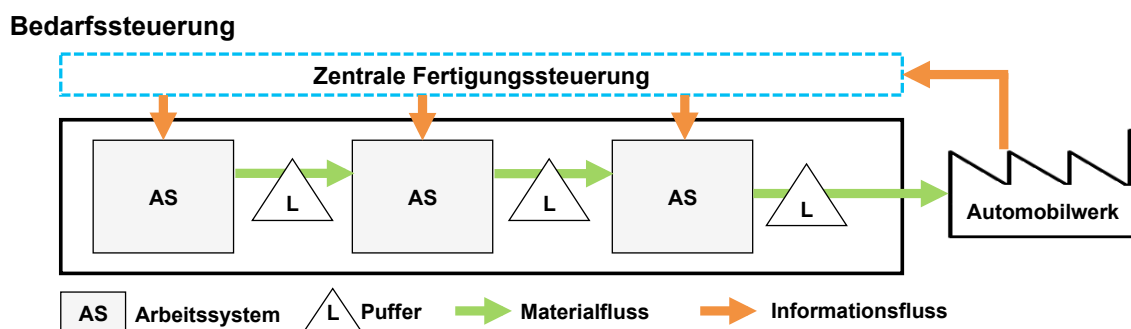


Abbildung 2.10: Bedarfssteuerung in Anlehnung an Große-Heitmeyer (2004), S. 69 nach Abels (2016), Folie 7

Bei der verbrauchsgesteuerten Art (siehe Abbildung 2.11) erfolgt der Materialabruf immer von einem nachgelagerten Arbeitssystem zum vorgelagerten Arbeitssystem. Dazu werden Wiederbestellpunkte in Form von Materialmengen definiert, bei deren Unterschreiten automatisch oder manuell eine Materialbestellung ausgelöst wird.³⁰⁶ Eine zentrale Fertigungssteuerung ist nicht vorhanden, stattdessen bestimmt die Fertigungssteuerung des Automobilwerks lediglich für das direkt vorgelagerte Arbeitssystem die notwendigen Produktionsmengen und Lieferzeitpunkte. Die Steuerung der anderen, weiter vorgelagerten Arbeitssysteme in Bezug auf die Produktionszahlen und Lieferzeitpunkte erfolgt durch das jeweils nachgelagerte Arbeitssystem.

³⁰² Vgl. Klug (2006), S. 187.

³⁰³ Vgl. Große-Heitmeyer (2004), S. 72.

³⁰⁴ Detaillierte Beschreibungen zur Zusammenstellung des Produktionsprogramms finden sich beispielsweise in Holweg und Pil (2004), S. 23 ff.

³⁰⁵ Vgl. Bullinger und Lung (1994), S. 15 ff.

³⁰⁶ Vgl. Pfohl (2010), S. 189.

Auf Basis der Unterschiede zwischen Bedarfs- und Verbrauchssteuerung folgt, dass die bedarfsgesteuerte Materialbereitstellung entweder stückzahlgenau und ohne Restmenge oder gebindeorientiert erfolgt, während die verbrauchsorientierte Materialbereitstellung nur gebindeorientiert gemäß der Abrufzeiten in ganzen Behältern durchgeführt wird.³⁰⁷

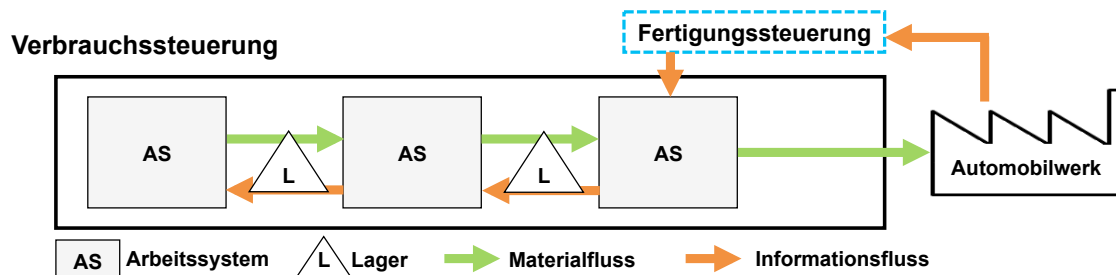


Abbildung 2.11: Verbrauchssteuerung in Anlehnung an Große-Heitmeyer (2004), S. 69 nach Lödding (2001), S. 27

Die im Prozess durchzuführende Materialbereitstellung kann in der Produktionslogistik in Push- und Pull-Prinzip unterschieden werden.³⁰⁸ Bei Anwendung des Push-Prinzips wird das Material bedarfsgesteuert und zeitpunktgenau an den vordefinierten Bereitstellungsplatz transportiert. Heutzutage werden diese Materialabrufe meist von softwaregestützten Produktionsplanungs- und Steuerung (PPS)-Systemen³⁰⁹ entsprechend der Produktionsplanung und des Produktionsfortschritts ausgeführt.³¹⁰ Das Pull-Prinzip ist die Umsetzung des verbrauchsgesteuerten Materialabrufs.³¹¹ Die Nachlieferung des Materials erfolgt als Reaktion auf den Verbrauch des nachgelagerten Arbeitssystems und wird zeitlich direkt im Anschluss an die Nachbestellung ausgeführt.³¹² Das bedeutet der Abruf von Montagematerial am Verbauort führt zu einem Abrufsignal im Lager oder beim Logistikdienstleister. Dort wird das Material aus dem Lager entnommen und zum Verbauort gesendet. Wird im Lager die festgelegte Materialuntergrenze erreicht, wird eine Neubestellung beim Zulieferer oder Logistikdienstleister ausgelöst.³¹³ Als Grundvoraussetzung wird meist ein konstanter Materialverbrauch angenommen.³¹⁴ Da der Aufwand für die Erstellung und die Aufrechterhaltung von Materialbereitstellungen per Push-Prinzip höher ist, als der Aufwand für die Bereitstellung per Pull-Prinzip, wird gerade für Materialien niedrigen Werts das Pull-Prinzip angewendet.³¹⁵

Das **JIT-Prinzip**, auch bezeichnet als JIT-Strategie, kann definiert werden, „[...] nur das zu

³⁰⁷ Vgl. Klug (2010), S. 177 und Nyhuis u. a. (2012), S. 295.

³⁰⁸ Vgl. Klug (2010), S. 176 und Boysen u. a. (2015), S. 110.

³⁰⁹ PPS-Systeme, die auf Datenbanken aufsetzen, werden für die Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung eingesetzt. (Vgl. Pawellek (2007), S. 98 und Schomburg (1980), S. 2).

³¹⁰ Vgl. Klug (2010), S. 177.

³¹¹ Vgl. Klug (2010), S. 268.

³¹² Vgl. Klug (2010), S. 178.

³¹³ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 110.

³¹⁴ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 295.

³¹⁵ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 110.

machen, was, wann es und in der Menge, die vom Kunden gebraucht wird“³¹⁶. Damit beschreibt der Begriff die Vorgehensweise, dass Produktionsmaterialien zeitlich genau dann in der passenden Menge zur Verfügung gestellt werden, wenn Sie für die jeweilige Fertigungsstufe oder den Montageumfang benötigt werden.³¹⁷ Anhand dieser Erklärung wird deutlich, dass das JIT-Prinzip zum bedarfsgesteuerten Materialabruf per Push-Prinzip gezählt wird.³¹⁸ Dadurch sollen lange, kostenintensive Lagerzeiten im Produktionswerk sowie der hierfür notwendige Flächenbedarf für die Lagerung der Materialien eingespart und weniger Kapital³¹⁹ gebunden werden.³²⁰ Für den Erfolg dieses Logistikprinzips sind eine enge Abstimmung und kurze Reaktionszeiten der Logistik-IT-Systeme zwischen Hersteller und Lieferant notwendig.³²¹ Die JIT-Anlieferung erfolgt meist unter Zuhilfenahme von Logistikdienstleistern und kommt als direkte Variante vom Lieferanten besonders bei geografisch nah am Produktionswerk gelegenen Zulieferern³²² in Betracht.

Das Logistikprinzip **JIS** beschreibt die sequenzgenaue Belieferung und Bereitstellung³²³ von variantenreichem Montagematerial am Verbauort, siehe Abbildung 2.12.³²⁴ Dazu werden die Produktionsmaterialien entweder direkt beim Zulieferer, in Lieferantenparks oder beim einem zwischen Zulieferer und Produktionswerk geschalteten Logistikdienstleister sortiert und in der geplanten Produktionssequenz in Ladungsträger gepackt.³²⁵ Anschließend werden die Ladungsträger mit dem sequenzierten Material ins Produktionswerk transportiert und dort zur richtigen Zeit und in der richtigen Reihenfolge am Verbauort bereitgestellt.³²⁶ Die vorab erfolgte Sequenzierung führt zu einer Reduzierung der Komplexität für den Montagemitarbeiter, da durch eine genaue Zuweisung des Ladungsträgers bzw. des Materials zum jeweiligen Auto, nicht mehr aus einer großen Zahl von Materialien das richtige Bauteil ausgewählt werden muss. Stattdessen kann der Montagemitarbeiter einfach in fortlaufender Reihenfolge die korrekten Bauteile aus den Ladungsträgern entnehmen und diese verbauen.³²⁷ Gleichzeitig erhöht dies aber den Arbeitsaufwand für die Logistik.³²⁸

³¹⁶ Vgl. Herlyn und Herlyn (2012), S. 49.

³¹⁷ Vgl. Klug (2010), S. 299.

³¹⁸ Vgl. Klug (2006), S. 188.

³¹⁹ Besonders wegen der zeitlich kürzeren Kapitalbindung findet das JIT-Prinzip besonders bei hochwertigem Montagematerial Verwendung. (Vgl. Klug (2010), S. 301).

³²⁰ Vgl. Hessenberger und Krcal (1997), S. 47 und Wildemann (2001), S. 17 f.

³²¹ Vgl. Mathar und Scheuring (2012), S. 67 f. und Hessenberger und Krcal (1997), S. 46

³²² Beispielsweise produzieren oder komplettieren einige Zulieferer in Lieferantenparks JIT-Teile in unmittelbarer Nähe des betreffenden Werks. (Vgl. Holweg und Pöl (2005), S. 50).

³²³ Beispielsweise die Bereitstellung unterschiedlich lackierter Außenspiegel die genau in der Reihenfolge im Ladungsträger sortiert sind, wie auch die Fahrzeuge in der Montage hintereinander laufen (Produktionsreihenfolge).

³²⁴ Vgl. Ihme (2006), S. 294 und Klug (2010), S. 300.

³²⁵ Vgl. Battini u. a. (2012), S. 210.

³²⁶ Vgl. Larsson (2002), S. 769.

³²⁷ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 108.

³²⁸ Vgl. MacDuffie u. a. (1996), S. 354.

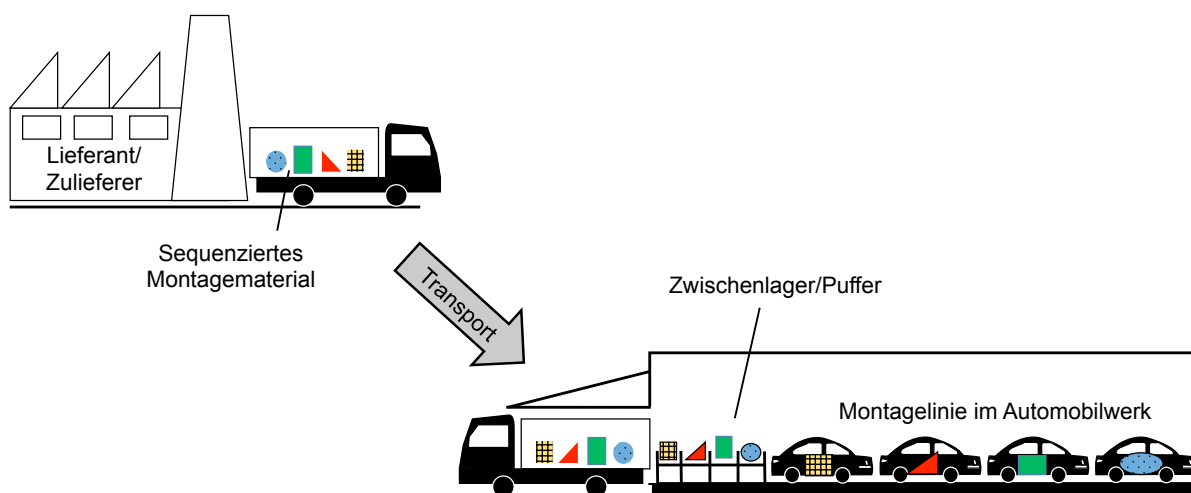


Abbildung 2.12: JIS-Prinzip in Anlehnung an VDA-Empfehlung 5010 (2008), S. 13

Der **Kanban-Ansatz**, welcher zum Konzept der Lean-Production gehört, ist in die Kategorie des Pull-Prinzips einzuordnen.³²⁹ Die Idee beim Kanban-Ansatz ist, dass eine nachgelagerte Stelle der vorgelagerten Stelle die benötigten Materialien zum erforderlichen Zeitpunkt entnimmt.³³⁰ Häufig kommt dazu eine Karte zum Einsatz, die am Transportbehälter des Materials angebracht ist und einen selbststeuernden Regelkreis ermöglicht.³³¹ Diese Kanban-Karte enthält Informationen über das Produkt, die Menge und den Transportweg. Für die Nachbestellung wird in den meisten Fällen einer der folgenden vier Prozessvarianten ausgewählt:³³² Bei der ersten Prozessvariante, bezeichnet als Kanban-Karten Prinzip, entnimmt der Montagemitarbeiter, zeitgleich zur Entnahme der ersten Materialien am Verbauort, die Kanban-Karte und steckt sie in eine Box, die am Bereitstellregal montiert ist und regelmäßig von einem Logistikmitarbeiter geleert wird. Die Karte stellt den darauf beschriebenen Inhalt des Materialabrufs dar und der Logistikmitarbeiter sorgt für diese Materialbereitstellung.³³³ Die Anzahl der erforderlichen Kanban-Karten kann über folgende Formel bestimmt werden:³³⁴

$$K_{AZ} = \frac{B_h \cdot WBZ}{FV_{Behälter}} \quad (2.1)$$

³²⁹ Vgl. Richter (2006), S. 100 und Brunner (2008), S. 109.

³³⁰ Vgl. Ohno (2009), S. 37.

³³¹ Vgl. Dickmann (2009), S. 10 f. und Bullinger und Lung (1994), S. 32.

³³² Vgl. Lödding (2008), S. 177 ff.

³³³ Vgl. Brunner (2008), S. 105.

³³⁴ Vgl. Dickmann (2009), S. 127 f. und Monden (2012), S. 353.

wobei: K_{AZ} = Kanban (Anzahl der Karten)

B_h = durchschnittlicher Bedarf pro Stunde [Stck.]

WBZ = Wiederbeschaffungszeit [Stunden]

$FV_{Behälter}$ = Fassungsvermögen je Ladungsträger [Stck.]

Die Formel ist gültig, wenn die Kanban-Karte direkt vom dem Behälter entfernt wird und damit eine Nachbestellung auslöst wird, sobald die ersten Materialien aus dem Behälter verbraucht werden. Erfolgt die Lossendung der Karte und somit die Nachbestellung erst nach der letzten Materialentnahme aus dem Behälter, dann muss ein zusätzlicher Behälter hinzugerechnet werden:

$$K_{AZ} = \frac{B_h \cdot WBZ}{FV_{Behälter}} + 1 \quad (2.2)$$

Zusätzlich sollte für ungeplante Zwischenfälle ein Sicherheitsbestand β in Höhe von ca. 10 % mit einberechnet werden. Nach japanischem Verständnis in Bezug auf das Kanban-Prinzip wird dieser Bestand dann im laufenden Betrieb immer weiter reduziert, bis ein Grenzwert erreicht ist, an dem Störungen in der Materialversorgung eintreten.³³⁵

Bei der zweiten Prozessvariante, dem Behälter-Kanban, ist die Kanban-Karte fest mit dem Behälter verbunden.³³⁶ In diesem Behälter wird also immer ein Material eines Typs in der festgelegten Menge transportiert.³³⁷ Nachdem das Material aus dem Behälter am Montageort verbraucht wurde, erfolgt ein Rücktransport des leeren Behälters zum Lager, dies stellt gleichzeitig den Materialabruf dar.³³⁸ Im Lager wird der Behälter dann wieder aufgefüllt oder durch einen Behälter mit den geforderten Materialien getauscht.³³⁹ Damit die Materialversorgung am Verbauort nicht abreißt, müssen immer mindestens zwei Behälter³⁴⁰ vorgehalten werden. Ist der erste Behälter leer und auf dem Weg zur Wiederbefüllung, dann werden Materialien aus dem zweiten Behälter entnommen.³⁴¹

Bei der dritten Prozessvariante, dem elektronischen Kanban, erfolgt die Nachbestellung durch ein elektronisches Kanban-Signalen, welches vom Montagemitarbeiter am Bereitstellregal mit Hilfe eines Druckknopfs realisiert wird.³⁴² Bei der elektronischen Variante ist erstens die Übertragungsgeschwindigkeit der Informationen an die vorgelagerte Stelle, zweitens der Entfall von physischen Zetteln und Karten sowie drittens die Dokumentation der Abrufmengen vorteilhaft.³⁴³ Dagegen sinkt durch die fehlenden Kanban-Karten die Transparenz.

³³⁵ Vgl. Monden (2012), S. 354 und Dickmann (2009), S. 130.

³³⁶ Vgl. Dickmann (2009), S. 10.

³³⁷ Vgl. Pfohl (2010), S. 190.

³³⁸ Vgl. Gudehus (2006), S. 69.

³³⁹ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 110.

³⁴⁰ Die Menge der benötigten Behälter ergibt sich über die Wiederbeschaffungszeit.

³⁴¹ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 295.

³⁴² Vgl. Golz u. a. (2012), S. 3 und Dickmann (2009), S. 403 ff.

³⁴³ Vgl. Gudehus (2004), S. 471.

Die vierte Variante ist das Sicht-Kanban, bei der auf die Karten verzichtet wird und die Mitarbeiter durch ihren Blick erkennen, wo Materialbedarfe als Abweichung zwischen Soll- und Ist-Füllgrad bestehen. Dazu müssen sich das oder die Lager und die Montagestation in unmittelbarer Nähe zueinander befinden.³⁴⁴

Das Kanban-Prinzip gehört zum Toyota-Produktionssystem (TPS), welches wiederum dem Grundgedanken des Lean-Ansatzes folgt.³⁴⁵ Zentraler Bestandteil dieses Ansatzes, der ausgehend vom Unternehmen Toyota über das Buch „The machine that changed the world“³⁴⁶ große Bekanntheit erlangte, ist die Eliminierung von Verschwendung (muda).³⁴⁷ In Bezug auf die Logistik bedeutet dies geringe Bestände und einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (kaizen).³⁴⁸ Die Vorteile des Kanban-Ansatzes sind eine hohe Transparenz, definierte Puffergrößen und ein geringer Steuerungsaufwand.³⁴⁹ Nachteile sind die Verlust- und Verschmutzungsgefahr der Karten sowie der zusätzliche Handhabungsaufwand der Karten. Die Produktionsprinzipien (z. B. Lean-Produktion und JIT) können in Produktionssystemen zusammengefasst werden.³⁵⁰

2.3.4 Routenzugkonzepte

Im Laufe der letzten zehn Jahre hat der Einsatz von Routenzügen in vielen Bereichen der Produktionslogistik zugenommen, um staplerfreie Fabriken³⁵¹ zu ermöglichen.³⁵² Die Ziele sind der geordnete Transport von Material und die Reduzierung von Staplerunfällen.³⁵³ Routenzüge übernehmen dabei die Aufgabe, zusammengestellte Materialien von den Supermärkten oder Wareneingängen zum Montageort zu bringen, siehe dazu Abbildung 2.13.³⁵⁴ Der Ablauf gestaltet sich folgendermaßen: Im Kommissionierbereich, der häufig ein Supermarkt ist, werden die Ladungsträger nach einer Pickliste zusammengestellt und auf die Anhänger des Routenzugs verladen.³⁵⁵ Auch Großladungsträger wie Gitterboxen werden, mithilfe von speziellen Untergestellen, auf Routenzuganhänger geladen oder an Routenzüge angehängt.³⁵⁶ Anschließend beginnt der Routenzug seine Tour zu den vorgegebenen Entladepunkten bzw.

³⁴⁴ Vgl. Lödding (2008), S. 183 ff.

³⁴⁵ Vgl. Monden (2012), S. 9.

³⁴⁶ Vgl. Womack u. a. (1990).

³⁴⁷ Vgl. Monden (2012), S. 197.

³⁴⁸ Vgl. Herlyn und Herlyn (2012), S. 23 und Brunner (2008), S. 10 ff. sowie Bullinger und Lung (1994), S. 32.

³⁴⁹ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 296 und Gupta u. a. (1999), S. 1066 sowie Dickmann (2009), S. 264.

³⁵⁰ Vgl. Herlyn und Herlyn (2012), S. 23.

³⁵¹ Die Fabrik soll ohne Staplerverkehr auskommen. (Vgl. Scheel und Chilian (2007), S. 311) Da der Wareneingang bzw. die LKW-Entladung kaum ohne Gabelstapler zu betreiben ist, wird der Bereich der staplerfreien Fabrik häufig erst ab einer gedachten Linie zwischen Wareneingang und Verbauort definiert.

³⁵² Vgl. Günthner und Klenk (2012) und Günthner und Boppert (2013), S. 217 f.

³⁵³ Vgl. Ullrich (2014), S. 53 f.

³⁵⁴ Vgl. Battini u. a. (2012), S. 209.

³⁵⁵ Vgl. Golz u. a. (2012), S. 3.

³⁵⁶ Vgl. Günthner (2013), S. 99.

Montagestationen.³⁵⁷ An diesen Stationen tauscht der Routenzugfahrer³⁵⁸ die vollen Behälter seiner Anhänger mit den leeren Behältern der Bereitstellregale und -gestelle aus.³⁵⁹ Nachdem alle Montagestationen der betreffenden Route angefahren wurden, kehrt der Routenzug zurück in den Kommissionierbereich. Dort werden die leeren Anhänger abgekoppelt, um die Ladungsträger zu entnehmen und schon fertig zusammengestellte Anhänger wieder an den Schlepper angehängt.³⁶⁰ Dabei ist besonders die effiziente Auslastung der Routenzüge³⁶¹ bei Änderungen der Produktionsraten oder -zeiten eine schwierige Planungsaufgabe.³⁶²

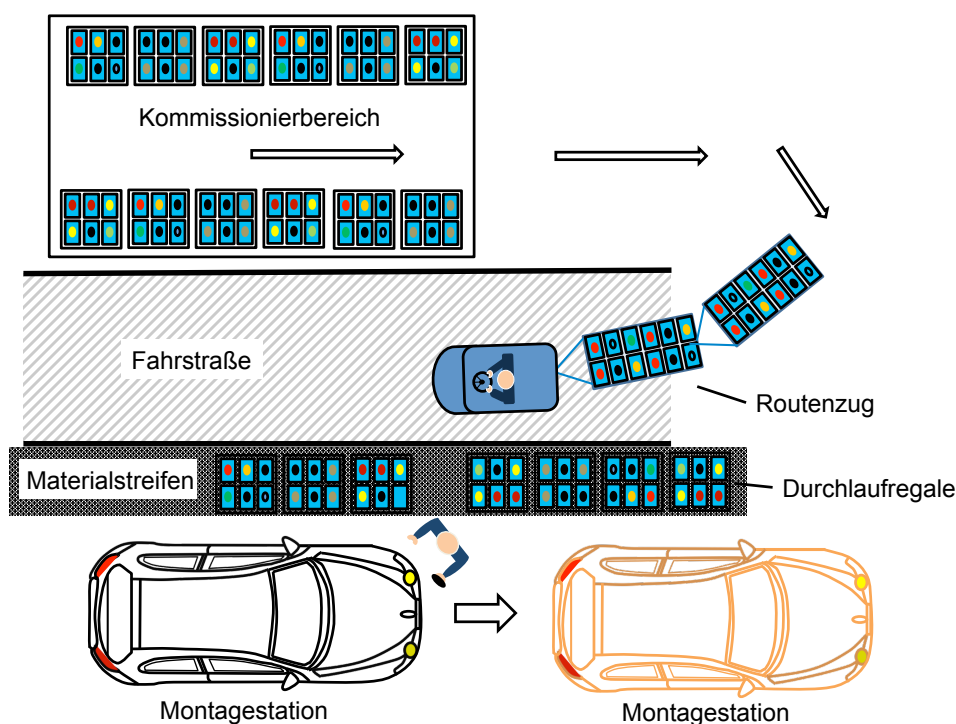


Abbildung 2.13: Routenzugkonzept (eigene Abbildung)

³⁵⁷ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 115.

³⁵⁸ Teilweise erfolgt die Ausladung von vollen Ladungsträgern aus dem Anhänger in die Durchlaufregale automatisiert, durch Verwendung von sogenannten Shooter-Regalen. (Vgl. Emde u. a. (2012), S. 122 und Bartholdi und Hackman (2011) sowie Boysen u. a. (2015), S. 115).

³⁵⁹ Vgl. Günthner (2013), S. 96.

³⁶⁰ Vgl. Battini u. a. (2012), S. 212 f. sowie Emde u. a. (2012), S. 122.

³⁶¹ Die Auslastung muss möglichst hoch sein, damit sich der Routenzug im Gegensatz zum Gabelstapler rechnet. Nur wenn die Materialien an unterschiedlichen, zu beliefernden Montagestationen gleichmäßig verbraucht werden, ist dies möglich. Ansonsten muss der Routenzug seine Abfahrten nach den Bedarfsmaterialien der am schnellsten verbrauchenden Montagestation ausrichten und andere Stationen entweder überliefern oder teilweise auslassen. Die Transportmengen der schneller verbrauchenden Montagestationen zu erhöhen, ist meist nicht möglich, da der hierfür notwendige Lagerplatz bzw. die Regalflächen am Materialstreifen nicht zur Verfügung stehen.

³⁶² Vgl. Staab u. a. (2016), S. 137.

2.3.5 Crossdocking

Eine Methode, um den Transportverkehr innerhalb des Produktionswerks bei Verwendung von Gebietsspediteuren³⁶³ zu verringern, ist der Einsatz sogenannter Crossdocks, auch als Cross-Docking bezeichnet.³⁶⁴ Diese Methode wurde in den 90er Jahren entwickelt. Das Ziel ist die Bündelung von Anlieferungen mehrerer Produzenten zu einer Vielzahl von Geschäften bzw. Filialen. Durch die Verwendung eines zentralen Umschlagplatzes kann die Anzahl der Anlieferungen und die Volumenausnutzung verbessert werden, indem die Ware der Produzenten im Crossdock auf mehrere LKWs für die jeweiligen Filialen verteilt wurde. Das Prinzip wurde auf die Automobilindustrie übertragen und von der Belieferung von Geschäften auf die Belieferung von Anlieferern im Werk abgewandelt:

In der Automobilindustrie sammeln Gebietsspediteure die Komponenten und Materialien in einem geographisch begrenzten Gebiet, meist in Form von Milkruns³⁶⁵, ein und bringen diese zum Crossdock.³⁶⁶ Dort wird die Ware, die sich entweder auf Paletten oder in Gitterboxen befindet³⁶⁷, auf Auslieferfahrzeuge bzw. LKW zur Werksbelieferung umgeschlagen, siehe Abbildung 2.14.³⁶⁸ Diese LKW müssen dann auf dem Werksgelände nur wenige, bestimmte Entladepunkte (meist 1-3) ansteuern, dadurch nimmt der Fahrverkehr im Werk ab und gleichzeitig ergibt sich für die LKW eine kürzere Verweilzeit im Werk, als bei LKW die eine große Zahl von Entladepunkten anfahren müssen.³⁶⁹ Deshalb entlastet die Verwendung von Crossdocks das Verkehrsaufkommen auf dem Werksgelände erheblich.³⁷⁰ Darüber hinaus wird eine höhere zeitliche Auslastung der LKWs der Gebietsspediteure erreicht. Denn aus Praxisberichten wurde deutlich, dass durch die Verwendung von Crossdocks die Zeit für das Entladen der LKWs der Gebietsspediteure von mehreren Stunden im Werk auf nur wenige Minuten am Crossdock reduziert werden konnte.³⁷¹

³⁶³ Die Verwendung von Gebietsspediteuren sieht vor, dass Sammeltransporte in mehreren Region vorgenommen werden und die Ladungen anschließend in einem zentralen Lager (Sammelpunkt) umgeschlagen werden. (Vgl. Hessenberger und Krcal (1997), S. 43 f. und Göpfert u. a. (2013), S. 104 sowie Steven (2015), S. 104 f.).

³⁶⁴ Vgl. Ihme (2006), S. 159 und Steven (2015), S. 106.

³⁶⁵ Der Begriff Milkrun, auch milk run, stellt ein Konzept in der Transportlogistik dar. Dabei fährt ein LKW eine vorgegebene, wegoptimierte Route mit festgelegten Stationen (Zulieferwerken) ab, um Produktionsmaterial aufzuladen und dies zum Crossdock oder direkt zum Produktionswerk zu bringen. (Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 111 und Grunewald (2015), S. 2 f. sowie Elkin (2006), S. 25 f.) Durch strenge Vorgaben in Bezug auf die Abholtermine und Abholmengen wird die Kapazität der fahrenden LKW bestmöglich ausgenutzt. Mit den Touren findet gleichzeitig auch der Behälterrücktransport statt, da der LKW nach dem Abladen beim Crossdock oder Produktionswerk mit Leergut befüllt wird, welches er bei seiner nächsten Tour bei den Zulieferern ablädt. (Vgl. Vahrenkamp und Kotzab (2012), S. 222) Anhand der Charakteristika eines gemeinsamen Transports von Materialien (zumindest auf Teilabschnitten) mit unterschiedlichen Ausgangspunkten und unterschiedlichen Zielpunkten zur Erreichung von Kostenvorteilen kann das Milkrun-Verfahren in die Kategorie Hub&Spoke Netzwerke gezählt werden. (Vgl. Rosenthal (2016), S. 67 nach Wagner (2006), S. 1).

³⁶⁶ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 186 sowie Hartel (2015), S. 108.

³⁶⁷ Vgl. ten Hompel und Schmidt (2013), S. 70.

³⁶⁸ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 186.

³⁶⁹ Vgl. Holweg und Pil (2004), S. 36 f. und Klug (2010), S. 338.

³⁷⁰ Vgl. Arnold u. a. (2008), S. 527 und ten Hompel und Schmidt (2005), S. 69 ff.

³⁷¹ Die Informationen zur Einsparungen der Verweilzeit im Werk stammen von der Besichtigung des Logistikdienstleisters LGI.

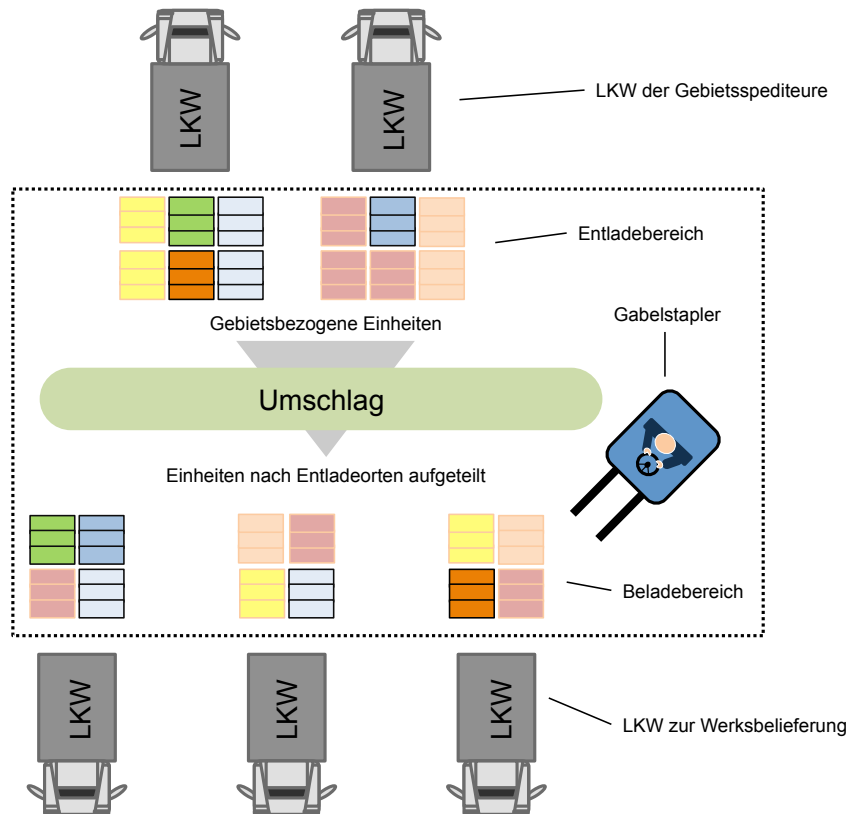


Abbildung 2.14: Einstufiges Crossdocking in Anlehnung an ten Hompel und Schmidt (2005), S. 71

Da die Materialien beim Crossdocking in der Automobilindustrie direkt umgeschlagen werden, spricht man von einstufigem Crossdocking³⁷² oder Crossdocking als Durchlaufsystem. Demgegenüber wird der Begriff zweistufiges Crossdocking verwendet, wenn die Materialien oder die Waren im Crossdock von ihrem Gebinde (z. B. einer Palette) getrennt und neu zusammengestellt werden.³⁷³ Die zentrale Idee bei der Verwendung von Crossdocks ist eine Effizienzsteigerung durch Reduzierung von Prozessschritten und die Senkung der Lagerbestände durch kürzere Durchlaufzeiten.³⁷⁴

2.4 Förder-, Lager- und Bereitstelltechnik in der Automobillogistik

Die Materialbereitstellung in der Automobilindustrie findet aktuell auf unterschiedlichen Wegen statt. In diesem Kapitel sollen die häufigsten Bereitstellungskonzepte und dafür notwendigen Betriebsmittel dargestellt und voneinander abgegrenzt werden. Dabei liegt der Fokus auf den Systemen, die heute in der Automobilindustrie zum Einsatz kommen. Andere Systeme werden im Rahmen der Unterteilung genannt, in dieser Arbeit aber nicht weiter beschrie-

³⁷² Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 186.

³⁷³ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 186.

³⁷⁴ Vgl. ten Hompel und Schmidt (2013), S. 70.

ben. Laut VDI 2411 bedeutet Fördern „das Fortbewegen von Arbeitsgegenständen oder Personen in einem System“³⁷⁵. Grundsätzlich müssen zur Erreichung einer wirtschaftlich und ergonomisch sinnvollen Materialbereitstellung bestimmte technische Voraussetzungen vorhanden sein. Es gilt dabei auf die in Kapitel 2.3.1 genannten Ziele von niedrigen Beständen, hohem Servicegrad und bestmöglicher Bereitstellungseffizienz zu achten. Die Technikelemente lassen sich folgendermaßen einteilen:³⁷⁶

- Fördertechnik

Die Fördertechnik umfasst Fördermittel und Förderhilfsmittel, wobei letztere auch als Transporthilfsmittel oder Ladehilfsmittel bezeichnet werden.³⁷⁷ Weitere Beschreibungen der Förderhilfsmittel erfolgen in Kapitel 2.4.3. Fördermittel sind diejenigen technischen Hilfsmittel, mit denen Güter innerhalb von örtlich vorgegebenen Betriebsbereichen in beliebige Richtung fortbewegt werden.³⁷⁸ Sie können in die beiden Gruppen der Stetigförderer und der Unstetigförderer unterteilt werden.³⁷⁹

- Lagertechnik

Die Kategorie Lagertechnik umfasst Lagermittel, Lagerbedientechnik und Lagerhilfsmittel, die in Kapitel 2.4.4 weiter ausgeführt werden.³⁸⁰ Zu beachten ist, dass Lagerhilfsmittel und Förderhilfsmittel häufig identisch sind.³⁸¹

- Bereitstelltechnik

Die Bereitstelltechnik kann in Bereitstellmittel und Bereitstellrichtungen unterschieden werden, wobei Förderhilfsmittel und Bereitstellmittel meist identisch sind.³⁸² Weitere Erklärungen folgen im Kapitel 2.4.5.

2.4.1 Stetigförderer

Die Aufgabe von Stetigförderern ist die kontinuierliche Bewegung von Schütt- oder Stückgütern.³⁸³ Aus der Vielzahl an vorhandenen Stetigförderern³⁸⁴ sollen hier aus Kapazitätsgründen nur die für die Automobilproduktionslogistik relevanten Systeme betrachtet werden. Bei den meisten dieser Systeme handelt es sich um Kettenförderer, bei denen eine endlose Kette das Zugmittel darstellt. An diesem Zugmittel werden Förderwagen oder Gehänge

³⁷⁵ VDI 2411 (1970), S. 7.

³⁷⁶ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 297.

³⁷⁷ Vgl. Günthner u. a. (2011), S. U84 und ten Hompel (2011), S. 165.

³⁷⁸ Vgl. ten Hompel u. a. (2007), S. 119.

³⁷⁹ Vgl. Bullinger und Lung (1994), S. 44.

³⁸⁰ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 298 und Bode und Preuß (2004), S. 104.

³⁸¹ Vgl. Koether (2012), S. 159.

³⁸² Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 298 f.

³⁸³ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 99.

³⁸⁴ Beispielsweise Rollenbahnen oder Tragkettenförderer, siehe hierzu Gleißner und Femerling (2008), S. 87 ff. und Bode und Preuß (2004), S. 227 ff.

befestigt oder eingehängt und somit mitgezogen.³⁸⁵

Dabei ist **Hängebahn** oder **Hängeförderer** der Oberbegriff für Fördereinrichtungen, bei denen Gestelle hängend an einer Schiene über eine Kette bewegt werden.³⁸⁶ Die Schiene kann entweder an Decken oder Wänden befestigt oder aufgeständert sein.³⁸⁷ Eine Form der Hängebahn ist der **Kreisförderer**³⁸⁸. Die eingesetzten Gehänge wiederum sind mit der umlaufenden, endlosen Förderkette verbunden, wobei die Förderbewegung entweder horizontal, ansteigend oder sogar vertikal erfolgen kann.³⁸⁹ Die Gehänge sind in Ihrer Form und Ausgestaltung an das zu transportierende Gut angepasst, beispielsweise als Schalen, Haken, Plattformen oder Behälter.³⁹⁰ Die Fördergeschwindigkeit von Kreisförderern liegt im Bereich zwischen 0,25 - 1,2 m/s.³⁹¹

Power & Free-Förderer, oder auch Power- und Free-Förderer werden zur Kategorie der Kreisförderer gezählt, die wiederum eine Unterkategorie der Hängebahnen darstellen.³⁹² Sie werden teilweise auch als Zweischienenförderer oder Schleppkreisförderer bezeichnet.³⁹³ Besondere Eigenschaften dieses Systems sind erstens die physische Trennung zwischen der Führungsschiene für die Förderkette und der darunter angeordneten Tragschiene für die Laufwerke sowie zweitens die Entkopplung zwischen den Laufwerken und den Förderketten.³⁹⁴ Durch diese Besonderheiten können die Gehänge einerseits durch Weichen unterschiedliche Wege passieren und andererseits durch Stopper und Anlaufkufen automatisch angehalten, aneinander gereiht und vereinzelt und damit auch eine unstetige Förderung, insbesondere Pufferung, realisiert werden.³⁹⁵ Angetrieben werden Power & Free-Förderer von einem ringförmig geschlossenen Zugmittel, der Kreisförderkette.³⁹⁶ Die Vorteile dieser fördererischen Anlagen ist die robuste und simple Konstruktion.

Elektrohängebahnen (EHB) werden auch zur Kategorie der Kreisförderer zugeordnet, wobei ein geschlossener Kreis nicht zwingend notwendig ist, da die Gehänge jeweils mit einem eigenen Antrieb ausgestattet sind.³⁹⁷ Die Besonderheit bei Elektrohängebahnen ist die Anbringung der Stromschiene an der Laufschiene (auch: Tragschiene) an der auch das Laufrad befestigt ist. Die Fahrgeschwindigkeiten liegen maximal bei 3 m/s.³⁹⁸ Sogenannte Verschiebe- oder Drehweichen werden für die Verteilung oder Zusammenführung von

³⁸⁵ Vgl. Martin (2011), S. 155.

³⁸⁶ Vgl. Klug (2010), S. 190.

³⁸⁷ Vgl. Bichler u. a. (2010), S. 77.

³⁸⁸ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 109.

³⁸⁹ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 109.

³⁹⁰ Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 227.

³⁹¹ Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 228.

³⁹² Vgl. Krause (2007), S. U69.

³⁹³ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 109.

³⁹⁴ Vgl. Krause (2007), S. U69.

³⁹⁵ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 109 und Bode und Preuß (2004), S. 229 f. sowie Bruns u. a. (2011), S. U70.

³⁹⁶ Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 228.

³⁹⁷ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 108.

³⁹⁸ Vgl. Overmeyer (2011), S. U51.

Transporten genutzt.³⁹⁹ Auf Initiative der Automobilindustrie wurde ein spezielles Schienen-Oberläufersystem mit einer Traglast von 500 kg in der VDI 3643 für Elektrohängebahnen definiert.⁴⁰⁰ Dies soll die Verwendbarkeit unterschiedlicher Hersteller für die Fahrzeuge bzw. Gestelle ermöglichen.⁴⁰¹

Ein besonderer Vorteil von Kreisförderern, Power & Free-Förderern und Elektrohängebahnen ist, beispielsweise im Vergleich zu Rollenbahnen, der relativ geringe Anteil benötigter Bodenflächen, da lediglich an den Be- und Entladepunkten das Gehänge bzw. dessen Laufbahn auf niedrigerem Niveau verlaufen muss.⁴⁰² Die drei Systeme werden deshalb auch in die Kategorie der flurfreien Fördermittel oder flurungebundenen Fördermittel zusammengefasst.⁴⁰³

Zur Kategorie der Stetigförderer zählen darüber hinaus auch **Schleppketten-** bzw. **Unterflurschleppkettenförderer**. Es handelt sich dabei um ein System, bei dem Schleppketten häufig im Hallenboden eingelassen sind.⁴⁰⁴ In bestimmten Abständen sind auf der Schleppkette Haken oder Ösen befestigt, an denen spezielle Gestelle oder Förderwagen eingehängt und somit transportiert werden können.⁴⁰⁵ Durch die im Boden notwendige Rinne sind diese Systeme unflexibel in Bezug auf Änderungen der Streckenführung. Ähnlich wie bei Power & Free-Förderern ist durch Weichen ein Ein- und Ausschleusen von Fördermitteln möglich.⁴⁰⁶

2.4.2 Unstetigförderer

Zur Kategorie der Unstetigförderer zählen Flurförderfahrzeuge, die einen unterbrochenen Fördergutstrom liefern.⁴⁰⁷ Dabei arbeiten diese Systeme in einzelnen Arbeitsspielen und werden deshalb auch intermittierende Förderer genannt.⁴⁰⁸ Auch hier sollen aus einer großen Menge an vorhandenen Systemen⁴⁰⁹ nur die für die Automobilproduktionslogistik relevanten Systeme beschrieben werden.

Ein **Routenzug**, auch als Schleppzug bezeichnet, besteht aus den beiden Elementen Zugfahrzeug und einem oder mehreren Anhängern, siehe Abbildung 2.15.⁴¹⁰ Das Zugfahrzeug für die Routenzüge, teilweise auch als Schlepper bezeichnet, verfügt über eine Anhängerkupplung oder -vorrichtung an der die Routenzuganhänger, auch als Trailer bezeichnet, ein-

³⁹⁹ Vgl. Martin (2011), S. 217.

⁴⁰⁰ Vgl. VDI 3643 (1998).

⁴⁰¹ Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 234.

⁴⁰² Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 109.

⁴⁰³ Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 227 sowie Klug (2010), S. 189.

⁴⁰⁴ Vgl. Martin (2011), S. 156.

⁴⁰⁵ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S.111.

⁴⁰⁶ Vgl. Martin (2011), S. 157.

⁴⁰⁷ Vgl. Severin u. a. (2007), S. U2.

⁴⁰⁸ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 99.

⁴⁰⁹ Beispielsweise Krananlagen, Kommissionierfahrzeuge, Krane und Handhubwagen, siehe hierzu Gleißner und Femerling (2008), S. 99 ff. sowie Bode und Preuß (2004), S. 230 ff. und Wehking (2011), S. U51 ff.

⁴¹⁰ Vgl. Bruns (2011), S. U49.

gehängt werden.⁴¹¹ Heute werden die Zugfahrzeuge meist manuell geführt, es gibt aber auch erste Umsetzungen für Routenzüge, die per FTF gezogen werden, beispielsweise im Mercedes Benz Sprinterwerk Ludwigsfelde.⁴¹²



Abbildung 2.15: Routenzug (eigene Aufnahme)

Bei modernen Routenzügen sind die Anhänger als Rahmen, beispielsweise als E-Frame⁴¹³, ausgeführt. Von der Seite können passende Rollgestelle, auch als Rollwagen bezeichnet, zum Transport von Förderhilfsmitteln in die E-Frames eingeschoben werden.⁴¹⁴ Dies führt zu einer reduzierten Handlingszeit durch den Routenzugfahrer, da der Mitarbeiter die Anhänger nicht mehr an- oder abkoppeln muss, sondern nur das Rollgestell aus dem E-Frame hineinschieben oder herausziehen muss.

Gabelstapler⁴¹⁵, auch als Gegengewichts- bzw. Frontstapler⁴¹⁶ bezeichnet, bilden eine Kategorie unterhalb der Stapler.⁴¹⁷ Sie zählen zu den per Motor angetriebenen Flurförderfahrzeugen und verfügen über ein Hubgerüst, auch Hubmast⁴¹⁸ genannt, mit dem eine vertikale Lastbewegung ausgeführt werden kann.⁴¹⁹ Als Antriebe kommen Diesel-, Gas-, Elektromotoren oder Brennstoffzellen zum Einsatz, wobei die Energie unterschiedlich gespeichert

⁴¹¹ Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 258.

⁴¹² Vgl. Benz (2015).

⁴¹³ Eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Rahmentypen der Anhänger findet sich beispielsweise in Günthner (2013), S. 107.

⁴¹⁴ Vgl. Klug (2010), S. 10.

⁴¹⁵ Der weltweit erste Gabelstapler wurde 1917 von Eugene Clark in den USA präsentiert. (Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 243 und Hebezeuge Fördermittel (2017), S. 14).

⁴¹⁶ Zusätzlich gibt es auch Querstapler, Mehrwegstapler, Schubstapler und Schmalgangstapler die in Bruns (2011), S. U47 ff. beschrieben werden.

⁴¹⁷ Vgl. Arnold u. a. (2008), S. 637 f. sowie Bruns (2011), S. U47.

⁴¹⁸ Dabei gibt es unterschiedliche Ausführungen als Einfach-, Doppel- oder Triplex-Mast. (Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 243).

⁴¹⁹ Vgl. Martin (2011), S. 238.

werden kann (Batterien, Wasserstoff, fossiler Brennstoff, Gas).⁴²⁰ Abzugrenzen ist hiervon der Niederhubwagen⁴²¹, welcher ähnlich wie der Gabelstapler über Lastaufnahmemittel in Form von Gabeln verfügt, jedoch nur eine sehr begrenzte vertikale Lastbewegung ausführen kann.⁴²² Neben dem Anbau von Gabeln kann ein Gabelstapler auch mit Zusatzgeräten (z. B. Halter, Greifer, Schaufel oder Klammern) zur Aufnahme unterschiedlichster Materialien ausgestattet werden und dadurch seine Anwendungsmöglichkeiten erweitern.⁴²³

FTF sind laut VDI „flurgebundene Fördermittel mit eigenem Fahrtrieb, die automatisch geführt, gesteuert und berührungslos geführt werden. Sie dienen dem Materialtransport, und zwar zum Ziehen und/oder Tragen von Fördergut mit aktiven oder passiven Lastaufnahmemitteln“⁴²⁴ FTS führen meist innerbetriebliche Transportaufgaben der Verkettung von Produktionsbereichen aus oder werden im Verbindungsverkehr eingesetzt, d. h. sie transportieren Material beispielsweise vom Wareneingang zu Bereitstellflächen, Übergabepunkten oder Montageplätzen.⁴²⁵ Aus technischer Sicht lassen sich spurgebundene⁴²⁶ und spurungebundene Fahrzeugführungen⁴²⁷ unterscheiden.⁴²⁸ Bei den spurungebundenen Führungen ist in einem Umgebungsmodell der Fahrzeugkurs festgelegt und wird ständig mit der ermittelten, aktuellen Position des Fahrzeugs abgeglichen.⁴²⁹ Die Fahrwerksvarianten von FTF können in sechs Kategorien: Dreirad, Differentialantrieb, gekoppelter Lenkantrieb, mehrere unabhängige Fahr-/Lenkeinheiten, Differentialantrieb mit Drehachse und Mecanum-Antrieb unterschieden werden, siehe Abbildung 2.16. Die drei zuletzt genannten Varianten ermöglichen omnidirektionales Fahrverhalten. Beim Einsatz von mehr als drei Rädern, müssen aufgrund der statischen Unbestimmtheit Ausgleichselemente für die Fahrwerke vorhanden sein.

⁴²⁰ Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 243 sowie Arnold u. a. (2008), S. 638.

⁴²¹ Dieser wird auch als Fahrersitz-Elektrohubwagen bezeichnet und kann Fahrgeschwindigkeiten bis zu 16 km/h erreichen. (Vgl. Bode und Preuß (2004), S. 248).

⁴²² Vgl. Martin (2011), S. 236.

⁴²³ Vgl. Martin (2011), S. 244 und Bruns (2011), S. U47.

⁴²⁴ VDI 2510 (2005), S. 7.

⁴²⁵ Vgl. Bruns (2007), S. U49.

⁴²⁶ Beispielsweise sind dies die Systeme optische Leitlinie, Spurdraht oder Führungsschiene.

⁴²⁷ Beispielsweise die Systeme Magnetraaster, Lasernavigation, Ultraschall oder Indoor-GPS.

⁴²⁸ Vgl. Bruns (2011), S. U51 und Garibotto u. a. (1998), S. 1460 sowie Arnold u. a. (2008), S. 639 f.

⁴²⁹ Vgl. VDI 2510 (2005).

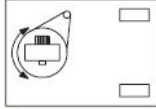
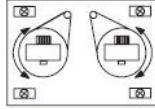
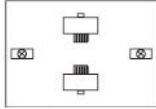
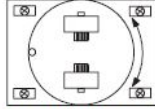
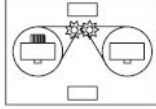
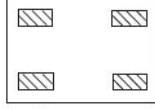




Fahrwerk	Mögliche Fahrbewegung	Fahrwerk	Mögliche Fahrbewegung
 Dreirad	<ul style="list-style-type: none"> • linienbeweglich • Geradeausfahrt und Drehen um Hinterachse • Vorzugsfahrtrichtung vorwärts, Rückwärtsfahrt möglich 	 mehre unabhängige Fahr-/Lenkeinheiten	<ul style="list-style-type: none"> • flächenbeweglich
 Differentialantrieb	<ul style="list-style-type: none"> • linienbeweglich • Geradeaus- und Rückwärtsfahrt • Drehen um Mittelachse möglich 	 Differentialantrieb mit Drehachse	<ul style="list-style-type: none"> • flächenbeweglich
 Gekoppelter Lenkantrieb	<ul style="list-style-type: none"> • linienbeweglich • Geradeaus- und Rückwärtsfahrt • Drehen um Mittelachse möglich 	 Mecanum-Antrieb	<ul style="list-style-type: none"> • flächenbeweglich <p><small>Quelle: Mag Fahrzeugbau GmbH, Braunschweig</small></p>
Symbole:  Fahr-antrieb  Stützrad  Lenk-antrieb  drehbares Stützrad (ggf. gefedert)			

Abbildung 2.16: Fahrwerksvarianten von FTF (Quelle: VDI 2510 (2005), S. 16

FTS sind laut VDI definiert als innerbetriebliches, flurgebundenen „Fördersystem mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen, deren primäre Aufgabe der Materialtransport, nicht aber der Personentransport ist“. ⁴³⁰ Laut Bruns sind FTS Flurförderzeuge, beispielsweise Wagen, Schlepper oder Gabelhubwagen, die automatisch also ohne direkte Steuerung durch einen Bediener zum Einsatz kommen. ⁴³¹ Grundsätzlich sind FTS aus zwei Bestandteilen aufgebaut. ⁴³² Zum einen der physische Teil zu dem die Anlage sowie die FTF, siehe Beschreibung weiter unten, gehören und zum anderen der informatische Teil. Dieser setzt sich aus der Fahrzeugsteuerung, mit der primären Aufgabe der Zielsteuerung der FTF und der Anlagensteuerung, die das gesamte Zusammenspiel der Anlage überwacht ⁴³³ zusammen. Hierzu gehören die Standorterfassung, die Lagebestimmung und Datenkommunikation sowie die Peripherie der Fahrzeuge. Die Systeme bestehen aus einer Leitsteuerung, einem oder mehreren FTF, Systemen zur Standorterfassung, Lagebestimmung und Datenkommunikation sowie Peripherie. ⁴³⁴

⁴³⁰ VDI 2510 (2005), S. 6 f.

⁴³¹ Vgl. Bruns (2011), S. U51.

⁴³² Vgl. Arnold u. a. (2008), S. 638.

⁴³³ Die Anlagensteuerung ist beispielsweise für das Verhindern von Kollisionen oder die Zuweisung von Aufträgen verantwortlich.

⁴³⁴ Vgl. VDI 2510 (2005), S. 7.

2.4.3 Förderhilfsmittel

Die systematische Planung, Organisation und Verwaltung von Mehrwegbehältersystemen sowie die Steuerung und Kontrolle der Behälterkreisläufe⁴³⁵ ist nach Lackner und Zsifkovits die Aufgabe des Behältermanagements.⁴³⁶ Insbesondere Förderhilfsmittel werden dazu verwendet, um die Handhabung und die Lagerung⁴³⁷ von Materialien und Gütern zu erleichtern. Wesentliche Forderungen sind der Schutz des zu transportierenden Guts und die bestmögliche Ausnutzung des Behältervolumens. Förderhilfsmittel können unterteilt werden in:⁴³⁸

- tragende Förderhilfsmittel,
- tragende und umschließende Förderhilfsmittel und
- tragende und abschließende Förderhilfsmittel.

Tragende Förderhilfsmittel bilden für das Fördergut lediglich eine Plattform, während tragende und umschließende Förderhilfsmittel zusätzliche Seitenwände zum Schutz des Fördergutes bzw. Materials aufweisen.⁴³⁹ Darüber hinaus verfügen tragende und abschließende Förderhilfsmittel über einen Deckel und ermöglichen somit einerseits Staubschutz für das Material und andererseits den Transport von Gasen und Flüssigkeiten.⁴⁴⁰ Die drei Kategorien der Förderhilfsmittel können jeweils in unterfahrbare und nicht unterfahrbare Förderhilfsmittel eingeteilt werden. Während unterfahrbare Förderhilfsmittel (beispielsweise Flachpaletten als tragende, unterfahrbare Förderhilfsmittel) direkt vom Boden angehoben werden können und eine standardisierte Schnittstelle im Förderprozess bilden, sind nicht unterfahrbare Förderhilfsmittel (beispielsweise Fässer als tragend und abschließende, nicht unterfahrbare Förderhilfsmittel oder Container für internationale (See)-Fracht⁴⁴¹) nur mit speziellen Betriebsmitteln aufnehmbar.⁴⁴²

Im Folgenden werden die wichtigsten Förderhilfsmittel für die Intralogistik in Automobilwerken, Universalladungsträger (ULT) und davon im besonderen Kleinladungsträger (KLT), Großladungsträger, Sonderladungsträger (SLT) und Kartons vorgestellt. Container, forminstabile Behälter wie Beutel und Säcke sowie sonstige Ladehilfsmittel finden in diesem Bereich nur selten Anwendung und sind deshalb nicht Teil dieser Betrachtung.⁴⁴³ Weiterhin wird an die-

⁴³⁵ Ein Behälterkreislauf beschreibt den geschlossenen Ablauf des Behälterflusses von der Beladung mit Material über den Transport vom Zulieferer zum Kunden sowie die anschließende Rückführung des Behälters zum Zulieferer. (Vgl. Hofmann und Bachmann (2006), S. 19).

⁴³⁶ Vgl. Lackner und Zsifkovits (2006), S. 244.

⁴³⁷ Deshalb teilweise auch als Lagerhilfsmittel bezeichnet. (Vgl. Wannenwetsch (2008), S. 114).

⁴³⁸ Vgl. Bullinger und Lung (1994), S. 55.

⁴³⁹ Vgl. Günthner u. a. (2011), S. U84.

⁴⁴⁰ Vgl. Jünemann (1989), S. 137.

⁴⁴¹ Vgl. Günthner u. a. (2011), S. U84.

⁴⁴² Vgl. Martin (2011), S. 285 und Bullinger und Lung (1994), S. 55.

⁴⁴³ Weiterführende Informationen zu den ausgelassenen Förderhilfsmitteln finden sich bei Wurch (1982), S. 75 und Schulte (2013), S. 155 f.

ser Stelle auch nicht auf Einlagen, sogenannte Inlays, eingegangen.⁴⁴⁴

Der vom VDA zur unternehmensweit übergreifenden Anwendung standardisierte **KLT** ist zur Kategorie der tragenden und umschließenden Förderhilfsmittel zu zählen.⁴⁴⁵ Weiterhin kann der KLT, der meist aus Kunststoff gefertigt ist, zur Gruppe der ULT zugeordnet werden, die sich durch universelle und flexible Einsetzbarkeit auszeichnen.⁴⁴⁶ Laut DIN 13199-1 ist der KLT, siehe Abbildung 2.17, ein „oben offener, dauerhafter, wiederverwendbarer, starrer, rechteckiger Modulbehälter, der manuell und/oder mechanisch gehandhabt werden kann.“⁴⁴⁷



Abbildung 2.17: KLT (Quelle: SSI-Schäfer (2016))

Es gibt KLT in einer Vielzahl von Höhen⁴⁴⁸ bis zu einem Maximum von 320 mm mit drei unterschiedlichen Grundmaßen:⁴⁴⁹

- 200 x 300 mm,
- 300 x 400 mm und
- 400 x 600 mm.

Diese Grundmaße passen modular auf die Grundflächen von Euro-Paletten (Maße 1200 x 800 x 144 mm) und International Organization for Standardization (ISO)-Paletten (Maße 1.200 x 1.000 x 150 mm) und ermöglichen so einen volumenoptimierten Transport.⁴⁵⁰ Weiterhin besitzen KLT bestimmte Zusatzfunktionalitäten wie Griffe, Wasserablaufflächen und

⁴⁴⁴ Weitere Literatur zu solchen Einlagen bietet Koether (2012), S. 170 und Rosenthal (2016), S. 19.

⁴⁴⁵ Vgl. VDA 4500 (2006) und Klug (2010), S. 151.

⁴⁴⁶ Vgl. Klug (2010), S. 151.

⁴⁴⁷ Vgl. DIN EN 13199-1 (2000).

⁴⁴⁸ Eine detaillierte Auflistung der Abmessungen der unterschiedlichen KLT-Reihen findet sich im Anhang dieser Arbeit im Abschnitt A.1.

⁴⁴⁹ Vgl. VDA 4500 (2006), S. 7.

⁴⁵⁰ Vgl. VDA 4500 (2006) und Klug (2010), S. 151 sowie DIN EN 13698-1 (2004).

Anbringungsmöglichkeiten für Steckkarten. Die Handhabung kann, wie in der Definition beschrieben, sowohl manuell als auch automatisch erfolgen. Durch spezielle Einfahrnuten im KLT sind Auslagerungen im automatisches Kleinteilelager (AKL) durch das Regalbediengerät (RBG) möglich. Weiterhin können R-KLT und RL-KLT, dank besonderen Rasterböden mit Stapelfüßen, nicht nur vertikal formschlüssig gestapelt werden, sondern auch kreuzförmig.⁴⁵¹ Die kreuzförmige Stapelung bietet eine erhöhte Verbundsicherung, da sich die Lagen gegeneinander abstützen.⁴⁵² Die abschließende Sicherung eines solchen KLT-Turms erfolgt durch einen Ladeeinheitabschlussdeckel, der auch als Auflagedeckel oder Abschlussplatte bezeichnet wird.⁴⁵³

Eine besondere Rolle im KLT-System nimmt der F-KLT ein. Es handelt sich dabei um einen faltbaren KLT, dessen Volumen im zusammengefalteten Zustand nur 1/3 des Volumens des aufgeklappten Zustand beträgt.⁴⁵⁴ Bisher finden diese Ladungsträger nur selten Einsatz in der Automobilindustrie, da die geringere Stabilität und die kürzere Haltbarkeit sowie der zusätzliche Handlingsaufwand für das Klappen wesentliche Nachteile des F-KLT darstellen.⁴⁵⁵

GLT sind tragende und unterfahrbare sowie teilweise auch umschließende Förderhilfsmittel, die meist für großvolumige Montageteile oder das Zusammenfassen von Stückgütern (beispielsweise Kästen oder KLT) eingesetzt werden.⁴⁵⁶ Die bekanntesten Typen dieser Ladungsträger sind Paletten, Ladegestelle und Großbehälter. Paletten können in **Flachpaletten**⁴⁵⁷ und **Boxpaletten** unterteilt werden.⁴⁵⁸ Flachpaletten sind in unterschiedlichen Materialausprägungen (z. B. Kunststoff, Holz, Aluminium, Stahlblech, Pappe) und abweichenden Grundmaßen verfügbar. Die bekanntesten Grundmaße sind diejenigen der Euro⁴⁵⁹- und ISO-Palette⁴⁶⁰, wobei von der Euro-Palette, die auch als DIN-Palette⁴⁶¹ bezeichnet wird, weltweit zwischen 400 und 500 Mio. Stück im Umlauf sind.⁴⁶² Boxpaletten hingegen bieten über den Transport des Materials hinaus noch einen zusätzlichen Nutzen durch die Bereitstellung der transportierten Güter am Verbauort. Sie können unterteilt werden in:⁴⁶³

- Gitterboxpaletten: Auch als Gitterbox bezeichnet sind diese Förderhilfsmittel, neben der Euro- und ISO-Palette, die am häufigsten anzutreffenden Großladungsträger in

⁴⁵¹ Vgl. Koether (2012), S. 169.

⁴⁵² Vgl. Martin (2014), S. 64.

⁴⁵³ Vgl. Klug (2010), S. 152.

⁴⁵⁴ Vgl. Roos und Coskun (2011), S. 11.

⁴⁵⁵ Vgl. Lochmahr (2016), S. 221.

⁴⁵⁶ Vgl. Klug (2010), S. 150.

⁴⁵⁷ Flachpaletten sind unterscheidbar in Einweg- und Zweiwege- / Vierwegepaletten. Die Einwegpalette gilt als verlorene Palette, die teilweise auch als Montageträger zum Einsatz kommt. (Vgl. Jünemann (1989), S. 127) Zweiwege- oder Vierwegepaletten ermöglichen das Ein- oder Unterfahren mit Flurförderfahrzeugen aus zwei oder vier Richtungen. (Martin (2014), S. 67 f.).

⁴⁵⁸ Vgl. Wurch (1982), S. 75 und Martin (2014), S. 67 f.

⁴⁵⁹ Die Grundfläche der Euro-Palette beträgt 1.200 x 800 x 144 mm.

⁴⁶⁰ Die Grundfläche der ISO-Palette beträgt 1.200 x 1.000 mm x 144 mm.

⁴⁶¹ Die DIN-Palette ist gemäß Gütenorm der Union Internationale des Chemins de Fer - Internationaler Eisenbahnverband (UIC) im Merkblatt UIC 435-2 beschrieben.

⁴⁶² Vgl. DIN EN 13698-1 (2004) und Kuhn u. a. (2011b), S. 13.

⁴⁶³ Vgl. Martin (2014), S. 68.

der Automobilindustrie.⁴⁶⁴ Es gibt unterschiedliche Ausprägungen der Gitterbox aus Metall und Kunststoff, teilweise faltbar und beide Ausprägungen auch mit Klappen. Aufgrund des Gewichts muss das Handling der Gitterboxen durch Flurförderfahrzeuge (beispielsweise Gabelstapler) oder mit Hilfe von speziellen E-Rahmen im Routenzug erfolgen.⁴⁶⁵ Ein besonderes häufig eingesetzter Typ der Gitterbox ist die Euro-Gitterbox-Pool-Palette, siehe Abbildung 2.18, die genau dem Euro-Paletten Grundmaß nach DIN EN 13698-1 entspricht und bei einem Eigengewicht von 90 kg eine Tragkraft von 1.000 kg sowie fünffache Stapelhöhe ermöglicht.⁴⁶⁶ Die Materialbereitstellung am Montageort mithilfe von Großladungsträgern wird in Kapitel 2.4.5 beschrieben.

- Einweg-Boxpaletten: Bei dieser Bauform ist eine Flachpalette fest mit einem darauf montierten Karton oder einer Kiste verbunden. Diese Bauform ist auf einmalige Verwendung ausgelegt.⁴⁶⁷
- Vollwand-Boxpaletten: Diese Boxpaletten bieten über geschlossene Seitenwände, die maximal halb abklappbar sind, Aufnahmemöglichkeiten für Schüttgüter.⁴⁶⁸
- Rungen- oder Stapelgestelle: Diese Form der Großladungsträger wird für sperrige Güter oder die Bildung von Ladeeinheiten von Sonderladungsträgern, die nicht einzeln unterfahrbar sind, beispielsweise Styroporkästen, verwendet.



Abbildung 2.18: Gitterbox (Quelle: SSI-Schäfer (2017b))

SLT, auch als Spezialladungsträger bezeichnet, sind Transportgestelle oder Transportbehälter, die für ein bestimmtes Montageteil oder bestimmte Materialien entwickelt, konstruiert und

⁴⁶⁴ Vgl. Gleißner und Femerling (2008), S. 119.

⁴⁶⁵ Vgl. Klug (2010), S. 150.

⁴⁶⁶ Vgl. DIN EN 13698-1 (2004) und Vgl. Klug (2010), S. 151.

⁴⁶⁷ Vgl. Martin (2014), S. 68.

⁴⁶⁸ Vgl. Martin (2014), S. 68 und Jünemann (1989), S. 134.

gebaut wurden.⁴⁶⁹ Spezielle Aufnahmevorrichtungen aus den Werkstoffen Kunststoff, Metall, Holz oder Polystyrol⁴⁷⁰ in Gestalt von Einzel- oder Mehrfachaufnahmen sowie Zahnleisten fixieren und sichern das zu transportierende Material.⁴⁷¹ Aufgrund der Anpassung an ein oder wenige Montageteile oder Materialien sind Spezialladungsträger nicht flexibel einsetzbar. Während Universalladungsträger als Teil eines Pooling-Systems von mehreren Firmen gemeinsam genutzt werden und umlaufen, sind Spezialladungsträger meist Eigentum des OEM oder Zulieferers und werden nur im vordefinierten Kreislauf verwendet.⁴⁷² Gründe für den Einsatz von Sonderladungsträgern sind einerseits spezifische Bauteilgeometrien oder Materialgewichte, die keinen anderen, beschädigungsfreien Transport ermöglichen und andererseits besondere ergonomische oder automatisierungsgetriebene Vorgaben der Bestückung oder Entnahme der Materialien.⁴⁷³

Kartons oder Kartonagen gehören zu den tragenden und umschließenden Förderhilfsmitteln die nicht unterfahren werden können.⁴⁷⁴ Die Papier- und Kartonsorten für den Einsatz in Kartonagen sind in der DIN 6730 festgeschrieben.⁴⁷⁵ Sie werden vor allem für logistische Umläufe eingesetzt, bei denen das Material längere Zeit (Beispielsweise mehrere Wochen bei Materiallieferungen von Zulieferern aus Asien oder Afrika an deutsche Automobilwerke) unterwegs ist.⁴⁷⁶ Während der Vorteil von Kartonagen der günstige Anschaffungspreis ist, gelten die begrenzte Nutzbarkeit und die geringe Stabilität bei Feuchtigkeit oder Nässe, wenn die Kartonagen nicht mit Nassfestmitteln besonders bearbeitet sind, als Nachteil.⁴⁷⁷

2.4.4 Lagertechnik

Damit die in Kapitel 2.3 beschriebenen Belieferungsformen eine bedarfsgerechte Materialversorgung gewährleisten können, sind jeweils geeignete Lagertypen vorzuschalten. Zur Deckung des Bedarfs bei Sondersituationen (z. B. Staus, Unfälle oder kleinere technische Defekte bei den Zulieferern) werden häufig Übergangspuffer oder Notpuffer zwischen den Zulieferern und den Produktionswerken vorgehalten.⁴⁷⁸ Die Auslegung des Lagers und die Bestimmung des Lagertyps erfolgt dementsprechend über die Art, Menge und Größe der zu lagernden Materialien sowie die erforderliche Umschlagsleistung unter Einbeziehung eines Sicherheitspuffers.⁴⁷⁹ Je nach Lagertyp kommen unterschiedliche Lagermittel, beispielsweise Regaltypen wie Durchlaufregale oder Fachbodenregale, zum Einsatz. Die Ein- und Aus-

⁴⁶⁹ Klug (2010), S. 152.

⁴⁷⁰ Polystyrol ist in der Verarbeitung als Schaumkunststoff, sogenannter Styropor, bekannt.

⁴⁷¹ Klug (2010), S. 152.

⁴⁷² Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 117.

⁴⁷³ Vgl. Klug (2010), S. 152 f.

⁴⁷⁴ Vgl. Wannewetsch (2008), S. 114.

⁴⁷⁵ Vgl. DIN 6730 (2011).

⁴⁷⁶ Der VDA gibt in der Empfehlung VDA 4525 Hinweise für die Verwendung von Kartons als standardisierte Einwegverpackung für die Seecontainer-Anwendungen. (Vgl. VDA 4525 (2009)).

⁴⁷⁷ Vgl. Seidel und Gerber (2011), S. 41 und Martin (2014), S. 89.

⁴⁷⁸ Vgl. Hessenberger und Krcal (1997), S. 73.

⁴⁷⁹ Vgl. Koether (2012), S. 127.

lagerung von Materialien im Lager erfolgt, je nach Lagermittel, entweder manuell oder über Lagerbedientechnik⁴⁸⁰ wie beispielsweise Hochregalstapler.⁴⁸¹ Im Folgenden werden die wesentlichen Lagertypen für die Automobilproduktionslogistik vorgestellt:

Hochregallager (HRL) sind definiert als „[...] ein Gebäude ab 12 Meter Höhe, das zur effizienten Lagerung von Waren genutzt wird [...]“⁴⁸². Bei der Bauweise können Silo- und Hallenbauweise unterschieden werden.⁴⁸³ Ein Lagersystem wird als automatisches Hochregallager (aHRL) bezeichnet, wenn die Funktionen Ein- und Auslagern des HRL automatisiert sind. Für die Ein- und Auslagerung von Waren werden spezielle Regalförderfahrzeuge, Hochregalstapler oder RBG⁴⁸⁴ eingesetzt.⁴⁸⁵ Als Vorteile können eine hohe Flächenausnutzung und kurze Auslagerungszeiten aufgelistet werden.

Laut VDI Richtlinie 3630 ist ein **AKL** „[...] eine kompakte und in sich abgeschlossene Einheit“⁴⁸⁶. Koether bezeichnet AKL vereinfacht als verkleinerte Hochregallager.⁴⁸⁷ In einem AKL werden große Mengen von KLT⁴⁸⁸ vorgehalten und zwischengelagert, um zeitgerichtet je nach Abruf ausgelagert zu werden, siehe Abbildung 2.19. Das System funktioniert nach dem Ware zu Mann-Prinzip.⁴⁸⁹ Im Kern besteht ein AKL aus großen Lagerregalen in deren Fächer die Ladungsträger oder die Ladehilfsmittel (z. B. KLT, Tablette oder Kartons) einfach- oder doppeltief gelagert werden. Zwischen zwei gegenüberliegenden Regalen läuft ein RBG, welches nach dem gleichen Prinzip funktioniert wie das RBG beim HRL. Je nach Funktionsweise des Logistikkonzepts und des Anwendungsfelds befinden sich in einem Ladehilfsmittel ein bis mehrere Artikel. Über eine Förderanlage gelangen die entnommenen Ladehilfsmittel zum Übergabepunkt an dem entweder eine Kommissionierung aus dem Ladehilfsmittel stattfinden kann, oder das gesamte Ladehilfsmittel entnommen wird. Als Vorteile dieser Lagerform können, ähnlich wie beim HRL, die hohe Flächenausnutzung und niedrige Auslagerungszeiten gesehen werden.⁴⁹⁰

⁴⁸⁰ Nyhuis et al. zählen auch Kommissioniertechnik wie Pick-by-light-Systeme zur Lagerbedientechnik. (Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 298).

⁴⁸¹ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 298.

⁴⁸² Knauer (2009), S. 7.

⁴⁸³ Vgl. Overmeyer (2011), S. U89.

⁴⁸⁴ RBG sind automatische Geräte zur Be- und Entladung von Material aus einem Regal. Sie verfügen über einen vertikalen Mast und laufen im Regalgang an der Ober- und Unterseite in einer Führung. (Vgl. Günthner u. a. (2011), S. U89) Ein Hubwagen kann am Mast vertikal verfahren und positioniert das Lastaufnahmemittel, welches über eine ausfahrbare Aufnahmeeinheit die Ladehilfsmittel aus den Regalfächern entnehmen und einlagern kann. (Vgl. Overmeyer (2011), S. U89 und Martin (2011), S. 406).

⁴⁸⁵ Vgl. Tiedtke (2007), S. 328 und Bode und Preuß (2004), S. 103.

⁴⁸⁶ VDI 3630 (2006), S. 3.

⁴⁸⁷ Vgl. Koether (2012), S. 134.

⁴⁸⁸ Meist zwischen 10.000 und 80.000 KLT.

⁴⁸⁹ Vgl. Martin (2011), S. 407.

⁴⁹⁰ Vgl. Martin (2011), S. 408.



Abbildung 2.19: AKL (Quelle: SSI-Schäfer (2014))

Die simpelste Form der Lagerung wird als **Bodenlager** bezeichnet. Der Aufbau ist einfach, da keine Einrichtung (außer Bodenmarkierungen zur Erhaltung der Ordnung) notwendig sind.⁴⁹¹ Je nachdem, ob einzelne Blöcke oder Zeilen des Lagerguts gebildet werden, spricht man von Blocklagerung oder Zeilenlagerung.⁴⁹² Bei beiden Formen werden die Güter auf- und nebeneinander angeordnet, was den direkten Zugriff auf alle Güter einschränkt.⁴⁹³ Dementsprechend häufig müssen zuerst Entstapel- oder Umlagerungsvorgänge durchgeführt werden, bevor auf die betreffenden Güter direkt zugegriffen werden kann.⁴⁹⁴ Während die Blocklagerung eine höhere Flächennutzung ermöglicht, sind die Zugriffszeiten beim Zeilenlager niedriger.

Für alle Lagertypen gilt, betreffend die Materialversorgung und die damit einhergehenden Kosten, ein einfacher Bezug zwischen dem Zeitraum der Vorausproduktion und der Höhe der Lagerhaltungskosten. Je früher Materialien vorausproduziert werden, desto höher sind die Lagerbestände und die damit verbundenen Lagerhaltungskosten.⁴⁹⁵

2.4.5 Bereitstelltechnik

Die wesentlichen Anforderungen an die Bereitstelltechnik sind eine ergonomische, prozesssichere und greifraumoptimale Materialbereitstellung für die Montage. Diese Anforderungen sollen durch geeignete Bereitstellereinrichtungen (z. B. Regale und Ablageflächen)⁴⁹⁶ und Bereitstellmittel gelöst werden. Dabei gilt es zu beachten, dass die geforderten Eigenschaften für Bereitstellmittel und Förderhilfsmittel teilweise konträr sind. Während aus Sicht eines volumenoptimalen Transportvorgangs ein bestimmter Behälter aufgrund seiner Größe für ein Material besonders geeignet ist, entspricht dieser möglicherweise nicht den Anforderungen

⁴⁹¹ Vgl. Overmeyer (2011), S. U88.

⁴⁹² Vgl. Koether (2012), S. 125 f.

⁴⁹³ Vgl. ten Hompel und Schmidt (2013), S. 74.

⁴⁹⁴ Vgl. Tiedtke (2007), S. 328.

⁴⁹⁵ Vgl. Zäpfel (1989), S. 248.

⁴⁹⁶ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 298.

der Materialbereitstellung für einen raschen und beschädigungsfreien Materialzugriff.

Die grundsätzliche Anforderung der Materialbereitstellung ist es, den kleinstmöglichen Behälter auszuwählen, der die Wiederbeschaffungszeit, also den Zeitraum vom Abruf bis zum Eintreffen des Materials, überbrückt. Dabei ist auch die Verbauquote zu beachten, die angibt welcher prozentuale Anteil der Montageaufträge dieses Montageteil oder diese Komponente enthalten.⁴⁹⁷ Unter Verwendung der folgenden Formel lässt sich die minimale Bereitstellungsmenge am Verbaort BM_{VO} berechnen.⁴⁹⁸

$$BM_{VO} = \frac{T_{WB}}{T_t} \cdot MBF \cdot VBQ \quad (2.3)$$

wobei: T_{WB} = Wiederbeschaffungszeit [min]

T_t = Taktzeit [min]

MBF = Materialbedarf je Montageeinheit [Stck.]

VBQ = Verbauquote [%]

Grundsätzlich kann die Materialbereitstellung in der Automobilindustrie bei einer Vielzahl der Anwendungsfälle in vier Gruppen aufgeteilt werden. Dies sind erstens die Bereitstellung per Gitterbox oder Sonderladungsträger, zweitens die Bereitstellung per Durchlaufregal, drittens die Bereitstellung per Warenkorb und viertens die Bereitstellung per Stetigförderer. Diese werden nachfolgend beschrieben:

Bei der **Materialbereitstellung per Gitterbox oder Sonderladungsträger** muss grundsätzlich zwischen Ein- und Zweibehälterprinzipien unterschieden werden. Das Material wird in der Gitterbox oder im Sonderladungsträger entweder per Gabelstapler oder per Routenzug zum Verbaort transportiert und dort direkt neben dem Montageband vorgehalten, dieser Platz wird auch als Materialstreifen⁴⁹⁹ bezeichnet.⁵⁰⁰ Für die Bereitstellung kommen beim Zweibehälterprinzip zwei Vorgehensweisen zum Einsatz. Entweder es ist ausreichend Bandanstellfläche vorhanden, um beide Behälter (leer und voll) nebeneinander am Band platzieren zu können oder, bei beengten Platzverhältnissen, kommen Drehtische zum Einsatz.⁵⁰¹ Bei diesen Drehtischen steht immer der aktuelle Behälter, auf den der Montagemitarbeiter gerade zugreift, vorne am Band und auf dem hinteren Platz des Drehtellers wartet ein leerer Behälter auf seine Abholung bzw. ein voller Behälter steht als Nachschub bereit.

Die **Materialbereitstellung per Durchlaufregal** findet sich aktuell in einer Vielzahl von Variationen in den großen Automobilwerken. Die Regale, auch als Durchlaufregale bezeichnet,

⁴⁹⁷ Vgl. Dörmer (2013), S. 35 und Pröpster (2016), S. 94.

⁴⁹⁸ Vgl. Schedlbauer (2008), S. 122.

⁴⁹⁹ Weitere Beschreibungen des Materialstreifens finden sich beispielsweise in Motzer (2015), S. 14.

⁵⁰⁰ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 116.

⁵⁰¹ Vgl. Motzer (2015), S. 56.

werden vom Materialanfahrweg aus durch das Logistikpersonal befüllt und verfügen über Rollenbahnen mit einer Neigung in Richtung des Montagebands. Dadurch rutschen die Ladungsträger mit dem Material, dank Schwerkraft⁵⁰², immer in Richtung des Montagemitarbeiters.⁵⁰³ Nach der Entnahme der Materialien aus den Ladungsträgern setzt der Montagemitarbeiter den leeren Behälter auf eine zusätzliche Rollenbahn für das Leergut, die über eine Neigung in Richtung Materialanfahrweg verfügt. Gleichzeitig erfolgt entweder über eine Kanban-Karte, oder über einen Schalter beim elektronischen Kanban, der nächste Materialabruf. Das Leergut wird durch den Logistikmitarbeiter im Rahmen der Belieferung von neuen Ladungsträgern eingesammelt. Beim Inhalt der Ladungsträger lassen sich zwei Arten unterscheiden: Einmal der sortenreine Inhalt, bei dem ein Ladungsträger nur mit gleichen Teilen befüllt ist und auf der anderen Seite der sequenzierte Inhalt, bei dem das Material in Sequenz der Montage im Ladungsträger einsortiert ist. Während für die erste Variante mehr Bereitstellplatz notwendig ist, besteht bei der zweiten Variante ein größeres Fehlerpotenzial beim Materialabgriff.⁵⁰⁴



Abbildung 2.20: Durchlaufregal (Quelle: SSI-Schäfer (2017a))

In einigen Montagewerken kommt schon heute, siehe Abbildung 2.21 die **Materialbereitstellung per Warenkorb** zum Einsatz⁵⁰⁵. Mit Warenkorb oder Car-Set, teilweise auch als kits oder kitting system bezeichnet, wird die für ein Fahrzeug, für einen gewissen Teileumfang zusammengestellte, insbesondere vorkommissionierte und sequenzierte, Materialzusammenstellung beschrieben.⁵⁰⁶ Dabei werden Gestelle⁵⁰⁷ in einem Kommissionierbereich, meist manuell, mit vorgegebenen Montageteilen für ein Fahrzeug befüllt und zur ersten vor-

⁵⁰² Aus diesem Grund werden die Regale im englischen als gravity flow racks bezeichnet. (Vgl. Bozer und McGinnis (1992), S. 2).

⁵⁰³ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 116 und Schedlbauer (2008), S. 126.

⁵⁰⁴ Vgl. Battini u. a. (2012), S. 211.

⁵⁰⁵ Beispielsweise im Motorenwerk von Porsche in Zuffenhausen, im Mercedes Sprinter Werk in Ludwigsfelde, in der Audi R8-Fertigung in Neckarsulm und gerade auch in den asiatischen Werken von Toyota und Nissan.

⁵⁰⁶ Vgl. Aoki u. a. (2014), S. 379 sowie Elkin (2006), S. 28 sowie Klug (2010), S. 173 f. und Schlott (2005), S. 38.

⁵⁰⁷ Diese Gestelle sind mit Rollen versehen und meist aus Profilschienen zusammenschraubt, um bei Modellveränderungen angepasst werden zu können.

gesehenen Montagestation transportiert.⁵⁰⁸ Ab dort folgt der Warenkorb dem zugewiesenen Fahrzeug auf der Montagelinie parallel mit und jeder Montagemitarbeiter entnimmt an seiner Station die passenden Materialien bis der Warenkorb leer ist.⁵⁰⁹ Die Montageteile sind meist derart auf dem Warenkorbgestell platziert, dass sowohl eine optimale Entnahme für den Montagemitarbeiter gewährleistet ist als auch der Falschabgriff⁵¹⁰ reduziert wird.⁵¹¹

Da somit der Montagemitarbeiter keine Auswahl von unterschiedlichen Varianten von Montageteilen durchführen muss, ist das Fehlerpotenzial bei dieser Bereitstellungsform geringer als bei der Bereitstellung per Durchlaufregal.⁵¹² Die Materialbereitstellung per Warenkorb bietet sich besonders bei Verwendung von kleineren und mittelgroßen Montageteilen an, da einerseits der notwendige Fahrweg für den mitfahrenden Warenkorb kleiner gehalten werden kann und andererseits eine größere Belademenge an Montageteilen für das Gestell möglich ist.⁵¹³



Abbildung 2.21: Warenkorb (Quelle: Daimler (2015))

Bei der **Materialbereitstellung mittels Stetigförderer** ist am Verbauort ein Entnahmepunkt für den Stetigförderer vorgesehen. Diese Bereitstellungsart kommt häufig bei großen, schweren und sequenzierten Montageteilen zum Einsatz, beispielsweise bei Rädern, Sitzen und Armaturenbrettern. Der Stetigförderer verbindet dabei meist den Vormontage- mit dem Endmontagebereich.

⁵⁰⁸ Vgl. Bozer und McGinnis (1992), S. 3 und Motzer (2015), S. 56.

⁵⁰⁹ Vgl. Boysen u. a. (2015), S. 115.

⁵¹⁰ Der Begriff Falschabgriff oder Fehlgriff bezeichnet in diesem Zusammenhang die Entnahme des falschen Materials aus einer Bereitstellungsform, beispielsweise einem Regal. Der Fehler ist dabei menschlicher Natur und kann durch unklare Kennzeichnung, Ablenkung oder fehlende Konzentration entstehen. (Vgl. Grünz (2004), S. 47).

⁵¹¹ Vgl. Klug (2010), S. 273.

⁵¹² Vgl. Bozer und McGinnis (1992), S. 1 f.

⁵¹³ Vgl. Battini u. a. (2012), S. 211 und Boysen u. a. (2015), S. 115.

2.4.6 Technisches Materialflusssystem

In ihrer Kombination bilden die drei vorgestellten Technikelemente (Fördertechnik, Lager-technik und Bereitstelltechnik) das technische Materialflusssystem, welches wesentlich für die geplante Funktionalität der Materialbereitstellungsstrategien verantwortlich ist.⁵¹⁴ Beim Einsatz der Technikelemente, insbesondere von Flurförderzeugen, sind die folgenden Zielbedingungen zu beachten⁵¹⁵:

- optimale Nutzung
 - Minimierung der Transportkosten durch möglichst optimale Volumenausnutzung und geringe Leerfahrten
 - Maximierung der zeitlichen und funktionalen Auslastung
- hohe Flexibilität
 - Anpassung an betriebliche Änderungen mit minimalem Aufwand
 - Breites Transportspektrum
- hoher Servicegrad
 - Minimierung der Auftrags- und Transportzeiten
 - Reaktionsmöglichkeit bei Eilaufträgen
- hohe Transparenz
 - Anstreben von Kennzahlen in Echtzeit
 - Verursachungsgerechte Kostenverrechnung

2.5 Fazit

Die heutige Automobilproduktionslogistik ist durch die starre Fördertechnik und die bestehenden Anlieferungskonzepte in Bezug auf Flexibilität und Wandlungsfähigkeit beschränkt.⁵¹⁶ Während den Kunden in den 1950er Jahren bei einem VW Käfer kaum Wahlmöglichkeiten für die Innenausstattung geboten wurden, siehe Abbildung 1.3, war eine wirtschaftliche Produktion unter Verwendung von getakteter Fließfertigung mit Hängeförderern und in einem Bandlayout möglich. Dadurch bestand die Aufgabe der Intralogistik bis vor einigen Jahrzehnten lediglich im Wareneingang, der Zwischenlagerung und der Bereitstellung von bestellten Ladungsträgern am Montageort. Den eigentlichen Kommissionieraufwand musste der Montagemitarbeiter leisten. Diese Vorgehensweise hat sich in den letzten Jahrzehnten geändert.

⁵¹⁴ Vgl. Bullinger und Lung (1994), S. 38.

⁵¹⁵ Vgl. Schulte (2013), S. 159 nach Schulze und Weber (1987), S. 13 f.

⁵¹⁶ Vgl. Scholl (1999), S. 2.

Durch den Anstieg der Ausstattungsmöglichkeiten und Modellvarianten musste eine immer größer werdende Materialvarianz an den Montagestationen abgebildet werden. Dabei reicht der Platz für die logistische Bereitstellung des Montagematerials an der Montagelinie kaum noch aus⁵¹⁷. Aus diesem Grund wurde die abgestimmte Materialversorgung und Vorkommissionierung sowie die Materialsequenzierung immer wichtiger. Dabei wird nur das Material zum Verbauort transportiert, welches dort nach kurzer Zeit auch verbaut wird. Hierbei muss angemerkt werden, dass eine montagegerechte Materialbereitstellung immer mit zusätzlichen Arbeitsaufgaben in den vorgelagerten Prozessen, insbesondere der Logistik (z. B. Kommissionieraufwand), verbunden ist.⁵¹⁸ Weiterhin führt der Anstieg der Modell- und Ausstattungsvarianten zu erheblichem Planungsaufwand in der Produktion. Hierzu zählen beispielsweise Restriktionen für die Einplanung der zu fertigenden Fahrzeuge in die Montage.⁵¹⁹

Auf Seite des physischen Materialflusses stellten die Verwendung von Durchlaufregalen und später Supermärkten und Routenzügen zeitlich gesehen für bestimmte Phasen zufriedenstellende Lösungen für die Situationen dar.⁵²⁰ Auf der Seite des Informationsflusses wurden der Materialabruf per Kanban und die Materialbereitstellungsstrategien JIT und JIS zum Einsatz gebracht. Während der Materialabruf per Kanban einen transparenten Prozess liefert ist gleichzeitig auch der Steuerungs- und Kommissionieraufwand geringer. Insbesondere für großvolumige und wertvolle Materialien werden die Materialbereitstellungsstrategien JIT und JIS zum Einsatz gebracht, bei der laut Klug im Vergleich zum Materialabruf per Kanban ein höherer Steuerungs- und Kommissionieraufwand anfällt.⁵²¹ Dieser höhere Aufwand entsteht durch die notwendige Abstimmung der Produktions- und Materialbereitstellungsprozesse.⁵²² Durch den Einsatz von Informationstechnologie wurden die Materialbereitstellungsstrategien effizienter und schneller in Bezug auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Anschließend folgte in einigen Unternehmen die Einführung der Materialbereitstellung per Warenkorb, die einen ähnlichen Kommissionieraufwand wie JIT und JIS besitzt, aber mit geringerem Steuerungsaufwand auskommt. Aufgrund der Vor- und Nachteile der einzelnen Strategien sind in der Praxis häufig Mischformen der Materialbereitstellungsformen zu beobachten.⁵²³

Die aktuell weiter steigende Variantenvielfalt stellt die Automobilproduktionslogistik vor Herausforderungen in Bezug auf effiziente und dadurch kostengünstige Materialflüsse. Die bisherigen Konzepte für die Materialbereitstellung stoßen somit aktuell an Ihre Grenzen.⁵²⁴ Durch die zusätzliche Einbindung von Logistikdienstleistern, bezeichnet als Logistik-

⁵¹⁷ Vgl. Golz (2014) und Boysen u. a. (2015), S. 109 sowie Battini u. a. (2012), S. 210.

⁵¹⁸ Vgl. Röhrig (2002), S. 109.

⁵¹⁹ Beispielsweise gibt es in vielen Montagewerken sogenannte Model-Mix-Begrenzungen, bei denen von 10 hintereinander zu montierenden Fahrzeugen nur zwei eine Vollausstattung oder bestimmte Sonderumfänge beinhalten dürfen, um von der Montagemannschaft und innerhalb der Taktzeit wirtschaftlich handhabbar zu sein. (Vgl. Aoki u. a. (2014), S. 380).

⁵²⁰ Vgl. Scheel und Chilian (2007), S. 308.

⁵²¹ Vgl. Klug (2010), S. 301

⁵²² Vgl. Wildemann (2001), S. 35.

⁵²³ Vgl. Röhrig (2002), S. 109.

⁵²⁴ Vgl. Wehking und Popp (2015a), S. 326.

Outsourcing⁵²⁵, werden in vielen Werken die gestiegenen Variantenzahlen dank niedrigerem Lohnniveau der Dienstleister (als beim OEM), deren eigenen Investitionsmitteln sowie spezifischem Know-how noch wirtschaftlich durchgeführt werden.⁵²⁶ Das Einsparpotenzial bei diesen Auslagerungen scheint in naher Zukunft erreicht zu werden. Auch in Bezug auf Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, insbesondere für Produktionen der Stückzahl 1, stoßen die aktuellen Logistikkonzepte an Grenzen. Die Bereitstellungsformen JIT mit vorgeplanten Anlieferzeitfenstern und JIS mit stundenweise vorkommissionierten Ladungsträgern machen kurzfristige Änderungen in der Montagereihenfolge entweder nicht möglich oder führen zu hohem Aufwand und steigenden Kosten.⁵²⁷ Verbunden mit dem Anstieg der Varianten hat auch die Zahl an unterschiedlichen Ladungsträgern zugenommen. Die entstandene Ladungsträgervielfalt (Gitterboxen, Sonderladungsträger, KLT und Kartons) beschränkt die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Inbound-Logistik erheblich. Denn je nach Ladungsträger können nur bestimmte Logistikkonzepte ausgewählt werden. Optimierungen in der Materialbereitstellung durch die Verwendung von anderen Konzepten sind kurzfristig nicht möglich. Außerdem müssen Sonderladungsträger bzw. Einlagen in den Ladungsträgern genau zum passenden Lieferanten zurückkehren sowie bei Modellumstellungen und den damit verbundenen Geometrieänderungen neu konzipiert und umgebaut werden.

Der Informationsfluss für Materialien verläuft in den meisten der von uns besuchten Werke⁵²⁸ abrufgesteuert auf Basis von Kanban-Karten oder elektrischen Kanban-Signalen, ausgelöst durch einen Druckknopf am Verbauort. Dementsprechend ist für die Zukunft der Aufbau von flexiblen, wandlungsfähigen und wandelbaren Strukturen für die Automobilproduktionslogistik notwendig, um auch in Jahrzehnten noch in Hochlohnstandorten, wie beispielsweise Deutschland, Fahrzeuge effizient zu produzieren. Während andere Länder bei den Produktionstechnologien und der Qualität aufholen, können Sie aufgrund des niedrigeren Lohnniveaus⁵²⁹ noch einige Jahre länger weniger effiziente Prozesse durchführen und trotzdem rentabel produzieren.

⁵²⁵ Lehmann beschreibt, dass das Outsourcing von Logistikaktivitäten bei den OEMs häufig als Teil der Konzentration auf die Kernkompetenzen aufgefasst wird. (Vgl. Lehmann (2002), S. 184).

⁵²⁶ Vgl. Dickmann (2009), S. 318 und Baumgarten (2008), S. 58.

⁵²⁷ Vgl. Klug (2011), S. 60.

⁵²⁸ Eine Aufstellung der besuchten Werke findet sich in Kapitel 2.3.

⁵²⁹ Vgl. Spath (2008), S. 11.

3 Neuartige Logistikkonzepte für eine wandelbare Automobilproduktion der Zukunft

In diesem Kapitel werden die neuartigen Logistikkonzepte zur Unterstützung einer flexiblen und wandlungsfähigen Produktion von Automobilen sowie die zugehörigen neuen Betriebsmittel beschrieben.

In Zukunft soll die Montage der Fahrzeuge ohne starre Fördertechnik stattfinden. Stattdessen finden sich in einer leeren Halle, die nur über Heizung, Klimaanlage, Strom- und Druckluftanschlüsse verfügt, mobile Plattformen auf denen theoretisch alle Fahrzeuge eines Herstellers montiert werden können. Dabei ist die Idee, dass diese neuartigen Montagewerke für mehrere Fahrzeugmodelle, beispielsweise das Fahrzeugmodell A (Kleinwagen), das Fahrzeugmodell B (Limousine) und Fahrzeugmodell C (SUV), gleichmäßiger ausgelastet werden können bzw. sich auf Veränderungen der Fertigungs- und Zuliefersituationen flexibler und somit kostengünstiger anpassen lassen.

Eine effiziente Neugestaltung der Produktion und Logistik von Automobilen wird nur erreicht, wenn die logistischen Vorgänge von Beginn an mit in die Konzeptgestaltung einbezogen werden, also eine simultane Planung von Produktions- und Logistikprozessen stattfindet.⁵³⁰ Andernfalls würde die Vorgehensweise der letzten Jahrzehnte wiederholt werden: Auf Basis von Veränderungen in der Produktion entstehen logistische Herausforderungen, die sich nur über Mehraufwand und zusätzliche Kosten bewältigen lassen. Dieser Fall tritt ein, wenn die Montageverantwortlichen auf Basis der Produktionsinteressen, beispielsweise die Auslastung der Montagemitarbeiter, die logistischen Vorgänge ausblenden und effiziente Verfahren für die Montage erarbeiten. Die Logistik hat anschließend die Aufgabe, die komplexere Materialbereitstellung des neuen Montagekonzepts zu ermöglichen. Verständlicherweise werden bei dieser Vorgehensweise nur lokale Suboptima für die Montage erreicht und die Lagerbestände sowie die Durchlaufzeiten sind hoch.⁵³¹ Folglich wurde in der Vergangenheit häufig davon gesprochen, dass die Produktion zu Lasten von Kosten in anderen Bereichen, speziell der Logistik, optimiert wurde.⁵³² Diese alte Vorgehensweise soll sich nicht wiederholen, weshalb die Konzepte der vorliegenden Arbeit im Projekt ARENA2036 gleichzeitig in enger Abstimmung zwischen Montage- und Logistikverantwortlichen entwickelt wurden. Jede Prozessoptimierung in einem Bereich wurde sorgsam mit den Auswirkungen auf den anderen Bereich der ARENA-Teilprojekte abgestimmt.

⁵³⁰ Vgl. Mößmer u. a. (2007), S. 12 und Klug (2010), S. 257.

⁵³¹ Vgl. Zäpfel (1989), S. 93 f.

⁵³² Beispielsweise wird das Werkerdreieck, also der vom Montagemitarbeiter zurückgelegte Weg zwischen den drei Eckpunkten Entnahmeort der Materials, Einbauort des Materials und Ausgangsposition des Taktes (da sich das Fahrzeug auf dem Plattenband in der Zwischenzeit weiter nach vorne bewegt hat), möglichst klein gehalten, damit vom Montagemitarbeiter nur wenige Meter zurückgelegt werden müssen. (Vgl. Dörmer (2013), S. 22) Die Logistik hat dafür einen erhöhten Aufwand, da die bereitzustellenden Materialien optimal für den Montagemitarbeiter positioniert werden müssen und ein effizienter Materialanfahrweg eine niedrigere Priorität bekommt. (Vgl. Klug (2010), S. 264 f. sowie Hartel (2015), S. 113).

3.1 Modulwerk

Im Gegensatz zu der in Kapitel 2.2 präsentierten, festen Verkettung der unterschiedlichen Gewerke und Montagebereiche, entstand vor ca. 15 Jahren die Idee von zukünftigen Montagesystemen für variantenreiche Serienprodukte und somit auch Automobilfertigungen als sogenanntes Modulwerk⁵³³, um mehr Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zu ermöglichen.⁵³⁴ Dargestellt ist ein derartiger Werksaufbau als Modulwerk symbolisch in Abbildung 3.1. Ausgehend vom Presswerk gelangen die Blechteile entweder über einen Puffer zur Karosseriemontage und anschließend zur Lackierung oder direkt in die Modulwerke mit eigener Lackierung. Zentrale Idee ist es, dass sich die einzelnen Module in den Modulwerken bis zum einbaufähigen Zustand komplett vorfertigen lassen.⁵³⁵ Abhängig von den zu fertigenden Karosserie- bzw. Fahrzeugtypen, Motoren- oder Ausstattungsvarianten werden die Module in der Endmontage zusammengesetzt. Weiterhin soll das Modulwerk bei Bedarf die Neuordnung der Module ermöglichen.⁵³⁶

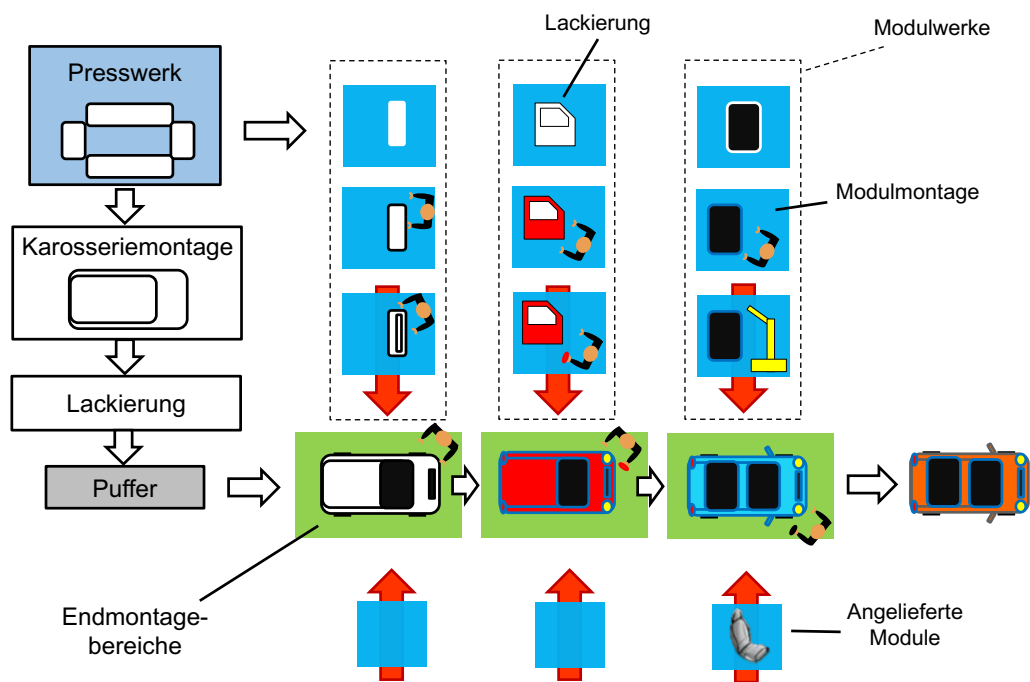


Abbildung 3.1: Modulwerk für die zukünftige Automobilproduktion

⁵³³ Westkämper entwickelte die Idee für eine modulare Montage aufbauend auf Untersuchungen aus der Luftfahrtindustrie. (Vgl. Westkämper (2001), S. 479 f.) Aber die Idee für eine Ablösung von Band und identischen Arbeitstakten bestand damals noch nicht.

⁵³⁴ Vgl. Westkämper (2001), S. 479 f. und Wiendahl und Klepsch (2006), S. 369.

⁵³⁵ Vgl. Westkämper (2001), S. 480.

⁵³⁶ Eine spezielle Hebeeinrichtung bzw. Manipulator für die schwere Batterie eines Hybridfahrzeugs wird beispielsweise nur bei Bedarf als Batterie-Montagezelle an der passenden Stelle angeordnet. Während der Produktion und Montage anderer Fahrzeuge wartet der Batterie-Manipulator an einem Bereitstellplatz auf seinen Einsatz. Durch diese Vorgehensweise könnte die bisherige Situation vom Bau einer Montagelinie für genau ein Fahrzeugmodell verworfen werden.

3.2 Matrixmontage

Weiterhin ist, gegenüber der in Kapitel 2.1.1 dargestellten Form einer Linienmontage, im Rahmen des Forschungsprojekts ARENA2036, eine Montage der Fahrzeuge in Matrix- oder Schachbrettlayout ohne starre Fördertechnik geplant. Zentrale Idee ist dabei die Verwendung von flexiblen, skalierbaren Prozessmodulen⁵³⁷, die untereinander vernetzt sind.⁵³⁸ Prozessmodule, auch bezeichnet als cyber-physische Produktionsfraktale, können mit flexiblen Transportsystemen (z. B. FTF) vernetzt werden, sodass jede Variante eines Produkts einen individuell angepassten Fahrweg, in dieser Arbeit als Produktionspfad bezeichnet, durch die Produktion nehmen kann und nach Bedarf verschiedene Prozessmodule anfährt.⁵³⁹ Die Taktzeiten der einzelnen Prozessmodule können je nach Produktionsvolumen angepasst werden. Zum Verlängern der Taktzeit ist es möglich den manuellen Anteil einzelner Arbeitsschritte zu erhöhen. Eine Verringerung der Taktzeit erfolgt beispielsweise durch eine skalierbare Automatisierung. Die Größe der Prozessmodule wiederum richtet sich nach der Komplexität des Produktionsschrittes.⁵⁴⁰

Diese unterschiedlichen Produktionspfade durch die Montage erlauben eine detaillierte Steuerung von bestimmten Fahrzeugen zu den jeweils notwendigen Stationen, den Prozessmodulen⁵⁴¹. Müssen am jeweiligen Fahrzeug an bestimmten Montagestationen keine Montagearbeiten ausgeführt werden, dann fährt das Fahrzeug diese Station im Idealfall gar nicht an.⁵⁴² Auch in Bezug auf die Antriebsvarianten liefert diese Vorgehensweise viel Potenzial, da ein Hybridfahrzeug gegenüber einem reinen Verbrennerfahrzeug zusätzliche Stationen anläuft. Eine visualisierte Darstellung dieser unterschiedlichen Pfade durch die Produktion ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Prozessmodule (PM) sind Stationen, an denen Montagearbeiten (z. B. Türenmontage, Sitzmontage, Einbau der Windschutzscheibe, Reifenmontage etc.) durchgeführt werden. Einerseits durch den Wegfall starrer Fördertechnik und andererseits durch die Verwendung von frei navigierenden Montageplattformen können die aufzubauenen Fahrzeuge die Prozessmodule in unterschiedlicher Reihenfolge ansteuern. Wobei dies

⁵³⁷ Prozessmodule sind die kleinsten Einheiten eines Produktionssystems, die als abgeschlossene Einheit verlagert, vervielfältigt, ausgegliedert und rekonfiguriert werden können. (Vgl. Aurich u. a. (2003), S. 216) Innerhalb des Prozessmoduls befinden sich produktionsspezifische Komponenten des Aufbaus, wie beispielsweise Werkzeuge und Zuführeinrichtungen. (Vgl. Schuh (2008), S. 178 f.).

⁵³⁸ Vgl. Bauernhansl (2014), S. 21.

⁵³⁹ Vgl. Bauernhansl (2017), S. 355.

⁵⁴⁰ Vgl. Vogel-Heuser u. a. (2017), S. 17.

⁵⁴¹ Die Modularisierung bezeichnet Hüttenrauch als Kernelement der dritten Revolution in der Automobilindustrie. (Vgl. Hüttenrauch und Baum (2008a), S. 127).

⁵⁴² Als Beispiel sollen hier die Fertigung einer Limousine und eines Cabrios dienen: Während das Cabrio auf seinem Montage- und Logistik-Groß-FTF eine spezielle Montagestation für die Dachmontage durchlaufen muss, könnte die Limousine im neuartigen Montagekonzept diese Station umfahren und ihre Durchlaufzeit verkürzen.

natürlich nur bei den Modulen möglich ist, deren Montagetätigkeiten im Vorranggraph⁵⁴³ parallel zueinander stattfinden. In der Abbildung ist dies mit den Pfaden 1 und 2 eingezeichnet. Während ein Fahrzeug auf dem Produktionspfad 1 beispielsweise an den Stationen 1a, 2 und 3 bearbeitet wird, erfolgt für Fahrzeuge auf dem Pfad 2 eine Bearbeitung an den Stationen 1b, 2 und 3. Weiterhin endet die Produktion bei Pfad 2 schon beim Prozessmodul 11, während Fahrzeuge auf Pfad 2 erst nach Prozessmodul 12 fertig montiert sind. Damit eine optimale Auslastung der Montage erreicht werden kann, gibt es einige Prozessmodule in doppelter oder dreifacher Ausführung (z. B. Prozessmodul 1a und 1b).⁵⁴⁴

Je nach Auslastungsgrad der Produktion (beispielsweise Planzahl oder Spitzenlast) und den jeweils zu produzierenden Ausstattungsvarianten (z. B. Motorvarianten: Diesel, Benzin oder Hybrid) werden die zu fertigenden Fahrzeuge auf unterschiedlichen Pfaden durch das Schachbrettmuster hindurch bewegt. Weiterhin bedeutet dies auch, dass bestimmte Fahrzeuge des gleichen Typs, abhängig von der aktuellen Auslastung der Produktion, unterschiedliche Montagestationen anlaufen. Darüber hinaus können Fahrzeuge mit Nacharbeitsbedarf direkt an der betreffenden Stelle ausgeschleust und nachgearbeitet werden. Dies ist wesentlich effizienter als bisherige Vorgehensweisen, siehe Kapitel 2.1.4.

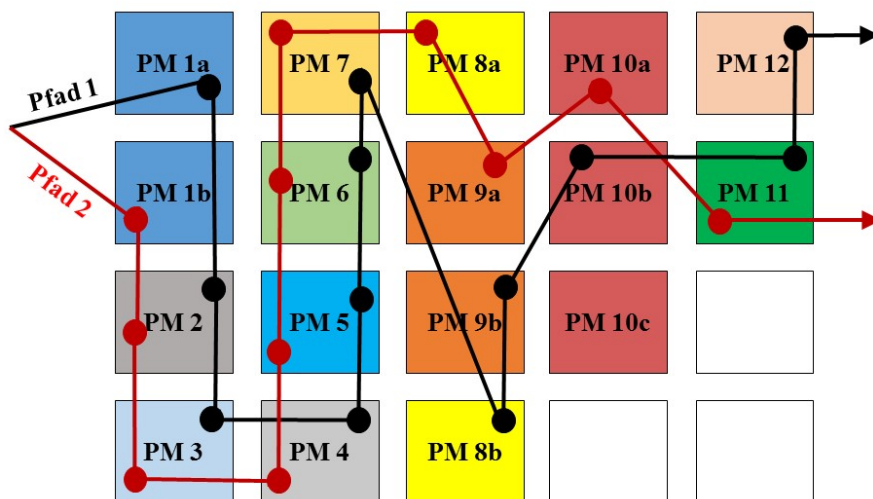


Abbildung 3.2: Anordnung von Prozessmodulen im Matrixlayout nach Foith-Förster und Bauernhansl (2015), S. 389

⁵⁴³ Vorranggraphen oder Montagevorranggraphen sind laut Dangelmaier gerichtete, zyklensfreie Graphen mit einer Menge von Knoten, die den Arbeitsvorgängen des betrachteten Produkts [z. B. Verschrauben] entsprechen. (Vgl. Dangelmaier (2003), S. 359) Die gerichtete Kante von einem Knoten i zu einem Knoten j ist die Vorrangfolge, sie stellt die Beziehung der verbundenen Arbeitsvorgänge i und j dar und legt somit fest, dass der Arbeitsschritt i vor dem Nachfolger j durchgeführt werden muss. (Vgl. Dangelmaier (2003), S. 359 und Bullinger u. a. (1993), S. 261 sowie Pfrang (1990), S. 2) Dementsprechend werden Vorranggraphen zur Bestimmung der Abhängigkeiten zwischen Arbeitsgängen und möglichen Nebenbedingungen genutzt. (Vgl. Dörmer (2013), S. 19 sowie Boysen u. a. (2007), S. 763).

⁵⁴⁴ Vgl. Wehking und Popp (2015a), S. 329.

3.3 Montage- und Logistik-Groß-FTF

Damit die Ansätze einer Matrixmontage in der Automobilproduktion umgesetzt werden können, sind neue Betriebsmittel für die Förderung der im Aufbau befindlichen Fahrzeuge notwendig. Im Rahmen des Projektes wurde deshalb am IFT ein Montage- und Logistik-Groß-FTF, siehe Abbildung 3.3, konzipiert, welches zu Beginn der Endmontage den Unterboden des aufzubauenden Fahrzeugs aufnimmt und durch das Montagelayout transportiert. Statt des Unterbodens könnte auch ein neuartiges Bodenmodul aufgenommen werden. Die Idee des Bodenmoduls stammt aus anderen Forschungsbereichen der ARENA2036 und beschreibt ein selbsttragendes Modul welches den Boden eines Fahrzeugs darstellt und den Ausgangspunkt der Montage bildet. Beispielsweise ist das Modul aus CFK gefertigt und wird schon während der Produktion mit Komponenten (z. B. Fluid- oder Stromleitungen) ausgestattet. Am Bodenmodul werden in der Montage unterschiedliche Komponenten (z. B. Achsen, Sitze und Armaturenbrett) befestigt, bevor zum Abschluss der Montage die Karossernhülle von oben aufgesetzt wird.

Aktuell läuft die Konstruktionsphase des Montage- und Logistik-Groß-FTF, an die sich im Zeitverlauf die Bauphase des Prototyps anschließen soll. Mithilfe eingebauter Hub-, Dreh- und Schwenkfunktionen ermöglicht das Montage- und Logistik-Groß-FTF als flächenbewegliche Plattform die Durchführbarkeit einer Vielzahl von Montageschritten sowohl wenn es an Stationen anhält als auch im bewegten Zustand. Denn die Werker fahren auf dem Montage- und Logistik-Groß-FTF, siehe hierzu Abbildung 3.3, mit.⁵⁴⁵ Die eingebauten Hub-, Dreh- und Schwenkfunktionen verfolgen das Ziel, die Montageobjekte ergonomisch möglichst optimal für den Werker zu positionieren. Durch die Ausführung des FTF als Plattform mit einem umlaufenden Bereich gleicher Höhe, dem sogenannten Werkerrand, kann der Montagemitarbeiter während der Fahrt des FTF bestimmte Arbeitsschritte ausführen. Ob die Montage idealerweise nur im gestoppten, nur im bewegten oder in beiden Zuständen stattfindet, muss anhand weiterer Forschung bestimmt werden.

Während bestehende Plattenband- oder Flächenförderer bzw. C-Gehänge, siehe Kapitel 2.1.2, bei jedem Modellwechsel aufwendig angepasst oder teilweise ausgetauscht werden müssen,⁵⁴⁶ bietet das Montage- und Logistik-Groß-FTF hier deutlich mehr Flexibilität. Durch einen verstellbaren Aufnahmerahmen für die Unterböden, bezeichnet als Fahrzeugträger, sind kurzfristige Anpassung an unterschiedliche Fahrzeugmodelle und deren Abmessungen bzw. Aufnahmepunkte möglich, sodass die Montageplattform mit kleinen Anpassungen für unterschiedliche Modelle und somit auch über Modellwechsel hinweg einsetzbar ist.⁵⁴⁷ Obwohl die Erstinvestitionskosten für das Montage- und Logistik-Groß-FTF voraussichtlich höher sind als für einen Systemabschnitt eines Plattenbandförderers oder Gehänges, wird davon ausgegangen, dass sich die Investition beim nächsten Modellwechsel amortisiert. Da

⁵⁴⁵ Vgl. Hofmann und Wehking (2016), S. 43.

⁵⁴⁶ Vgl. Kuhn (2002), S. 9.

⁵⁴⁷ Vgl. Hofmann und Wehking (2016), S. 43.

somit nicht alle vier bis sechs Jahre⁵⁴⁸, je nach Produktlebenszyklus, Anpassungen an den festen Förderanlagen vorgenommen werden müssen.

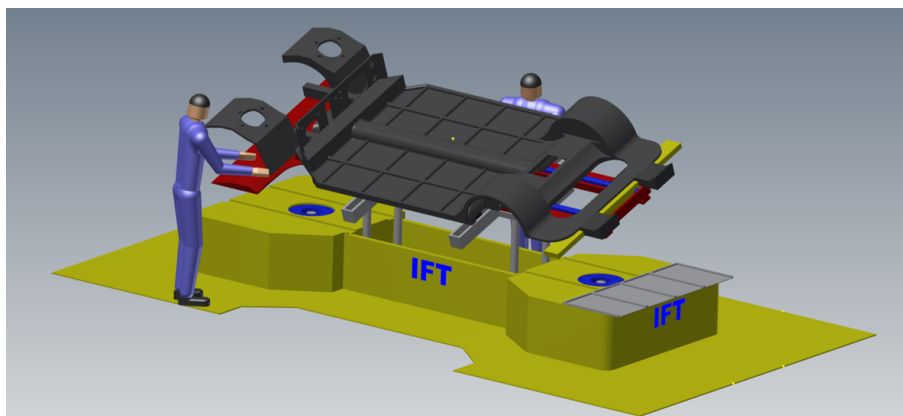


Abbildung 3.3: Montage- und Logistik-Groß-FTF mit Unterboden und Werkern

3.4 Kleine und mittelgroße FTF: KaTe und Doppelkufen

Die Materialzuführung für die Montage auf dem Montage- und Logistik-Groß-FTF soll in mehreren Konzepten per FTF erfolgen. Beispielhaft für solche Materialanlieferungen per FTF werden an dieser Stelle zwei Entwicklungen des IFT aus den letzten Jahren vorgestellt. Dies sind einerseits das System kleine autonome Transporteinheiten (KaTe) und andererseits das System Doppelkufen, die beide nachfolgend im Detail erläutert werden. Die beiden Systeme wurden in der Anfangsphase des Forschungsprojektes für die Umsetzung der neuartigen Logistikkonzepte eingeplant, da Sie durch Ihre Eigenschaften die grundlegenden Anforderungen erfüllen. Im Laufe der weiteren Bearbeitung wurde jedoch klar, dass ein Universal-Unterfahr-FTF, siehe Beschreibung in Kapitel 3.8.2, für den Transport der unterschiedlichen Gestelle sinnvoller erscheint, da die Variante mit einem FTF flexibler und wandlungsfähiger ist. In der Abbildung 3.4 sind die beiden FTF beispielhaft während der Materialbereitstellung zum Montage- und Logistik-Groß-FTF abgebildet. Während das Doppelkufensystem eine Europalette mit darauf befindlichem Motor anliefert, übernehmen die KaTe-Fahrzeuge (dargestellt durch die grauen Kästen rechts) die Anlieferung von KLT.

⁵⁴⁸ Vgl. MacDuffie u. a. (1996), S. 353.

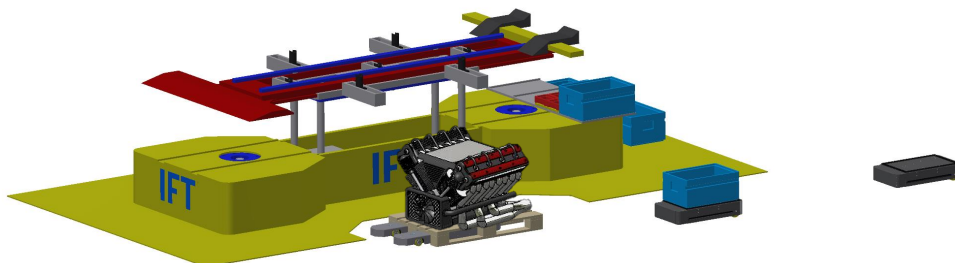


Abbildung 3.4: Beispielhafte Materialanlieferung zum Montage- und Logistik-Groß-FTF

Das System KaTe, siehe dazu Abbildung 3.5(a), ist ein monofunktionales Transportfahrzeug zum Transport von KLT. Es verfügt über einen Drehschemel mit Differentialantrieb, also zwei einzeln angetriebenen Rädern und zusätzlich zwei Bockrollen als starre Achse. Durch diese Konfiguration können die Lenk- und Fahrfunktionen durch den gleichen Antrieb realisiert werden. Die Nutzlast des Systems beträgt 30 kg und die maximale Fahrgeschwindigkeit liegt bei 1,5 m/s.⁵⁴⁹ Der Entwicklungspartner im Projekt, die Firma Götting, hat bestimmte Vermarktungsrechte im Jahr 2015 an die Firma SSI-Schäfer verkauft. Dort werden die Fahrzeuge aktuell unter dem Namen Weasel angeboten und gewannen im Jahr 2016 den International Forklift Truck of the Year (IFOY)-Award.⁵⁵⁰

Das Doppelkufen-System, dargestellt in 3.5(b), ist ein Fördersystem zum Transport von Europaletten mit einem Gewicht von bis zu 1.000 kg, bei einer Verfahrgeschwindigkeit von bis zu 1,0 m/s. Das Anheben und anschließende Verfahren sowie das Absetzen der Palette erfolgt über zwei Spindelhubantriebe, die somit die Hub-, Fahr- und Lenkbewegungen kombinieren. Das innovative System passt genau in den Bauraum, die Gabelaussparungen⁵⁵¹, einer Euro-Palette.⁵⁵² Das Patent und die Prototypen dieses Systems wurden im Jahr 2013 an die Firma Eisenmann AG verkauft und werden seitdem unter dem Namen LogiMover vertrieben.

⁵⁴⁹ Vgl. Wehking u. a. (2012a), S. 24 ff.

⁵⁵⁰ Vgl. IFOY (2016).

⁵⁵¹ Die Gabelaussparungen sind beiden Längsöffnungen unter einer Palette, in die ein Flurförderfahrzeug seine Gabeln einfahren kann, um die Palette anzuheben und anschließend zu bewegen.

⁵⁵² Vgl. Wehking u. a. (2012b), S. 80 f.

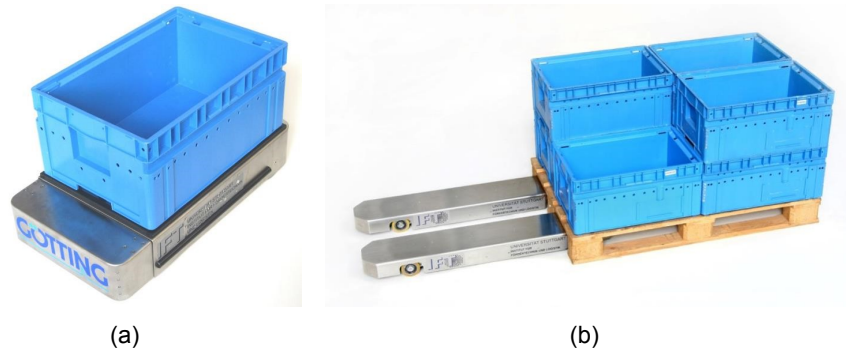


Abbildung 3.5: Kleine und mittelgroße FTF

3.5 Erarbeitung der Konzepte

An dieser Stelle wird die Konzipierung und Grobauswahl der neuartigen Logistikkonzepte beschrieben. Die neuen Konzepte sollen, unter Verwendung von neuartigen Betriebsmitteln wie dem Montage- und Logistik-Groß-FTF und bestimmten FTF für die Materialbereitstellung (z. B. KaTe und Doppelkufen), eine Neugestaltung der Automobilproduktion, wie im Rahmen von ARENA2036 geplant, ermöglichen. Damit die Erarbeitung von neuen Konzepten unter Einbeziehung der unterschiedlichen Beteiligten (Produktion, Betriebsmittel und Logistik) erfolgte, wurde im Projekt ARENA2036 eine spezielle Logistikarbeitsgruppe gebildet. Zu Beginn der Untersuchung erfolgte eine Bestandsaufnahme in Automobilwerken.⁵⁵³ Dabei konnte klar ermittelt werden, dass die hohe Anzahl an Umschlagsvorgängen⁵⁵⁴ aktuell einen erheblichen Kostenanteil in der logistischen Anlieferung darstellt und gleichzeitig die Flexibilität stark begrenzt. Grund für diese Begrenzung der Flexibilität ist, dass nach jedem Umschlagsvorgang eine gewisse Anlieferreihenfolge für das Material festgelegt ist. Später notwendige Veränderungen dieser Reihenfolge können nur durch zusätzlichen Aufwand erreicht werden. Weiterhin wird heutzutage häufig auf die Verwendung einer Anlieferungsform je Montagestation geachtet. Für die Automobilmontage der Zukunft wird es voraussichtlich nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll sein, nur auf eine bestimmte Anlieferungsform je Station zu setzen. In der Projektgruppe wurden in Brainstorming-Sitzungen wesentliche Kriterien ermittelt, die in den neuen Logistikkonzepten enthalten sein sollen. Die neuen Konzepte sollten jeweils eine Ausprägung der Kriterien aufweisen, damit keine sinnvolle Möglichkeit unbeachtet bleibt. Das Ergebnis der Arbeit waren fünf Grundkonzepte für die Materialbereitstellung (Konzept 1 bis 5), die sich über Detaillierungsstufen (z. B. a bis e bei Konzept 3) auf zehn Detailkonzepte auffächern, siehe Abbildung 3.6. Gemeinsam ist allen zehn Grundkonzepten, dass sie jeweils Lösungsansätze für die fünf Herausforderungen der Automobilhersteller lie-

⁵⁵³ Dies waren die Werke des Herstellers Mercedes-Benz in Raststatt und Sindelfingen und des Herstellers Audi in Neckarsulm.

⁵⁵⁴ Diese Umschlagsvorgänge finden sowohl bei den Logistikdienstleistern oder den zum Werk vorgeschalteten Lagern als auch bei der Vereinzelung der Ladungsträger im Werk und der Umverteilung sowie Sequenzierung statt.

fern. Beim 1. Konzept findet die Montage direkt vor den Ausgabepunkten des HRL bzw. des AKL statt, deshalb sind keine FTF für den Transport der Materialien zum Verbauort notwendig. Beim 2. Konzept werden, die aus dem AKL bzw. HRL ausgelagerten Ladungsträger mit den Bauteilen per FTF zum Verbauort transportiert. Das 3. Konzept verfügt über einen zentralen Umschlagpunkt für Paletten und die Kommissionierung in Standardladungsträger. Es teilt sich in die Detailkonzepte a, b, c, d und e auf. Beim Konzept 3a werden im zentralen Umschlagpunkt direkt Versorgungsriegel befüllt, die im Werk dann direkt zum Verbauort transportiert werden. Im Konzept 3b findet sich im Prozess nachfolgend zum zentralen Umschlagpunkt ein HRL bzw. AKL dezentral am Hallenrand, von dem FTF die Ladungsträger zum Verbauort transportieren. Das Konzept 3b ähnelt dem Konzept 3a. Der wesentliche Unterschied ist jedoch, dass anstatt des automatischen Lagers ein manuelles Lager dezentral am Hallenrand zum Einsatz kommt. Beim Konzept 3d wird das automatische Lager (entweder HRL oder AKL) zentral im Werk aufgebaut und die FTF übernehmen den Transport von dort zum Verbauort. Aufgrund der zentralen Lage des Lagers treten bei diesem Konzept längeren FTF-Fahrwege auf. Das Konzept 3e nutzt keine FTF zum Transport der Ladungsträger, da die zu montierenden Fahrzeug direkt vor dem dezentralen, automatischen Lager vorbeifahren. Bei den Konzepten 4 a und 4b wird auch wieder ein zentraler Umschlagpunkt verwendet. Von diesem zentralen Umschlagpunkt starten, beim Konzept 4a, die FTF mit bestückten Warenkörben direkt zu den Verbauorten. Beim Konzept 4b ist noch ein automatisches Lager, dezentral am Hallenrand, zwischengelagert aus dem heraus die Warenkörbe befüllt werden. Das mobile Lager beim 5. Konzept stellt eine Art automatisches Lager auf Rollen dar. Es verfügt über mehrere hundert Lagerplätze für KLT und kann über einen Antrieb oder durch Unterfahren eines FTF im Raum bewegt werden. Aufgrund der Abmessungen ist ein Verfahren nur innerhalb der Pausenzeiten der Produktion sinnvoll.

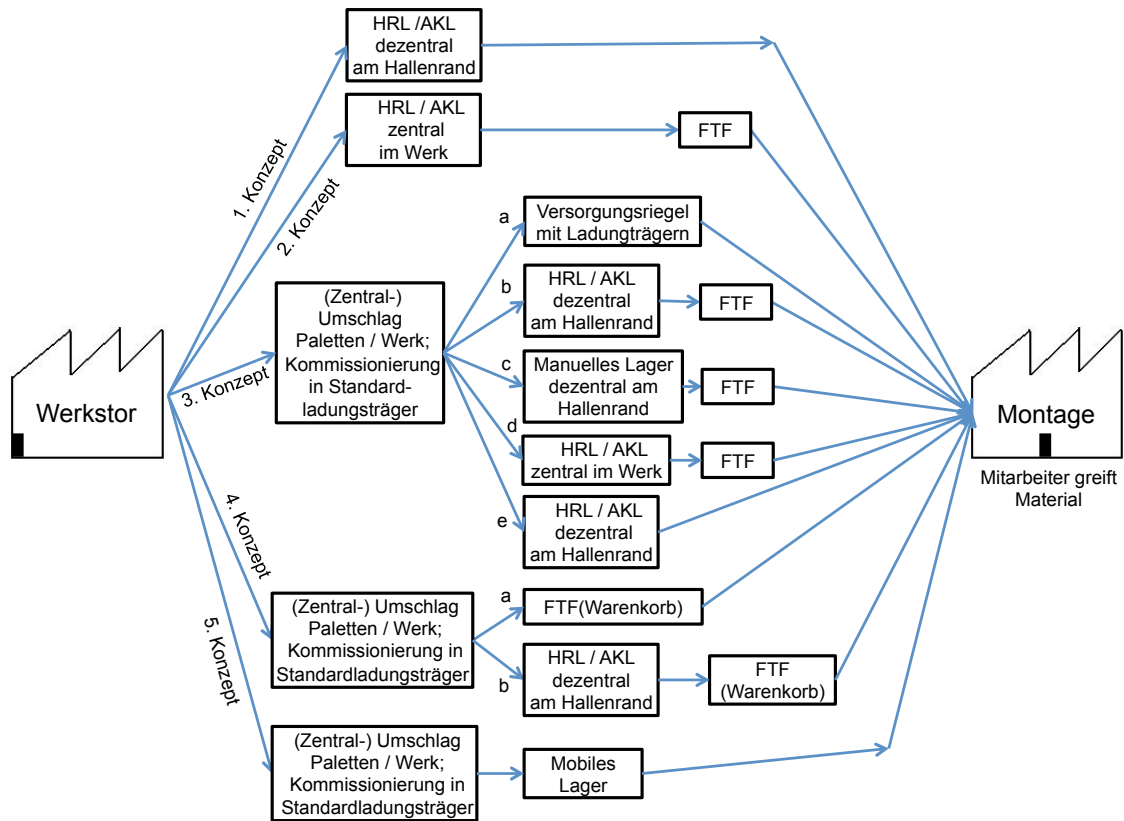


Abbildung 3.6: Zehn Grundkonzepte für die Materialbereitstellung

Mithilfe von Bewertungsmethoden werden diese zehn Grundkonzepte für eine neuartige, wandlungsfähige Logistik im folgenden bewertet, um eine Rangliste bilden zu können.

3.6 Konzeptbewertung

Zur Bewertung der zehn Konzepte werden diese hinsichtlich der Betriebs- und Umsetzungsfähigkeit sowie in Bezug auf die Wandlungsbefähiger, zur Erläuterung siehe Kapitel 2.2.2, beurteilt. Die Bewertung der Betriebs- und Umsetzungskriterien der einzelnen Konzepte erfolgt durch eine Nutzwertanalyse⁵⁵⁵. Aufgrund der komplexen Gegenüberstellung mit der vorhandenen Menge an Handlungsalternativen und einer daraus resultierenden großen Anzahl an relevanten Bewertungskriterien, bietet sich für diesen Fall eine Nutzwertanalyse an.⁵⁵⁶ Im Anschluss an die Nutzwertanalyse erfolgt zusätzlich eine Bewertung in Bezug auf die Wandlungsbefähiger der neuartigen Konzepte anhand von Fragen zu Wandlungsbefähigern. Wiederum danach werden die bestbewerteten Konzepte simuliert. Die Nutzwertanalyse und Bewertung in Bezug auf die Wandlungsbefähiger wurden durchgeführt, um die erfolgsver-

⁵⁵⁵ Die Nutzwertanalyse kann auch als Scoringmodell bezeichnet werden. (Vgl. Vahs und Burmester (2005), S. 205 und Benkenstein (2001), S. 311).

⁵⁵⁶ Vgl. Feldhusen u. a. (2013), S. 390.

sprechendsten Konzepte auszuwählen und dabei die Anzahl der geeigneten Konzepte zu reduzieren und somit den Aufwand für die Erstellung von unterschiedlichen Simulationen für die neuartigen Logistikkonzepte in sinnvollen Grenzen zu halten.

3.6.1 Nutzwertanalyse

Als Grundlage für die Ermittlung von Bewertungskriterien für die Nutzwertanalyse dienten Experteninterviews, die in mehreren Treffen der Logistikarbeitsgruppe in ARENA2036 durchgeführt wurden. Es wurde darauf geachtet, dass die Kriterien untereinander unabhängig sind, um eine Mehrfachbewertung einzelner Punkte auszuschließen. Außerdem ist es bedeutsam, dass die Bewertungskriterien quantifizierbar erfassbar sind. Insgesamt wurden 22 Kriterien, siehe Tabelle 1 aufgestellt, wobei sich diese unter anderem mit der Fahrlänge und Dimension des FTF, mit dem Bestand, den Betriebsmitteln sowie der Variabilität der Systeme befassen. Einige dieser Kriterien werden so auch in der Literatur für die Analyse von Bereitstellungsstrategien vorgeschlagen.⁵⁵⁷

Durchführung der Nutzwertanalyse der Betriebs- und Umsetzungskriterien

Für die Nutzwertanalyse der zehn erarbeiteten Konzepte werden diese nach jedem der 22 Kriterien bewertet. Die Bewertung erfolgt dabei nach dem Schulnotensystem von 1 bis 6, wobei eine 1 als optimale Lösung und eine 6 als schlechteste Lösung bezeichnet wird. Die Vergabe der Bewertungen erfolgte im Logistikarbeitskreis in ARENA2036 wobei jeder Teilnehmer eigene Noten vergeben hat, die später zu einer ganzzahligen Gesamtnote aggregiert wurden. Diese Gesamtnoten sind in der Tabelle 1 für die jeweiligen Fragen und Konzepte angegeben. Die Tabelle 1 zeigt die Bewertung der Konzepte für alle aufgestellten Kriterien. Die einzelnen Kriterien sind im Anhang A.3 jeweils detailliert aufgeführt. Zur Ermittlung des besten Konzepts wurden die Bewertungsnoten aller Kriterien für jedes Konzept aufaddiert. Die Summen finden sich in der letzten Zeile der Tabelle. Basierend auf der Zahl der unterschiedlichen Kriterien sowie der jeweils gleichen relativen Wichtigkeit der einzelnen Punkte für die Auswahl eines Logistikkonzepts findet keine besondere Gewichtung von einzelnen Bewertungskriterien statt. Das Konzept mit der niedrigsten Gesamtnote ist das beste Konzept im Hinblick auf die Betriebs- und Umsetzungsfähigkeit.

⁵⁵⁷ Vgl. Nyhuis u. a. (2012), S. 291 nach Vgl. Grünz (2004), S. 40.

Tabelle 1: Nutzwertanalyse der neuartigen Logistikkonzepte, entstanden in der Logistkarbeitsgruppe in ARENA2036 (detaillierte Erläuterung im Anhang siehe A.3)

Konzepte:	1	2	3a	3b	3c	3d	3e	4a	4b	5
Kriterien:										
Montage- und Logistik-Groß-FTF Fahrweg-Länge	6	1	1	1	1	1	6	1	1	3
Logistik-FTF Fahrweg-Länge	3	3	2	3	3	6	3	6	6	2
Logistik-FTF Fahrweg-Dimension	1	2	4	2	2	1	1	2	2	6
Flächenbedarf in der Montagehalle	1	4	3	4	3	5	5	1	3	6
Anzahl Handlungsschritte/ Umschlagsvorgänge	1	4	4	4	4	4	3	4	3	3
Leichtigkeit Resequenzierung	1	4	1	1	4	4	3	4	3	2
Bestandsmenge im Werk	4	4	3	3	3	4	4	2	3	3
Bestandsmenge in der Lieferkette	3	3	3	1	3	4	5	5	2	2
Brownfield Umsetzbarkeit	4	6	3	4	2	6	3	5	2	5
Planungsaufwand Greenfield	3	1	3	3	3	2	4	3	4	6
Anzahl benötigter Betriebsmittel	2	4	3	1	3	4	3	4	3	2
Anschaffungskosten für Betriebsmittel	1	4	3	1	3	2	4	5	5	3
Anschaffungskosten für Lager (Installation)	6	4	2	4	1	5	2	3	3	3
Variable Kosten für Lager	2	2	1	4	5	4	4	3	3	3
Flächenbedarf für Lager im Werk	5	4	4	5	3	4	5	1	2	5
Ausfallwahrscheinlichkeit	3	3	2	2	1	3	2	5	5	2
Ausfallfolge	6	3	4	4	2	3	2	4	4	4
Wechsel von Automatisierung auf manuellen Betrieb (und zurück) möglich?	5	4	4	3	6	3	3	4	4	2
Grundsätzliche Auswirkung Stückzahländerung (Produktionsmenge)	4	4	2	3	4	3	5	3	2	2
Verwendung bei hoher Stückzahlvarianz	2	1	2	1	4	1	2	3	2	5
Eignung Änderung Variantenmix	5	2	2	2	3	3	2	1	1	5
Eignung Model-Mix	5	3	3	4	3	5	2	1	1	5
Summe	73	70	59	60	66	77	73	70	64	79

Ergebnisse der Nutzwertanalyse

Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse sind jeweils unter den Konzepten in Tabelle 1 angegeben. Die niedrigsten und damit besten Ergebnisse werden mit Logistikkonzept 3a (insgesamt 59 Punkte), gefolgt von Konzept 3b (60 Punkte) und Konzept 4b (64 Punkte) erreicht. Die Konzepte mit den besten Ergebnissen wurden ausgewählt, da kleine Noten als Antwort auf die Fragen der Nutzwertanalyse die optimalsten und am leichtesten umzusetzenden Lösungen darstellen. Zusammenfassend kann im Rahmen der Auswertung festgestellt werden,

dass die Konzepte 3a, 3b und 4b die besten Ergebnisse (niedrigsten Werte) bei der Nutzwertanalyse erzielt haben. Aus Gründen der Vereinfachung wurden den drei Konzepten an dieser Stelle sinnvolle Namen zugeordnet, siehe Tabelle 2. Das Konzept 3a wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Riegelkonzept bezeichnet, das Konzept 3b als Einzel-FTF-Konzept und das Konzept 4b als Warenkorb-Konzept.

Tabelle 2: Bezeichnungen der drei bestbewerteten, neuartigen Logistikkonzepte

Konzept	Bezeichnung
3a	Riegelkonzept
3b	Einzel-FTF-Konzept
4b	Warenkorb-Konzept

3.6.2 Bewertung in Bezug auf die Wandlungsbefähiger

Zusätzlich zur Nutzwertanalyse wurden die neuartigen Konzepte in Bezug auf die Erfüllung der Wandlungsbefähiger untersucht. Die Idee für diesen Schritt lag darin begründet, dass kein Konzept aus der Nutzwertanalyse für die Erstellung von Simulationen ausgewählt werden sollte, ohne dass dieses Konzept auch eine gute bis sehr gute Erfüllung der Wandlungsbefähiger ermöglicht.

Dazu wurden die fünf, in Kapitel 2.2.3 beschriebenen, Wandlungsbefähiger verwendet, die alle in gleichem Maße für die Konzeptauswahl relevant sind:

- Modularität
- Universalität
- Mobilität
- Kompatibilität
- Skalierbarkeit

Aufstellen der Fragen

Damit eine Aussage für jedes Logistikkonzept zu den einzelnen Wandlungsbefähigern möglich ist, wurde eine Auswahl von Fragen erarbeitet, die direkten Einfluss auf einen oder mehrere Wandlungsbefähiger haben. Der betreffende Wandlungsbefähiger ist jeweils hinter den Fragen, siehe Seite 83 angegeben. Diese Fragen wurden anschließend beantwortet, wodurch eine Bewertung der Logistikkonzepte in Bezug auf die Wandlungsbefähiger möglich war. Das Aufstellen der Fragen erfolgte im Logistikkreis in ARENA2036. Die Fragen zu den Wandlungsbefähigern sind auf das sich hier ergebende Problem der flexiblen Materialbe-

reitstellung an Montagestationen angepasst und untereinander ausreichend unabhängig.⁵⁵⁸ Nachfolgend werden zunächst alle ermittelten Fragen aufgezeigt.

- Frage 1: Können die logistischen Betriebsmittel kurzfristig zu einem anderen Aufbau zusammengeschlossen werden? (Diese Frage zielt auf den folgenden Wandlungsbefähiger: Modularität)
- Frage 2: Kann mit dem jeweiligen Logistikkonzept innerhalb von einer Taktzeit eine Resequenzierung für die nächsten zu montierenden Fahrzeuge umgesetzt werden? (Diese Frage zielt auf den folgenden Wandlungsbefähiger: Universalität)
- Frage 3: Kann mit dem jeweiligen Logistikkonzept innerhalb von drei Taktzeiten eine Resequenzierung für die nächsten zu montierenden Fahrzeuge umgesetzt werden? (Diese Frage zielt auf den folgenden Wandlungsbefähiger: Universalität)
- Frage 4: Kann das jeweilige Logistikkonzept aufgrund seiner Ausgestaltung und der damit verbundenen Geschwindigkeit der Materialbereitstellung mit geringen Beständen (für wenige Stunden) betrieben werden? (Diese Frage zielt auf den folgenden Wandlungsbefähiger: Mobilität⁵⁵⁹)
- Frage 5: Sind die logistischen Betriebsmittel derart mobil, dass kurzfristig (innerhalb von wenigen Stunden) ein anderes Layout in der Werkshalle realisierbar ist? (Diese Frage zielt auf den folgenden Wandlungsbefähiger: Mobilität)
- Frage 6: Kann das jeweilige Logistikkonzept von der Materialbereitstellung für eine Station zur Materialbereitstellung für eine andere Station mit anderen Materialbedarfen umgebaut und angeschlossen werden? (Diese Frage zielt auf die folgenden Wandlungsbefähiger: Kompatibilität)
- Frage 7: Kann mit dem jeweiligen Logistikkonzept eine Steigerung oder eine Reduzierung des Produktionsvolumens um 30 % kurzfristig (innerhalb von wenigen Tagen) umgesetzt werden? (Diese Frage zielt auf den folgenden Wandlungsbefähiger: Skalierbarkeit)

Beantwortung der Fragen

Zur Ermittlung der jeweiligen Antworten für die Fragen zu den Wandlungsbefähigern erfolgte im Rahmen von gemeinsamen Diskussionen im Logistikkreis in ARENA2036. Dabei erfolgte die Beurteilung der Fragen binär mit 0 oder 1, da die Fragen für das jeweilige Logistikkonzept entweder zu bejahen (1) oder zu verneinen (0) sind. Damit eine Vergleichbarkeit

⁵⁵⁸ Ausreichend unabhängig bedeutet hierbei, dass die Fragen sich nicht wesentlich gegenseitig beeinflussen.

⁵⁵⁹ Da durch geringere Bestände kurzfristige räumliche Veränderungen des Logistikkonzepts möglich sind, da keine großen Lagern verschoben werden müssen.

aller Kriterien gegeben ist, wurden die Fragen 1, 5, 6 und 7 jeweils doppelt gewichtet. Folglich sind als maximales Ergebnis 14 Bewertungspunkte möglich. Frage 1 und Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3 für jedes Konzept angegeben.

Tabelle 3: Bewertung der neuartigen Logistikkonzepte in Bezug auf die Wandlungsbefähiger

Konzepte:	1	2	3a	3b	3c	3d	3e	4a	4b	5
Frage 1 zu Modularität (*2)	0	2	2	2	2	2	0	2	2	0
Frage 2 zu Universalität	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Frage 3 zu Universalität	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
Frage 4 zu Mobilität	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1
Frage 5 zu Mobilität	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Frage 6 zu Kompatibilität (*2)	2	2	2	2	2	2	2	0	2	0
Frage 7 zu Skalierbarkeit (*2)	0	2	2	2	2	2	0	2	2	0
Summen	3	7	10	9	8	7	3	5	9	4

Ergebnisse der Fragen in Bezug auf die Wandlungsbefähiger

Die Ergebnisse der Analyse in Bezug auf die Wandlungsbefähiger sind jeweils unter den Logistikkonzepten in Tabelle 3 dargestellt. Die höchsten und damit besten Werte erreichen die Konzepte 3a (7 Punkte), 3b (6 Punkte) und 4b (6 Punkte). Da als Ergebnis der Nutzwertanalyse ebenso die Logistikkonzepte 3a, 3b und 4b mit den besten Ergebnissen bewertet wurden, wird an dieser Auswahl festgehalten.

3.6.3 Fazit der Nutzwertanalyse und Bewertung in Bezug auf die Wandlungsbefähiger

Anhand der Ergebnisse der Nutzwertanalyse haben drei Logistikkonzepte (3a, 3b und 4b) die besten Ergebnisse erreicht. Je höher die Ergebnisse, desto mehr werden vom jeweiligen Konzept die Wandlungsbefähiger erfüllt, was positiven Einfluß auf die Wandlungsfähigkeit des Konzepts hat. Die gleichen drei Konzepte haben auch bei der Bewertung in Bezug auf die Wandlungsbefähiger die besten Ergebnisse erzielt. Deshalb werden Sie für die weitere Betrachtung und folgende Simulation in dieser Arbeit ausgewählt. Zusätzlich wurden den drei ausgewählten Konzepten in diesem Kapitel passende Bezeichnungen hinzugefügt: 3a: Riegelkonzept, 3b: Einzel-FTF-Konzept und 4b: Warenkorb-Konzept.

3.7 Detaillierte Vorstellung der ausgewählten, neuartigen Konzepte

In diesem Kapitel werden die drei neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept), die anhand der Bewertung in der Nutzwertanalyse und den Fragen in Bezug auf die Wandlungsbefähiger mit den höchsten Werten abgeschlossen haben, umfangreich vorgestellt. Diese Konzepte wurden im Anschluss an die Nutzwertanalyse und

Bewertung der Wandlungsbefähiger im Rahmen dieser Arbeit umfangreich weiterentwickelt, um die notwendigen Bedingungen für eine Umsetzung, sowohl in der Realität als auch in den nachfolgenden Simulationen, festzulegen. Dabei wurde auch auf die, für eine Umsetzung notwendigen, Betriebsmittel eingegangen. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Beschreibung der drei neuartigen Logistikkonzepte und zugehörigen Betriebsmittel sowie anschließend, im Kapitel 4, auf die Simulation der Konzepte. Die konstruktive Ausgestaltung der notwendigen Betriebsmittel und der Prototypenbau ebendieser Betriebsmittel⁵⁶⁰ ist nicht Teil dieser Arbeit.

3.7.1 Riegelkonzept

Das erste Konzept wird mit dem Begriff Riegelkonzept bezeichnet.⁵⁶¹ Dieses Konzept wurde, aufgrund seiner vollständigen Neuheit, im Jahr 2015 als Patent angemeldet.⁵⁶² Es besteht grundsätzlich aus beweglichen Regaleinheiten, bezeichnet als Riegelgestelle, kurz Riegel, und einer automatischen Kommissioniereinheit, bezeichnet als Mini-RBG, siehe dazu Abbildung 3.7. Das Mini-RBG ist direkt am Bereitstellungspunkt der Montagestation positioniert. Der Ablauf bei der Materialbereitstellung gestaltet sich folgendermaßen:

Die Riegelgestelle werden nach ihrer Beladung im Wareneingang mit einem neuartigen Unterfahr-FTF, siehe Kapitel 3.8, zum Verbauort transportiert. Hierzu stehen die Riegel auf selbstbremsenden Rollen. Nach aktuellem Stand der Planung beliefern zwei Riegelgestelle eine Montagestation. Nachdem das Riegelgestell an der zugeordneten Montagestation angekommen ist, erfolgt die Auslagerung der KLT vollautomatisch mithilfe des Mini-RBG. Dabei wird jeweils nur der passende KLT mit dem gerade benötigten Montagematerial aus dem Riegel entnommen und dem Montagemitarbeiter in einer ergonomisch sinnvollen Höhe bereitgestellt. Dadurch übernimmt das Mini-RBG die Sequenzierung des Montagematerials direkt am Verbauort, indem das passende Material in seinem Behälter, vorgesehen sind hierbei KLT, aus dem jeweiligen Riegelgestell entnommen und dem Werker angeboten wird. Nun greift der Mitarbeiter lediglich das Material aus dem KLT und bestätigt seine Entnahme durch Knopfdruck an der Auslagerungseinheit des Mini-RBG.⁵⁶³ Das Mini-RBG sortiert den nun leeren KLT dann wieder in eines der zwei bereitstehenden Riegelgestelle zurück. In dem Moment, in dem alle oder ein großer Teil der Ladungsträger im Riegelgestell keinen Inhalt mehr haben, wird das Riegelgestell vom Unterfahr-FTF zurück zum Wareneingang geschleppt. Dort angekommen, werden über einen Roboter alle leeren KLT aus dem Riegelgestell entnommen und zu den Zulieferern zurücktransportiert. Anschließend steht das Riegelgestell für die nächste Befüllung mit KLT bereit.

⁵⁶⁰ Dieser Betriebsmittelbau erfolgt ebenfalls am IFT.

⁵⁶¹ Vgl. Wehking und Popp (2015b), S. 398.

⁵⁶² Aktenzeichen des Patents beim DPMA: DE102015013585A1.

⁵⁶³ Die KLT können entweder sortenrein mit mehreren Bauteilen oder aber nur mit genau einem, hochvarianten Bauteil bestückt sein. Bei sortenreiner Befüllung muss im Warehousemanagementsystem (WMS) lediglich hinterlegt sein, dass der Montagemitarbeiter den KLT vom Mini-RBG so lange wiederholt angeboten bekommt, bis alle Teile aus dem Behälter entnommen wurden.

Besonders zu beachten ist, dass dem Mini-RBG die Detailinformationen über die Einlagerreihenfolge und dadurch Informationen über die Lagerplätze der KLT im jeweiligen Riegelgestell über eine Datenverbindung zum WMS vorliegen. Dadurch sind, im Gegensatz zu heutigen KLT-Konzepten in den Automobilwerken, keine besonderen, visuellen Beschriftungen der einzelnen KLT notwendig. Das Mini-RBG findet den passenden KLT in den Riegelgestellen direkt anhand der Einlagerinformationen im WMS und bietet dem Montagemitarbeiter jeweils nur einen KLT, den laut Materialbedarf passenden, an. Deshalb müssen bei Verwendung des Riegelkonzepts am Verbauort keine aufwändigen optischen Signalanlagen installiert werden, die dem Montagemitarbeiter den gerade zu greifenden Behälter oder das jeweilige Teil visuell hervorheben⁵⁶⁴. Dies ist wichtig, denn trotz Installation dieser technischen Hilfsmittel, kommt es, wie in Kapitel 2.4.5 beschrieben, noch zu Falschabgriffen oder Verwechslungen durch die Mitarbeiter. Dieses Fehlerpotenzial ist beim Riegelkonzept erheblich reduziert, da die Bestimmung des passenden Behälters vom System vorgenommen wird.

Besonders ist beim Riegelkonzept, dass die Sequenzierung zeitlich gesehen relativ spät im Verlauf der Materialbereitstellung stattfindet. Dies bringt eine erhebliche Verbesserung der Flexibilität für die Logistik und dadurch folgend auch für die Produktionsflexibilität mit sich, da bis kurz vor der Auslagerung des betreffenden KLT aus einem Riegelgestell Re-sequenzierungen und damit Änderungen in der Produktionsreihenfolge möglich sind. Aus diesem Grund wird die Materialbereitstellung mit Verwendung des Riegelkonzepts als Just-in-real-time (JIRT)⁵⁶⁵ bezeichnet. Denn im Gegensatz zu JIS und JIT wird die Entnahme des passenden Ladungsträgers (KLT) mit sehr kurzer Vorlaufzeit direkt für das gerade zu bestückende Fahrzeug durchgeführt.

Durch die Bereitstellung von Montageteilen in zwei Riegeln werden, nach aktuellem Planungsstand und je nach Ladungsträgergröße, zwischen 80 großen (Grundmaß 600 x 400 mm) und 320 kleinen KLT (Grundmaß 300 x 200 mm, durch Verwendung von Tablaren für die Auflage) zur direkten Auslagerung am Montageort bereitgehalten. Das Bereithalten dieser großen Zahl an KLT bietet die Möglichkeit, flexibel auf Änderungen in der Produktion zu reagieren. Dadurch werden Veränderungen in der Verbaureihenfolge der Fahrzeuge aus logistischer Sicht handhabbar.⁵⁶⁶

⁵⁶⁴ Bei Pick-by-Beamer-Anlagen wird durch Spotlampen ein Lichtkegel auf den passenden Ladungsträger oder Regalplatz projiziert. Der Mitarbeiter erkennt dementsprechend, dass er aus diesem KLT Material entnehmen muss. (Vgl. materialfluss.de (2016)).

⁵⁶⁵ Vgl. Wehking und Popp (2015a), S. 339.

⁵⁶⁶ Beispielsweise verbleibt ein nicht benötigtes Montageteil bei Änderung der Perlenkette so lange im Riegelgestell, bis es für das nächste Fahrzeug benötigt wird. Für die dazwischen gefertigten Fahrzeuge lagert das Mini-RBG ein anderes, passendes Montageteil mit dessen Behälter aus dem Riegelgestell aus.

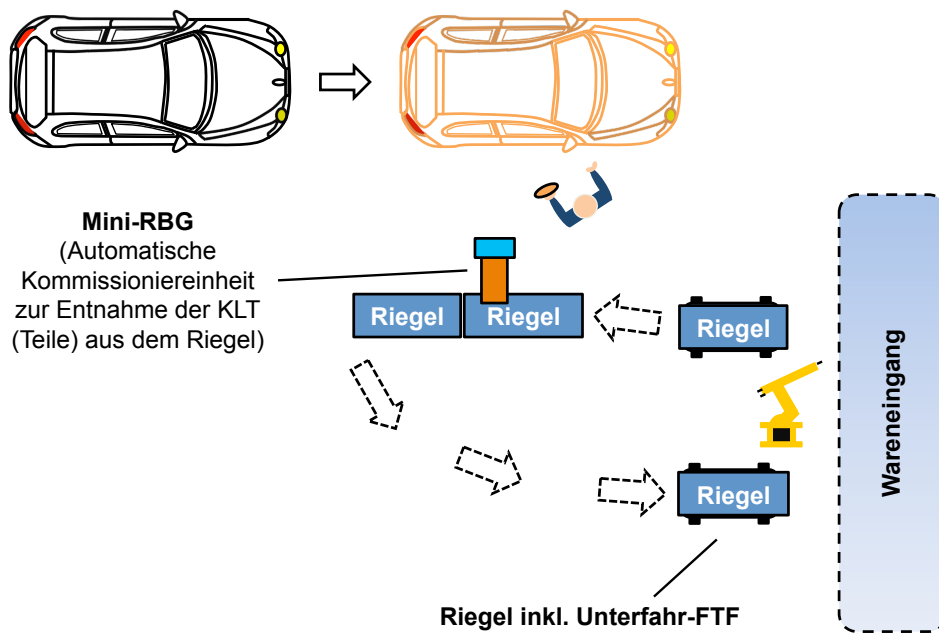


Abbildung 3.7: Riegelkonzept (eigene Darstellung)

Wie in Abbildung 3.8 erkennbar, soll ein Riegelgestell bzw. Riegel folglich mit einer bestimmten Anzahl von Artikeln, beispielsweise mehrere Stundenscheiben der Produktion, bestückt werden. Am Beispiel der Außenspiegel bedeutet dies folglich, dass in Riegel 1 und Riegel 2 eine große Zahl von Varianten an Außenspiegeln⁵⁶⁷ dargestellt durch unterschiedliche Farben in der Abbildung, für die Fahrzeuge eingelagert sind, die in den nächsten drei Stunden produziert werden sollen. Etwas abgewandelt zeigt sich die Situation am Beispiel einer Endmontage, bei der mehrere Fahrzeugmodelle auf einer Linie montiert werden. Hier würde der Riegel 1 mit Bauteilen für das Fahrzeugmodell A und der Riegel 2 mit Teilen für das Fahrzeugmodell B beladen sein. Das Mini-RBG in Abbildung 3.8 lagert für das weiße Fahrzeug zum richtigen Zeitpunkt den passenden, weißen Außenspiegel aus. Weiterhin fährt das Unterfahr-FTS den Riegel 1, sobald der festgelegte Leerstand (z. B. 85 %) erreicht wurde, zurück zum Wareneingang. Dort wird der Riegel, wie oben beschrieben, wieder mit gefüllten KLT beladen. Die noch gefüllten 15 % der KLT können, je nach Situation, entweder im Riegel verbleiben oder ausgelagert werden. Diese Entscheidung ist davon abhängig, ob die Montageteile der KLT im Laufe der nächsten Stunden in der Montage benötigt werden oder nicht. Wurde beispielsweise ein Fahrzeug in der Montage beschädigt oder aus anderen Gründen (beispielsweise fehlende Montageteile) nach einem Prozessmodul x ausgeschleust, so werden die Montageteile für die nachfolgenden Prozessmodule dieses Fahrzeugs (x + 1, ...) erst benötigt, wenn die Nacharbeit des Fahrzeugs beendet wurde. Das Riegelkonzept eig-

⁵⁶⁷ Die Varianten könnten sowohl Farbvarianten als auch Modellvarianten, beispielsweise Außenspiegel mit zusätzlichen Seitenkameras, sein.

net sich besonders für die Materialbereitstellung an einzelnen Montagestationen mit hohen Variantenzahlen.

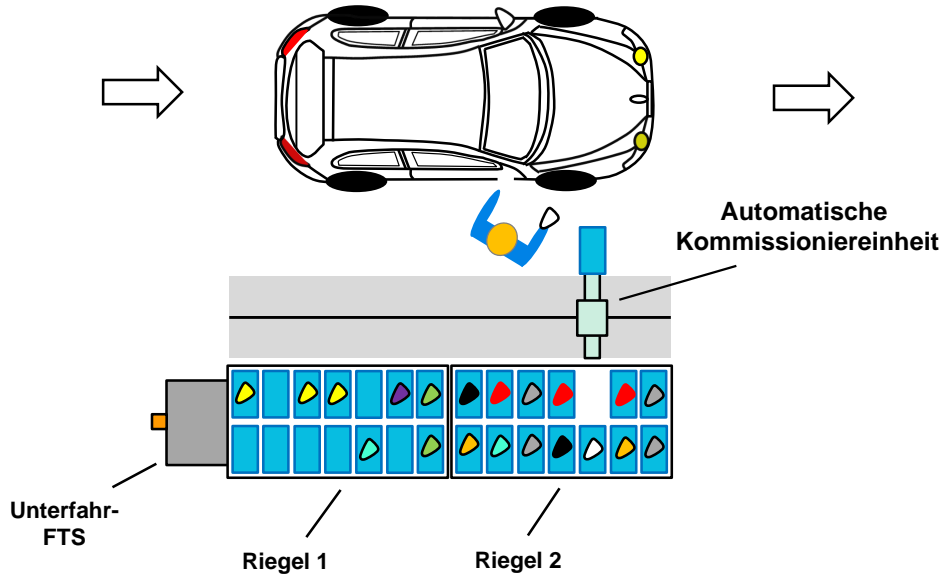


Abbildung 3.8: Detailansicht Riegelkonzept (eigene Darstellung)

3.7.2 Einzel-FTF-Konzept

Das zweite Konzept wird als Einzel-FTF-Konzept oder auch Mini-FTF-Konzept bezeichnet.⁵⁶⁸ Durch die Verwendung von FTF kleinerer Größe und geringen Funktionsumfangs und somit niedrigen Preises,⁵⁶⁹ werden einzelne Ladungsträger, speziell KLT, vom Wareneingang oder von einem AKL aus direkt zum Verbauort transportiert, siehe Abbildung 3.9. Dieses Logistikkonzept eignet sich besonders für Teileumfänge mit geringer Verbauquote (beispielsweise länderspezifische Zusatzausstattungen) oder für die Durchführung von Springer-Transporten, aber auch für die Bereitstellung von großvolumigen Umfängen (z. B. Motoren oder Batterien). Die Auslagerung der KLT aus dem Lager und Verladung auf das Einzel-FTF kann sowohl automatisiert als auch manuell erfolgen. Die Einzel-FTF fahren direkt nach der Beladung einzeln und auf frei geplanten Routen, dank leitlinienloser Navigation, zur vorgesehenen Montagestation. Angekommen an der Station erfolgt die Bereitstellung des Montagematerials im Ladungsträger oder KLT auf einer ergonomisch sinnvollen Höhe, beispielsweise unter Verwendung von verstellbaren Aufbauten auf den Einzel-FTF. Die erfolgreiche Materialentnahme aus dem Ladungsträger bestätigt der Werker beispielsweise per Druckknopf am FTF. Anschließend macht sich das FTF mit dem leeren KLT oder Ladungsträger auf den Weg zurück zum Wareneingang. Dort wird der leere KLT oder Ladungsträger vom FTF abgelad-

⁵⁶⁸ Vgl. Wehking und Popp (2015b), S. 399.

⁵⁶⁹ Beispielshaft könnten dies die in Kapitel 3.4 vorgestellten Systeme KaTe und Doppelkufen sein

den und dem Rückführungskreislauf in Richtung Zulieferer zugeführt. Das Einzel-FTF ist anschließend bereit, den nächsten Transportauftrag zu übernehmen. Sowohl die Navigation der einzelnen FTF als auch deren Abstimmung untereinander (beispielsweise in Bezug auf Kollisionsvermeidung oder die Übernahme von Transportaufträgen) soll dezentral in jedem FTF erfolgen. Hierdurch sollen, je nach Produktionsprogramm, ohne großen Aufwand zusätzliche FTF in die Produktionsumgebung eingesetzt oder überschüssige FTF herausgenommen werden können. Das Einzel-FTF-Konzept eignet sich besonders für die Materialbereitstellung an Montagestationen mit geringer Verbaquote beispielsweise für Auslandsfahrzeuge.

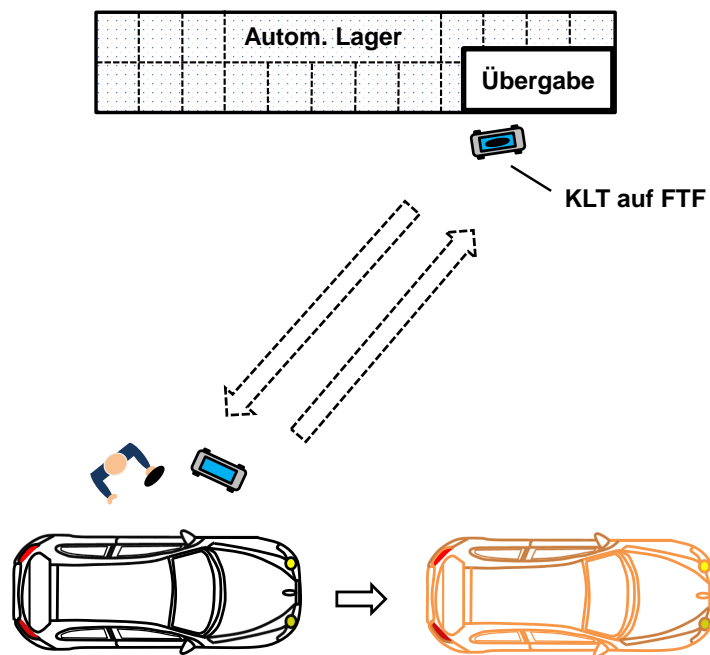


Abbildung 3.9: Einzel-FTF-Konzept (eigene Darstellung)

3.7.3 Warenkorb-Konzept

Das dritte Konzept trägt den Namen Warenkorb-Konzept.⁵⁷⁰ Dieses Konzept, welches in der vorliegenden Arbeit und in Diskussionen des Logistkarbeitskreises in ARENA2036 neu entwickelt wurde, weicht in einem Punkt vom bisher bekannten Konzept der Materialbereitstellung per Warenkorb, siehe 2.4.5, ab. Dieser Unterschied ist, dass die Zusammenstellung des Warenkorbs nun vollautomatisch aus einem AKL heraus stattfindet, indem die Ladungsträger mit dem Material in der korrekten Reihenfolge aus dem AKL ausgelagert werden. Die kommissionierten Ladungsträger werden anschließend in der gebildeten Reihenfolge auf das Warenkorbgestell verladen.

⁵⁷⁰ Vgl. Wehking und Popp (2015b), S. 399 f.

Dementsprechend wird beim Warenkorb-Konzept für ein spezifisches Auto, dem zugewiesenen Fahrzeug, eine gewisse Menge an Bauteilen, meist zwischen 5 und 20 Stück, vor-kommissioniert und dann per FTF zur vorbestimmten Montagestation geliefert, siehe Ab-bildung 3.10. Ab dort läuft der Warenkorb eine vordefinierte Anzahl von Montagestationen parallel mit dem aufzubauenden Fahrzeug mit. Nachdem der Warenkorb an der ersten be-treffenden Montagestation angekommen ist, befindet dieser sich in näherer Umgebung, idea-lerweise in direkter Arm-Reichweite, des Montagemitarbeiters. Der Montagemitarbeiter ent-nimmt dann an der jeweiligen Station das passende Montageteil direkt aus dem Warenkorb und verbaut es am Fahrzeug. Anschließend folgt der Warenkorb dem zugewiesenen Fahr-zeug weiter. Das weitere Verfolgen wird entweder durch eine manuell schließbare Verbin-dung zum Montage- und Logistik-Groß-FTF (z. B. Einhängehaken oder Magnetverbindung) erreicht, oder der Warenkorb wird die gesamte Zeit über durch ein FTF verfahren. Grund-sätzlich muss die Montagestation, ab der ein bestimmter Warenkorb zum Einsatz kommt, nicht die erste Montagestation des Montageabschnitts sein. Möglicherweise wird ein erster Warenkorb beispielsweise ab der Station 4 (hier zur weiteren Erklärung als n bezeichnet) bis zur Station $n + 6$ mit dem Fahrzeug durchlaufen und ab Station $n + 7$ kommt ein zwei-ter Warenkorb zum Einsatz und begleitet das aufzubauende Fahrzeug von Station $n + 7$ bis Station $n + 16$. Nachdem der Montagearbeiter an der letzten zugewiesenen Station das Material aus dem Warenkorb entnommen hat, im Beispiel an Station $n + 6$ bzw. $n + 16$, trans-portiert das FTF den Warenkorb wieder zurück zum Lagerbereich. Dort werden die leeren Ladungsträger aus dem Warenkorbgestell entnommen, anschließend steht das Gestell für die nächste Beladung zur Verfügung. In Bezug auf Änderungen am Produktionsprogramm ist der Warenkorb flexibel, da er zusammen mit dem ausgeschleusten Fahrzeug aus dem Produktionsablauf herausgenommen und zwischengelagert werden kann. Ist das nachbear-beitete Fahrzeug bereit zur weiteren Montage, dann wird dieses zusammen mit seinem Wa-renkorb an der passenden Montagestation wieder eingeschleust. Das Warenkorb-Konzept eignet sich in besonderem Maße für die Materialbereitstellung an mehreren, nachfolgenden Montagestationen mit hoher Bauteilvarianz.

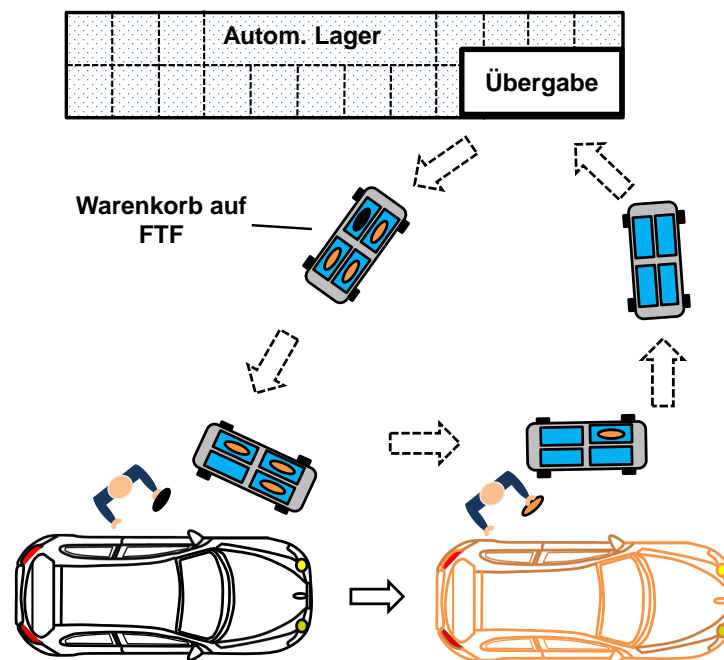


Abbildung 3.10: Warenkorb-Konzept (eigene Darstellung)

3.8 Innovative förder-, lager- und handhabungstechnische Maschinen für die neuartigen Logistikkonzepte

Damit die drei vorgestellten Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) in der Realität umgesetzt werden können, müssen bestimmte förder-, lager- und handhabungstechnische Maschinen entwickelt werden. Diese sollen hier vorgestellt werden. Grundsätzlich können Handhabungsmaschinen als „Einrichtungen, die Bewegungen analog des menschlichen Armes und der Hand manuell geführt, programmiert, programmierbar oder freiprogrammierbar ausführen“⁵⁷¹ definiert werden. Während im Kapitel 3.4 die beiden Systeme KaTe und Doppelkufen schon vorgestellt wurden, gehen die Überlegungen an dieser Stelle noch einen Schritt weiter. Ein universelles Unterfahr-FTF soll für alle drei Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) eingesetzt werden können. Zusätzlich kommen jeweils bestimmte Gestelle zum Einsatz. Dies liefert besondere Vorteile in Bezug auf die Wandlungsbefähiger Universalität und Kompatibilität. Grundsätzlich ist anzumerken, dass es sich beim Riegelkonzept durch das Mini-RBG um die weitreichendste Neuentwicklung (aus Sicht der logistischen Betriebsmittel) handelt.

⁵⁷¹ Hesse (1993), S. 183.

3.8.1 Mini-RBG und Riegelgestell

Die Funktionsbeschreibung für das Riegelkonzept in 3.7.1 lässt erkennen, dass für die Umsetzung des Konzepts drei neuartige Betriebsmittel benötigt werden. Erstens handelt es sich dabei um das Riegelgestell mit Fächern für KLT der Grundmaße 600 x 400 mm und 300 x 400 mm, zweitens um ein Unterfahr-FTF für den Transport der Riegelgestelle (sowie der Warenkorb- und Einzel-FTF-Gestelle bei den anderen Konzepten) und drittens ein Mini-RBG zur Aus- und Einlagerung der KLT. Im Zusammenspiel aller Komponenten kann dann eine automatische Kommissionierung und Bereitstellung der Produktionsmaterialien erfolgen. Für das Mini-RBG sind zwei Ausprägungsformen möglich:

Erstens die Realisierung des Mini-RBG auf einem FTF, hierbei sind die Komponenten in Abbildung 3.11 zu sehen. Zweitens die Umsetzung des Mini-RBG auf einer festen Schiene, die später vorgestellt wird. Für die erste Variante ist auf der linken Seite in Abbildung 3.11 das Mini-RBG auf einem FTF dargestellt. Das Riegelgestell ist auf der rechten Seite dargestellt, es wird gerade vom Unterfahr-FTS unterfahren. Das Unterfahr-FTS dient sowohl als Transporteinheit für die Riegelgestelle, als auch als Transporteinheit für Warenkorb- und Einzel-FTF-Gestelle, es wird nachfolgend in Kapitel 3.8.2 detailliert beschrieben. Da die Riegelgestelle immer nur vom Wareneingang oder Lagerbereich zur passenden Montagestation transportiert werden müssen, steht das Unterfahr-FTF in der Zwischenzeit für andere Transportaufgaben zur Verfügung. Die mehrfache Nutzung des Unterfahr-FTS bedeutet für die später zu erfolgende Wirtschaftlichkeitsrechnung günstigere Ergebnisse für das Riegelkonzept.

Das Auslagerungsgerät für den Riegel, das in Abbildung 3.11 als Mini-RBG auf der linken Seite auf einem FTF zu sehen ist, kann über einen ausfahrbaren Mast und dank seiner Verfahrfunktion jedes Lagerfach des Riegels erreichen. Gerade der Funktionsumfang des Mini-RBG ermöglicht beim Riegelkonzept besondere Einsparungen. Denn die Materialbereitstellung durch Anreichen eines Ladungsträgers an den Montagemitarbeiter bietet Sicherheit beim Falschabgriff und ermöglicht kurze Prozesszeiten und damit verbunden eine rasche Sequenzierung. Die Einsparungen ergeben sich, da für den Montagemitarbeiter kein KLT besonders hervorgehoben werden muss, beispielsweise durch Pick-by-Light oder die Anbringung von Etiketten.⁵⁷²

⁵⁷² Denkbar ist auch eine Ausstattung der KLT mit einem RFID-Tag, sofern sich am Auslagerarm des Mini-RBG ein RFID-Reader befindet, der automatisch über die ID-Nummer des Ladungsträgers dessen Inhalt im WMS bestimmen kann. Diese Überlegungen werden jedoch in anderen Arbeiten des IFT behandelt.

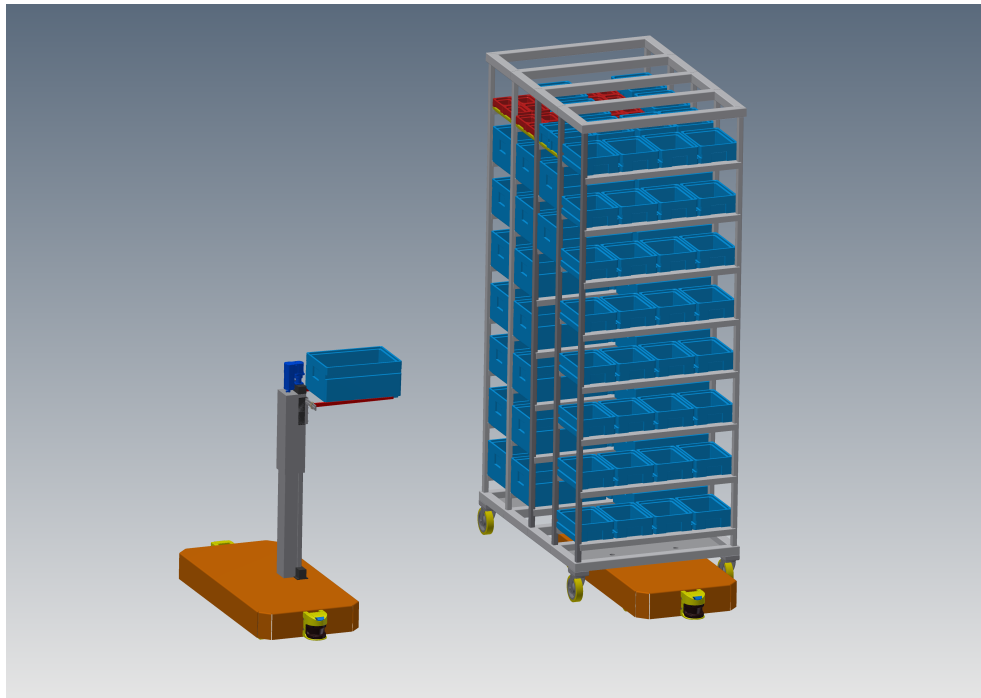


Abbildung 3.11: Mini-RBG auf FTF und Riegelgestell sowie Unterfahr-FTF (eigene Darstellung)

Bei der zweiten Umsetzungsvariante sind alle Komponenten bis auf das Mini-RBG identisch. Das Mini-RBG ist jedoch nicht auf einem FTF montiert, sondern läuft auf einem Miniatur-Schienensystem, siehe Abbildung 3.12. Dieses Schienensystem ist dank eines stabilen Rahmens und Aufnahmepunkten für Gabelzinken sehr mobil und kann beispielsweise kurzfristig per Handhubwagen⁵⁷³ von einer Montagestation zur nächsten bewegt werden. Dies ermöglicht kurzfristige Layoutänderungen in Montagebereichen.

⁵⁷³ Zur Beschreibung von Handhubwagen siehe Literaturhinweise in Kapitel 2.4.2.

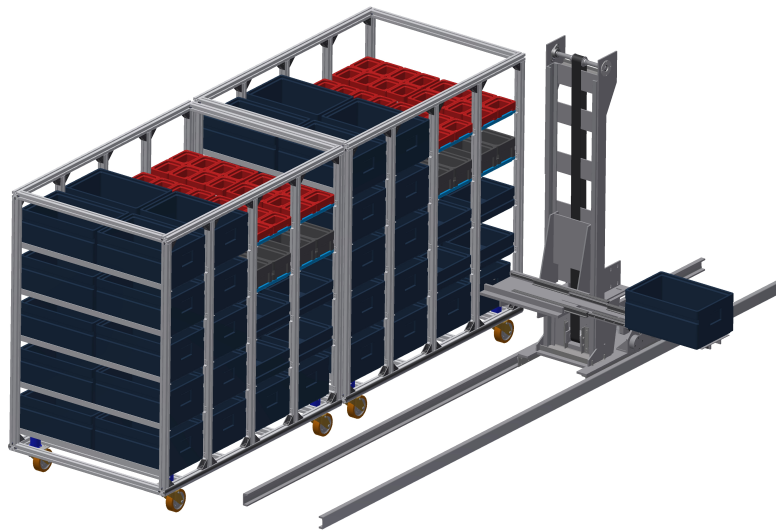


Abbildung 3.12: Zwei Riegelgestelle mit Mini-RBG auf Schienen (eigene Darstellung)

Das Riegelgestell in leerer Form ist in Abbildung 3.13 zu sehen. Für den am IFT entstandenen Prototyp wurde das Riegelgestell mit 5 Ebenen und Platz für 8 KLT je Ebene (bei doppeltiefer Lagerung) konstruiert und gebaut. Damit können in einem Riegelgestell insgesamt 40 KLT mit dem Grundmaß 600 x 400 mm oder 80 KLT mit dem Grundmaß 400 x 300 mm sowie unter Verwendung von Tablarern 160 KLT mit dem Grundmaß 200 x 300 mm transportiert werden. Bei einem Kalkulationsgewicht von 28 kg je KLT (maximales Gesamtgewicht bei der 600 x 400 mm KLT-Variante in beladenem Zustand) ergibt sich ein rechnerisches Beladegewicht des Riegels von 1.120 kg. Aufgrund dieses Gewichts muss das Riegelgestell im Betriebsumfeld gegen eigenständige Bewegung gesichert werden können. Dazu kommen Rollen zum Einsatz, bei denen es sich um Spezialanfertigungen handelt. Diese Rollen verfügen über eine elektrische Bremse, die erst nach dem Anlegen eines Freigabestromes die Rolle löst. Dann kann das Gestell bewegt werden. Sind die Bremsen hingegen stromlos (z. B. auch bei einem Störfall des Unterfahr-FTS) so sind sie geschlossen, also bremsend, und der Riegel kann nicht frei im Raum bewegt werden. Im Lager kann das Riegelgestell wie eine Palette gehandhabt und angehoben werden. Somit kann es auch per RBG in ein HRL eingelagert werden.

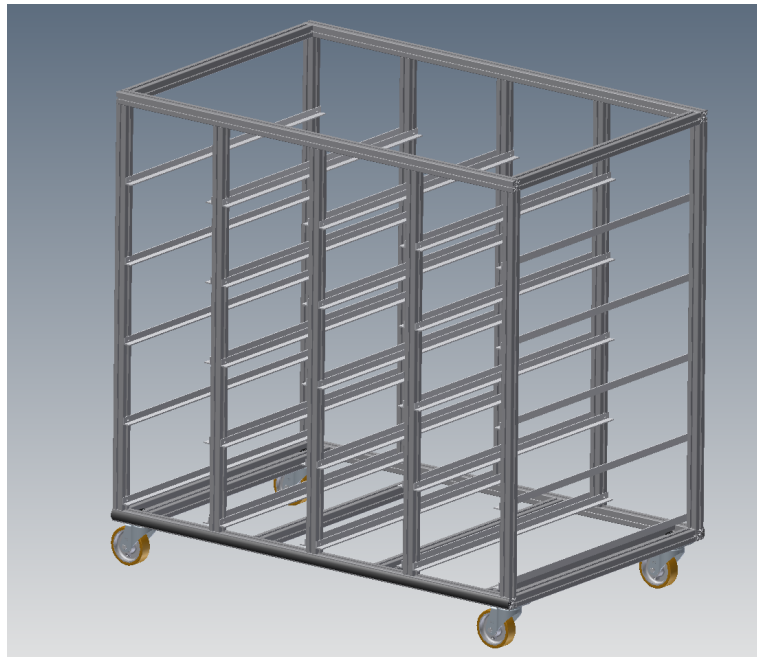


Abbildung 3.13: Leeres Riegelgestell mit Rollen (eigene Darstellung)

3.8.2 Unterfahr-FTF

Das am IFT neu entwickelte Unterfahr-FTF soll wie beschrieben für alle drei neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) zum Einsatz kommen. Beim Einzel-FTF- und Warenkorbkonzept sind jeweils, wie auch beim Riegelkonzept Gestelle vorhanden, die über eine ähnliche Grundplatte verfügen. Denn die drei Gestelle werden zum Transport nicht angehoben sondern durch Unterfahren und Einhaken geschleppt. Dazu kommt das in Abbildung 3.14 dargestellte Unterfahr-FTF zum Einsatz. Es verfügt über vier ausfahrbare Zylinder, die sich nach dem Unterfahren der Gestelle in die Grundplatte einhaken und damit einen horizontalen Kraftschluss zum jeweiligen Gestell ermöglichen. Dadurch können die Gestelle durch das Unterfahr-FTF flächenbeweglich im Raum bewegt werden.⁵⁷⁴ Eine Besonderheit beim Riegelgestell ist hierbei, dass in der Grundplatte elektrische Kontakte verbaut sind. Über diese Kontakte kann nach dem Einhaken des Unterfahr-FTF der Freigabestrom für die Bremsen übertragen werden. Da sowohl Einzel-FTF- als auch Warenkorbgestell mit freilaufenden Rollen ausgestattet sind, sind hier keine elektrischen Kontakte in der Grundplatte verbaut. Es wäre auch möglich gewesen die in Kapitel 3.4 vorgestellten System KaTe und Doppelkufen für den Transport der Warenkorb- und Einzel-FTF-Gestelle zu verwenden. Doch der Fokus des IFT im Rahmen des Forschungsprojekts ARENA2036 lag auf der Verwendung eines Fahrzeugs (FTF) für den Transport aller drei Gestellarten. Da für die Bewegung der Riegelgestelle die Neukonstruktion eines FTF, des Unterfahr-FTF, notwendig war, wurde dieses Fahrzeug auch für den Transport der anderen beiden Gestelle

⁵⁷⁴ Der Transport des Riegelgestells mit dem Unterfahr-FTF ist in Abbildung A.1 im Anhang zu sehen.

ausgewählt.

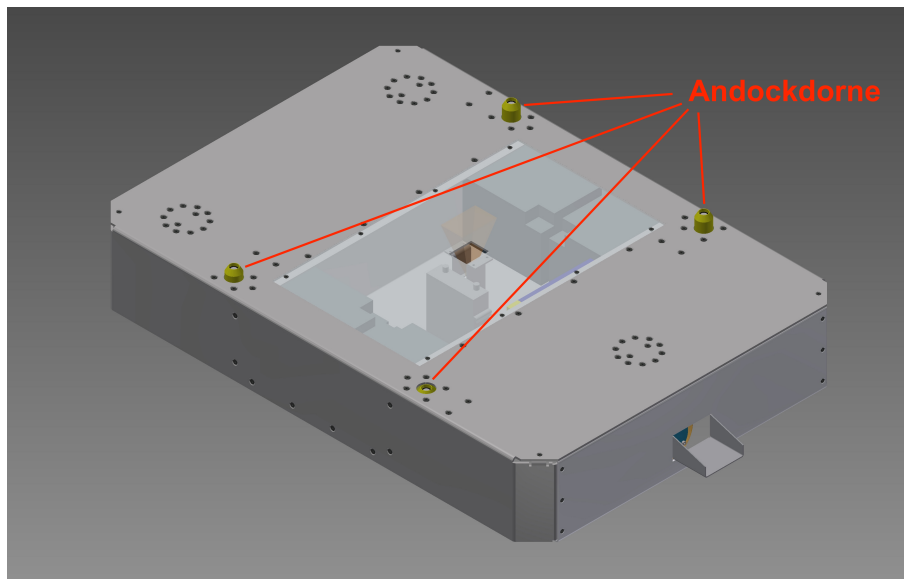


Abbildung 3.14: Riegelgestell-FTF bzw. Unterfahr-FTF (eigene Darstellung)

3.8.3 Einzel-FTF-Gestell

Das Einzel-FTF-Gestell wurde für den Transport von wenigen KLT auf einer ergonomisch sinnvollen Höhe konzipiert. Der in Abbildung 3.15 dargestellte Grundrahmen kann beispielsweise vier KLT der Größe 600 x 400 mm aufnehmen. Grundsätzlich sind Einzel-FTF-Gestelle mit kleineren Abmessungen vorstellbar, die nur 1 - 2 KLT der Größe 600 x 400 mm aufnehmen können. An dieser Stelle wurde ein etwas größerer Aufbau gewählt, damit das Einzel-FTF-Gestell vom Unterfahr-FTF in Querrichtung unterfahren und transportiert werden kann.

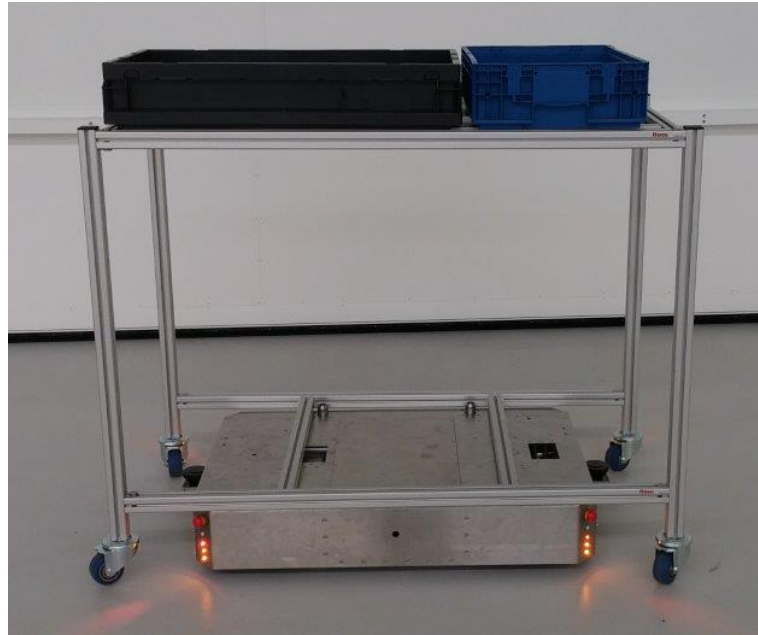


Abbildung 3.15: Einzel-FTF-Gestell mit KLT und Unterfahr-FTF (eigene Darstellung)

3.8.4 Warenkorb-Gestell

Das Warenkorb-Gestell wurde auf Basis von Untersuchungen zu ergonomischen Greifpositionen konzipiert. Es verfügt über drei Ebenen auf denen jeweils drei KLT der Grundmaße 600 x 400 mm aufgenommen werden können, siehe Abbildung 3.16. Die mittlere, schräg gestellte Ebene⁵⁷⁵ ermöglicht die optimalen Greifpunkte und kann beispielsweise für schwerere oder besonders empfindliche Bauteile, die vorsichtig entnommen werden müssen, genutzt werden. Die oberste und unterste Ebene sind waagrecht angebracht.

⁵⁷⁵ Bei der Beladung aus dem AKL wird die schräg gestellte Ebene beispielsweise von hinten beladen, damit die KLT in die richtige Position rutschen.

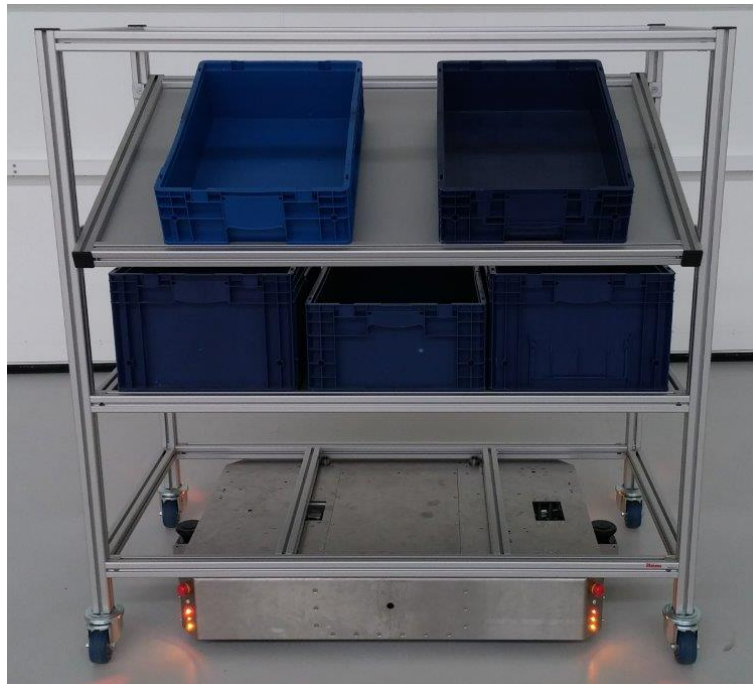


Abbildung 3.16: Warenkorb-Gestell mit KLT und Unterfahr-FTF (eigene Darstellung)

3.8.5 Neuartige Ladungsträger

Im Rahmen der Ausarbeitung der neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept), siehe Kapitel 3.5, wurde gleich zu Beginn festgestellt, dass nicht nur neue Logistikkonzepte für den innerbetrieblichen Materialfluss entwickelt werden müssen sondern auch dazu passende, neue Universalladungsträger. Denn die Potentiale der neuartigen Logistikkonzepte lassen sich nur dann komplett verwirklichen, wenn eine Vielzahl der Montageteile in unterschiedlichen Konzepten transportiert werden können. Da die Wandlungsfähigkeit heutiger Logistikkonzepte durch die Verwendung von Spezialladungsträgern und KLT mit Einlagen, siehe Kapitel 2.4.3, begrenzt wird, müssen für eine Umsetzung der neuartigen Logistikkonzepte innovative Universalladungsträger entwickelt werden. Diese neuen Ladungsträger müssen das Spektrum der bisherigen Universalladungsträger (z. B. KLT) insbesondere in Bezug auf das Grundmaß erweitern. Anschließend müssen Materialien, die bisher in Sonderladungsträgern transportiert werden, gezielt in die neuen Universalladungsträger überführt werden. Dabei werden bei bestimmten Bauteilen wahrscheinlich Anteile des Behältervolumens nicht ausgenutzt, da die Anordnung der Bauteile im Ladungsträger nicht derart optimal erfolgen kann, wie beim Sonderladungsträger, der speziell für ein Bauteil erstellt wurde. Doch die Einsparungen durch standardisierte Handlingsvorgänge und die Flexibilität des Einsatzes aller drei neuartigen Logistikkonzepte für die Anlieferung stehen dem gegenüber. Die Materialbereitstellung wird dementsprechend flexibler und wandlungsfähiger.

Zusätzlich zu den neuen Grundgrößen werden in diesem Ladungsträgerprojekt auch uni-

verselle Einlagen und automatische Deckel für die Ladungsträger entwickelt. Diese beiden Ansatzpunkte gehen auch aus der in dieser Arbeit erfolgten Analyse von Montagewerken, siehe Kapitel 3.5, und Standorten von Logistikdienstleistern hervor. Aktuell werden die verwendeten Einlagen⁵⁷⁶ für den Rücktransport zum Zulieferer immer aufwändig nach Typ und Bauteilaufnahme sortiert, dieser Schritt soll bei universellen Einlagen entfallen. Die automatischen Deckel hingegen sollen das Ladegut vor Beschädigung, UV-Strahlung und direktem Zugriff schützen. Da sich in den aktuellen Prozessen stellenweise Pappdeckel finden, die auf die KLT aufgelegt und heruntergenommen werden, könnte ein automatischer Deckel das Handling wesentlich erleichtern.

Während am IFT aktuell zwei Forschungsprojekte zur Entwicklung dieser neuartigen Ladungsträger laufen, werden in dieser Dissertation keine Ergebnisse präsentiert. Grund hierfür ist die direkte Industriefinanzierung und der Wunsch des Auftraggebers, zum aktuellen Zeitpunkt keine Informationen zu präsentieren. Weiterhin ist dies auch nicht der Kern der vorliegenden Dissertation. Es soll dem Leser jedoch mitgeteilt werden, dass die neuartigen Logistikkonzepte besonders durch Einführung der innovativen Universalladungsträger noch sinnvoller für die Materialzuführung eingesetzt werden können.

3.9 Vernetzte Logistik als Steuerungssystem des Materialflusses

Damit die Implementierung der drei neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) erfolgreich verlaufen kann, müssen auch Veränderungen in der Materialflusssteuerung erfolgen. Nur dann werden die drei neuartigen Logistikkonzepte durchgängig und vollständig in den Montagewerken umsetzbar sein. Insbesondere die veränderten Produktionsabläufe in Matrix- oder Schachbrettlayout beziehungsweise die JIRT-Belieferung durch das Riegelkonzept, werden nicht per verbrauchsgesteuertem Materialabruf (z. B. Kanban) handhabbar sein. Deshalb wird an dieser Stelle ein neues Konzept für diese Materialflusssteuerung, bezeichnet als vernetzte Logistik vorgestellt, welches im Rahmen dieser Arbeit grob entwickelt wurde.

Für das Konzept und die Umsetzung sind intelligente, selbstdenkende Systeme als Bestandteil der Betriebsmittel notwendig. Diese sogenannten cyber-physische Systeme (CPS)⁵⁷⁷ stellen jeweils eigene intelligente System dar, die ihre Umwelt durch eingebaute Sensoren erfassen und anschließend, dank Kommunikationsinfrastruktur (z. B. WLAN), mit vorhandenen Daten (z. B. aus einem WMS) verbinden und auswerten können. Die darauf folgende Durchführung einer Reaktion⁵⁷⁸ wird durch Aktoren vorgenommen.⁵⁷⁹ Darüber hinaus besitzen diese CPS die Eigenschaft sich untereinander direkt zu vernetzen und dadurch dezentral

⁵⁷⁶ Diese Einlagen oder inlays bilden Negativformen für die Bauteile aus und schützen diese somit im Ladungsträger im Transport.

⁵⁷⁷ CPS werden in dieser Arbeit nur für die Beschreibung eines solchen Systemaufbaus verwendet.

⁵⁷⁸ Beispielsweise das Erzeugen einer Bestellung oder das Herbeirufen von Förderfahrzeugen.

⁵⁷⁹ Vgl. Bauernhansl (2014), S. 16.

und autonome Netzwerke (z. B. Logistiknetzwerke) aufzubauen und zu betreiben sowie diese sogar später eigenständig zu optimieren.⁵⁸⁰

Der Ablauf der Materialbereitstellung beim Konzept der vernetzten Logistik, unter Verwendung von CPS, soll folgendem Schema folgen, siehe Abbildung 3.17: Die Beschreibung beginnt beim im Aufbau befindlichen Auto, welches gerade auf dem Montage- und Logistik-Groß-FTF durch die Montage bewegt wird. Dies ist der Ausgangspunkt für die Materialbestellung. In den aufzubauenden Fahrzeugen werden Listen mit den jeweiligen Materialbedarfen für alle Montagestationen in elektronischer Form mitgeführt. Mithilfe einer Positionierungsanlage in der Montagehalle, kann das CPS des Autos immer die aktuelle Position im Montagelayout ermitteln, an der es sich befindet. Aufbauend auf dieser Information, wird unter Zuhilfenahme der gespeicherten Materialbedarfe immer passend für die nächsten Prozessmodule mit dem notwendigen zeitlichen Vorlauf zielgerichtet das Material bestellt. Dabei sendet das Auto das Bestellsignal an das physische oder virtuelle Lager. Während das reale Lager physisch auf dem Werksgelände vorhanden ist, befindet sich das virtuelle Lager außerhalb des Werks beispielsweise auf einem angrenzenden oder nahen Gelände, betrieben von einem Logistikdienstleister. Der Ladungsträger wird dann vom jeweiligen Lager ausgelagert, beim virtuellen Lager vorher noch ins Werk geliefert. Von beiden Lagern wird ständig geprüft, ob Bestellbedarfe vorliegen. Ist dies, beispielsweise bei niedrigen Lagerbeständen, der Fall, wird direkt eine Bestellung an die Zulieferer gesendet. Der Zulieferer empfängt diese Bestellung und versendet die Materialien entweder direkt zum passenden Lager bzw. ins Werk oder er stellt sie für den nächsten Milkrun, zur Erklärung siehe Kapitel 2.3.5, bereit. Die Entscheidung für direkten Versand oder Milkrun fällt auf Basis der verbleibenden Zeit, die das Bauteil noch nutzen kann, bevor es im Montagewerk eintreffen muss. Nachdem in einem der Lager die Auslagerung der Ladungsträger stattgefunden hat, soll über ein neuartiges Auswahlwerkzeug⁵⁸¹ das passende Logistikkonzept für den innerbetrieblichen Transport des Ladungsträgers, auf Basis von Kosten der einzelnen Logistikkonzepte, ausgewählt werden. Zur Auswahl stehen dabei die drei neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) aus Kapitel 3. Das Auswahlwerkzeug berechnet für jedes der drei Konzepte sowohl die anfallenden Kosten für den Materialtransport und die Lagerung⁵⁸² im Bereich zwischen erster Ladekante des Werks und Verbau- oder Montageort als auch die Kosten für die Sequenzierung.⁵⁸³ Nachdem ein Logistikkonzept über das Auswahlwerkzeug als wirtschaftlichste Lösung bestimmt wurde, wird dem betreffenden Ladungsträger dieses Konzept zugeteilt. Der Ladungsträger bestellt dann per direkter Kommunikation mit dem je-

⁵⁸⁰ Vgl. Bauernhansl (2014), S. 16.

⁵⁸¹ Dieses Auswahlwerkzeug wurde zuerst auf Excel-Basis aufgebaut und wird aktuell in einem weiteren Projekt am IFT in eine Matlab-Programmierung überführt, siehe Kapitel 1.4, ist aber explizit nicht Teil dieser Arbeit, da es erstens den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde und zweitens aktuell noch nicht vollständig validiert ist.

⁵⁸² Die je nach Konzept abweichenden Flächen, die für eine Lagerung benötigt werden sowie die unterschiedlichen Lagerkosten, je nach Lagertyp (z. B. AKL) anfallen, werden mit in die Berechnung einbezogen.

⁵⁸³ Dabei werden auch die Kosten der jeweils für die Konzepte benötigten Betriebsmittel mit in die Berechnung einbezogen, was aktuell aufgrund der nur unvollständig aufgebauten Prototypen der neuen Betriebsmittel noch nicht möglich ist.

weiligen Konzept das benötigte Betriebsmittel, beispielsweise beim Einzel-FTF-Konzept ein FTF, welches den Ladungsträger zum Verbauort transportiert. Die freien FTF verhandeln untereinander, welches den Transportauftrag annimmt, wobei das FTF welches sich am nächsten zum aktuellen Aufenthaltsort des Ladungsträgers befindet und frei ist, zu favorisieren ist. Dieser Entscheidungsvorgang muss innerhalb kurzer Zeit stattfinden, damit keine Verzögerungen im Materialfluss entstehen. Die Grundidee lautet, dass die CPS untereinander über Agentensysteme⁵⁸⁴ in Verhandlung stehen und jeweils lokale Optima aushandeln. Dieses FTF transportiert den Ladungsträger dann zum Montageort, also dem Montage- und Logistik-Groß-FTF. Dort entnimmt der Montagemitarbeiter das Material und kann es am Auto verbauen.

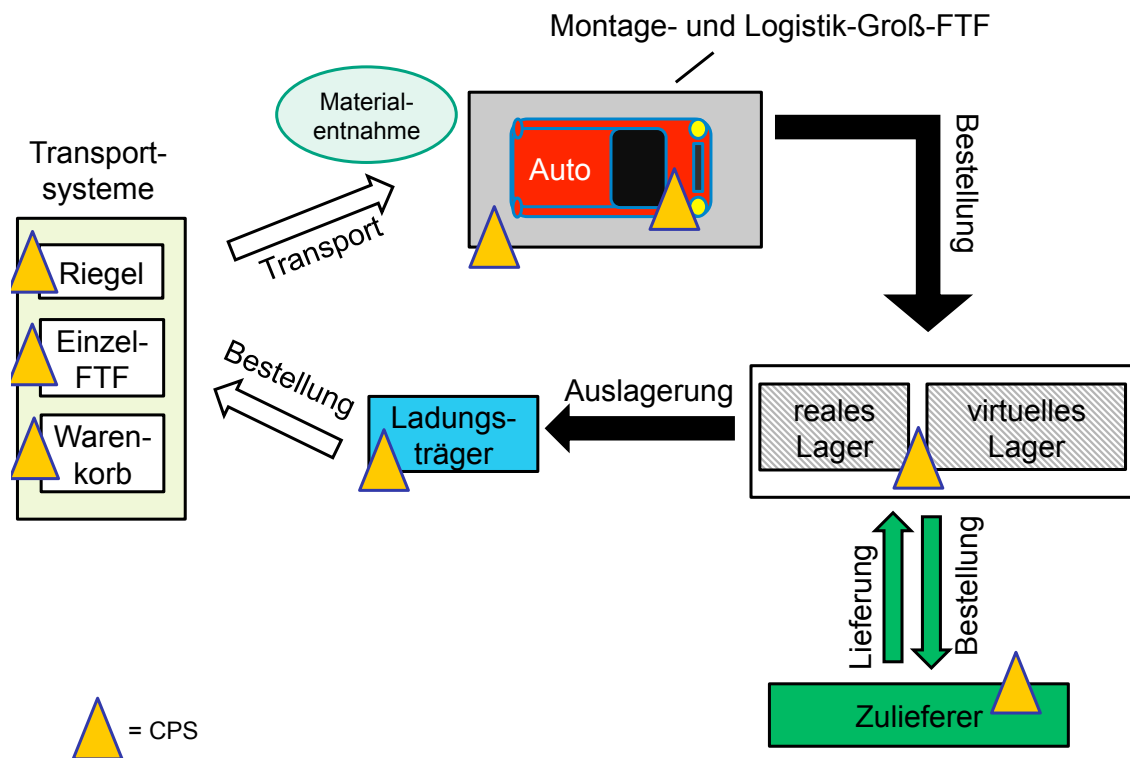


Abbildung 3.17: Konzept für eine vernetzte Logistik mit CPS

3.10 Fazit

Die in diesem Kapitel vorgestellten, neuartigen Logistikkonzepte müssen in Bezug auf Anwendbarkeit sowohl theoretisch als auch praktisch analysiert werden. In Kapitel 4.7.1 werden die vorgestellten Konzepte deshalb in Modelle überführt und anhand von Simulationen untersucht. Anhand dieser Ergebnisse soll eine theoretische Anwendbarkeit vorausgesagt werden können. Die praktische Anwendbarkeit wird sich bei Einsätzen in der neuen ARENA2036-

⁵⁸⁴ Agentensysteme werden in dieser Dissertation nicht weiter erläutert oder bearbeitet. Sie sollen nur eine Perspektive für die Umsetzung der vernetzten Logistik aufzeigen.

Versuchshalle⁵⁸⁵ und vor allem bei späteren Industrieereinsätzen zeigen. Damit es zum Aufbau von Pilotanlagen kommt, sind Anwendungsvorteile notwendig. Diese Pilotanlage soll die Grundzüge der neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorbkonzept) anhand eines physischen Aufbaus darstellen. Dieser Aufbau besteht dazu aus einem Montage- und Logistik-Groß-FTF, Riegel-, Warenkorb- und Einzel-FTF-Gestellen sowie einem Unterfahr-FTF und dem Mini-RBG. Die drei neuartigen Logistikkonzepte sollen im physischen Aufbau unterschiedliche Materialien zu vordefinierten Prozessmodulen transportieren bzw. beim Riegelkonzept an den Prozessmodulen direkt bereitstellen. Der Transport der im Aufbau befindlichen Fahrzeuge wird vom Montage- und Logistik-Groß-FTF übernommen. Die Materialzulieferung zum Montage- und Logistik-Groß-FTF erfolgt über die drei beschriebenen Gestelle (Riegelgestelle, Einzel-FTF-Gestell und Warenkorbgestell), siehe Kapitel 3.8.1, 3.8.3 und 3.8.4. Diese Gestelle werden entweder durch die in der Vergangenheit am IFT entwickelten FTF des Typs KaTe und Doppelkufen, siehe Kapitel 3.4, oder durch das neu entwickelte Unterfahr-FTF, siehe Kapitel 3.8.2, zwischen Wareneingang bzw. Lager und Montageort transportiert. Erfahrungswerte des IFT machen deutlich, dass die Vorstellung von neuartigen Logistikkonzepten und den dazu notwendigen Betriebsmitteln nur dann Akzeptanz findet und anschließend erfolgreich in die betriebliche Praxis überführt wird, wenn materielle Prototypen die theoretischen Abläufe beispielhaft in einem physischen Aufbau umsetzen.

Für die Berechnung von Business Cases sind die Kosten der zugehörigen Betriebsmittel der neuartigen Logistikkonzepte relevant. Aktuell können diese nicht ausreichend genau geschätzt werden, weshalb derzeit noch keine quantitativen, insbesondere monetären Aussagen über die Eignung der drei neuartigen Logistikkonzepte erfolgen kann. Eine deutliche Aussage ist heute jedoch schon für die folgenden qualitativen Argumente der neuen Logistikkonzepte möglich:

- Für unterschiedliche Fahrzeugmodelle eines Herstellers wird, im Gegensatz zu heute, nur noch eine Fabrik⁵⁸⁶ beziehungsweise eine Montagelinie benötigt. Dies hat erheblichen Einfluss auf die Investitionskosten, da eine Montagelinie ca. 50 - 200 Mio. Euro an Investition erfordert.⁵⁸⁷
- Die Montage wird flexibler und wandelbarer, da weniger starre Strukturen (beispielsweise Förderbänder) vorhanden sind.
- Durch die Verwendung des Matrix- oder Schachbrettlayouts werden Anpassungsmöglichkeiten an Nachfrageschwankungen gegeben. Die Produktionsmengen, Ausstattungs- und Modellvarianten lassen sich flexibler als bei der Bandmontage an

⁵⁸⁵ Siehe Kapitel 1.3.

⁵⁸⁶ Die Befragung von zwei Montageexperten aus der Automobilindustrie lieferte als Kosten für eine Montagelinie inklusive Gebäude und Grundstück den Wert von 370 - 400 Mio. Euro.

⁵⁸⁷ Vgl. Roscher (2008), S. 19 und Deechongkit und Srinon (2009), S. 2063.

den Verkaufs- oder Absatzmengen ausrichten.⁵⁸⁸

- Ein Ausschleusen von Fahrzeugen an jeder beliebigen Stelle der Montage wird ermöglicht, ohne dass dafür ein unverhältnismäßig hoher Aufwand in der Logistik entsteht.

⁵⁸⁸ Die Steigerung der Flexibilität ist besonders durch den Entfall von Model-Mix-Begrenzungen, siehe Kapitel 2.5, möglich.

4 Untersuchung der neuen Konzepte mit Hilfe von Simulationen

In Kapitel 2 findet sich eine detaillierte Beschreibung der heute eingesetzten Konzepte für die Produktionslogistik im Automobilbau. Darauf aufbauend wurden in Kapitel 3 neuartige Logistikkonzepte ausgearbeitet und vorgestellt, die den fünf Herausforderungen der Produktionslogistik der Automobilindustrie, siehe Kapitel 1.2 begegnen. Anschließend wurden die zehn neuartigen Konzepte in Kapitel 3 mithilfe einer Nutzwertanalyse und detaillierten Fragen in Bezug auf die Wandlungsbefähiger analysiert und anhand der Ergebnisse sortiert. Die drei bestbewerteten Konzepte (Riegelkonzept, Warenkorbkonzept und Einzel-FTF-Konzept) wurden ausgewählt und in Kapitel 3.7 detailliert vorgestellt. Eine fundierte Prüfung der Umsetzbarkeit dieser drei neuen Logistikkonzepte, insbesondere in Bezug auf die Erfüllung des Materialflusses⁵⁸⁹ von heutigen Automobilmontagen, erfolgt in diesem Kapitel per Simulation. Dies ist die erste Stufe der Ergebnisse der Simulationsläufe. Überprüft werden kann dies nur, wenn qualitativ hochwertige Datensätze aus der Praxis vorhanden sind. Die Bereitstellung dieser Daten erfolgte über Kooperationspartner und Kontakte des IFT. Die Daten stammen von einem deutschen Premiumhersteller, sind jedoch vertraulich zu behandeln und deshalb in dieser Arbeit nicht im Klartext wiedergegeben. Weiterhin soll in diesem Kapitel anhand der Simulationen die Erfüllung der drei Thesen aus Kapitel 1.4 gezeigt werden. In der zweiten Stufe, nach erfolgreichem Beweis der Funktionalität der neuartigen Logistikkonzepte, sollen die Simulationsläufe detaillierte Ergebnisse für die Anzahl der erforderlichen Betriebsmittel der neuartigen Konzepte liefern.⁵⁹⁰ Eine monetäre Betrachtung bzw. Einbeziehung von Kostensätzen und die damit möglichen Wirtschaftlichkeitsrechnungen der drei neuartigen Logistikkonzepte werden in dieser Arbeit nicht beachtet. Hintergrund hierfür ist, dass bestimmte Betriebsmittel wie das Unterfahr-FTF und das Montage- und Logistik-Groß-FTF aktuell noch nicht vollumfänglich aufgebaut wurden und dadurch nicht mit einem Geldbetrag angegeben werden können, wodurch eine Berechnung der Investitions- und Betriebskosten derzeit noch nicht möglich ist.

Das Ziel dieses Kapitels ist einerseits die Machbarkeit der in Kapitel 3.7 präsentierten, neuartigen Logistikkonzepte und andererseits die Bestimmung der Anzahl an notwendiger Betriebsmittel die für die Durchführung des Materialflusses bei Verwendung der neuartigen Logistikkonzepte eingesetzt werden müssen.

4.1 Übersicht der drei Simulationsstudien

Mit den bereitgestellten Produktionsdaten werden drei Simulationsstudien für die Automobilproduktion durchgeführt, die nachfolgend aufgelistet sind:

⁵⁸⁹ Die Erfüllung des Materialflusses wird durch das Erreichen der geforderten Durchsatzleistung gezeigt.

⁵⁹⁰ Mit Simulationsläufen können keine exakten Optima eines Modells bestimmt werden. (Vgl. Oertli-Cajacob (1977), S. 320).

1. Simulation einer TÜrenvormontage⁵⁹¹, getaktet mit gleichen Takten für alle Stationen. In dieser Simulationsstudie soll die Umsetzbarkeit der neuartigen Logistikkonzepte für Vormontagebereiche analysiert werden.
2. Simulation einer Endmontage, getaktet mit gleichen Takten für alle Stationen. Diese Simulationsstudie dient dazu, die Umsetzbarkeit der neuartigen Logistikkonzepte für Endmontagebereiche zu untersuchen.
3. Simulation einer Montage im Matrixlayout, getaktet aber unterschiedliche Vielfache des Grundtakts⁵⁹² an den Prozessmodulen. Diese Simulationsstudie soll den Ausblick auf eine Montage im Matrixlayout und den hierfür notwendigen Logistikkonzepten geben. Die Umsetzbarkeit der angenommenen Produktionswerte für eine derartige Montage soll unter Verwendung der neuartigen Logistikkonzepte analysiert werden.

Dabei ist es jeweils das Ziel, die funktionelle Umsetzbarkeit der drei neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) für die drei Arten von Produktionsumgebungen zu untersuchen. Bei den ersten beiden Simulationsstudien (Türenvor- und Endmontage, beides getaktet) wurden die Montagestationen in der Produktionsumgebung ähnlich angeordnet, wie Sie heute in der Realität zu finden sind, siehe hierzu auch Kapitel 2. Die Umsetzbarkeit der drei neuartigen Logistikkonzepte soll dementsprechend in den ersten beiden Simulationsstudien (Türenvor- und Endmontage) über den Vergleich zwischen den Ist-Werten der Produktionsmenge der aktuell eingesetzten Logistikkonzepte auf der einen Seite und den Ergebnissen für die Produktionsmenge aus den Simulationsläufen auf der anderen Seite bewiesen werden, siehe hierzu Tabelle 4. Dieser Vergleich der Simulationsergebnisse mit den real erzielten Produktionsleistungen, die anhand der Produktionsdaten für einen Tag als aufgenommene Daten vorhanden sind, bietet eine sehr gute Beweislage.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Produktionsmenge zum Beweis der Umsetzbarkeit bei der Simulationsstudie der Türenvor- und Endmontage

Ist-Werte / Stand heute (auf Basis der aktuellen Logistikkonzepte)	Soll-Werte (auf Basis der neuartigen Logistikkonzepte)
Produktionsmenge aus bereitgestellten Realdaten	Produktionsmenge als Ergebnisse der Simulationsstudien

Die dritte Simulationsstudie stellt eine Produktion per Matrix- oder Schachbrettlayout, siehe

⁵⁹¹ Zusätzlich zur Simulation der Endmontage in Band- und Matrixlayout wurde eine Türenvormontage simuliert, weil einerseits eine Türenvormontage in der Forschungssäule ForschFab in ARENA2036 zu Beginn als beispielhafter Montagebereich ausgewählt wurde und andererseits hierfür Originaldaten vorhanden waren. Experten des Bereichs Automobilmontage eines Premiumherstellers vertraten in ARENA2036 wiederholt die Aussage: „Wer eine Türenvormontage erfolgreich aufbaut und betreibt, kann das erlernte Wissen auch für die Endmontage sehr gut gebrauchen und direkt umsetzen“. Hintergrund für diese Aussage ist, dass an der Tür viele Varianten eingebaut werden, ähnlich wie auch bei der Endmontage Varianten verbaut werden. Deshalb wurde die Türenvormontage als erste Simulationsstudie in dieser Arbeit durchgeführt.

⁵⁹² Erläuterungen zum Grundtakt erfolgen in Kapitel 4.9.1.

Erklärungen in Kapitel 3.2, dar. Während für die TÜrenvor- und Endmontage die heutigen Durchsatzleistungen anhand der zur Verfügung gestellten Daten, die als Vergleichswert für die Ergebnisse der Simulationsstudien genutzt werden können, bekannt sind, ist die Situation bei der Simulation einer Montage im Matrixlayout anders. Hier liegen keine Vergleichswerte auf Basis von realen Produktionsdaten vor, da noch keine Produktionsumgebung in einem Werk der Premiumhersteller in Matrix- oder Schachbrettlayout mit Montagepfaden je Variante oder Modell aufgebaut bzw. vorhanden ist. Es können jedoch theoretische Produktionsmengen (siehe Soll-Werte (Rechnungen) in Tabelle 5) für die Montage beim Matrixlayout ermittelt werden. Diese werden dann für den Vergleich mit den Simulationsergebnissen herangezogen. Dementsprechend findet sich bei der dritten Simulationsstudie eine etwas abgewandelte Herangehensweise. Die Umsetzbarkeit der Simulation einer Montage in Matrixform, soll über den Vergleich zwischen theoretisch erzielbarer Produktionsmenge⁵⁹³ auf der einen Seite und den Ergebnissen der Simulationsläufe⁵⁹⁴ auf der anderen Seite, gezeigt werden. Diese Gegenüberstellung ist in Tabelle 5 zu sehen.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Produktionsmenge zum Beweis der Umsetzbarkeit bei der Simulationsstudie der Montage im Matrixlayout

Soll-Werte (Rechnungen) (auf Basis der beschriebenen Produktionsabläufe)	Soll-Werte (auf Basis der neuartigen Logistikkonzepte)
Produktionsmenge aus theoretischen Berechnungen	Produktionsmenge als Ergebnisse der Simulationsstudien

4.2 Beschreibung der Simulationsszenarien

Die Auswertung der Ergebnisse von Simulationen hängt laut VDI 3633-3 insbesondere von einer gewissenhaften Vorbereitung der Experimente ab.⁵⁹⁵ Szenarien sind dabei als gedanklich aneinandergereihte Ereignisse anzusehen, die zur Untersuchung von kausalen Zusammenhängen verwendet werden.⁵⁹⁶ Szenarien ermöglichen im Rahmen der Experimentplanung⁵⁹⁷ aus einer großen Zahl von möglichen Simulationsläufen eine sinnvolle Menge auszuwählen, die in Bezug auf Datenquantität und -qualität die Anforderungen erfüllt und auf die konkrete Zielsetzung abgestimmt ist.⁵⁹⁸ In den Simulationsstudien wurden jeweils über 1.000 Simulationsläufe durchgeführt, um mit statistischer Sicherheit eine Aussage über die erzielten Ergebnisse treffen zu können. Die Bestimmung dieser Zahl an Simulationsläufen

⁵⁹³ Die Berechnung erfolgte anhand der Anzahl der Prozessmodule unter Zugrundelegung des Produktionsprogramms und der Grundtaktzeit.

⁵⁹⁴ Gegenüber der theoretischen Berechnung werden in den Simulationsläufen zufällig Aufträge und zugehörige Teileumfänge generiert.

⁵⁹⁵ Vgl. VDI 3633-3 (1997), S. 6.

⁵⁹⁶ Vgl. VDI 3633 (2013), S. 20.

⁵⁹⁷ Im Rahmen der Experimentplanung sind für die jeweiligen Simulationsstudien die Ausgangsdaten, die Parameter des Modells und Versuchsziele zu definieren. (Vgl. Bangsow (2008), S. 13 f.).

⁵⁹⁸ Vgl. VDI 3633 (2013), S. 8.

basiert auf Rechnungen nach Eley. Demnach ist eine statistische Sicherheit der Ergebnisse bei den 1.000 Simulationsläufen erreichbar, wenn in mehr als 980 Simulationsläufen keine gravierenden Abweichungen festgestellt werden konnten.⁵⁹⁹

In den drei Simulationsstudien (Türevor,- End- und Matrixmontage) wurden jeweils vier Szenarien der neuartigen Logistikkonzepte untersucht.⁶⁰⁰ Bei den vier Szenarien der neuartigen Logistikkonzepte ist die prozentuale Verteilung der Konzepte auf die zu beliefernden Prozessmodule bzw. Montagestationen jeweils unterschiedlich, siehe Tabelle 6.⁶⁰¹ Die prozentuale Angabe bezieht sich dabei auf den Anteil des jeweiligen Konzepts an der gesamten Materialbereitstellung. Im Szenario 1 werden 36 % der Stationen der Türevormontage mit dem Einzel-FTF-Konzept versorgt und 64 % der Stationen mit dem Riegelkonzept. Bei Szenario 2 ist die Verteilung der Logistikkonzepte mit 50 % der Montagestationen, die mit dem Riegelkonzept beliefert, 20 % die mit dem Warenkorb-Konzept beliefert und den restlichen 30 % die mit dem Gitterbox-Konzept beliefert werden, deutlich vielfältiger. Im Szenario 3 kommen alle drei neuartigen Logistikkonzepte zum Einsatz, indem 14 % der Montagestationen mit dem Einzel-FTF-Konzept versorgt werden, 50 % mit dem Riegelkonzept, 20 % mit dem Warenkorbkonzept und die restlichen 16 % der Stationen mit dem Gitterbox-Konzept. Abschließend findet sich im Szenario 4 eine 70 % zu 30 % Verteilung zwischen Riegelkonzept und Gitterbox-Konzept. Die Ergebnisse der Simulationsläufe und die Auswertungen basieren auf diesen Verteilungen.⁶⁰²

⁵⁹⁹ Vgl. Eley (2012), S. 29.

⁶⁰⁰ Mit Simulationsexperten im Umfeld von ARENA2036 wurde die Gegenüberstellung eines Ausgangsszenarios oder Null-Szenarios mit den vier Szenarien diskutiert. Das Ziel wäre hierbei eine Vergleichbarkeit von Ausgangsszenario und den vier Szenarien in Bezug auf logistische Kennzahlen wie beispielsweise Lagerdauer und -größe oder Anzahl der eingesetzten Betriebsmittel gewesen. Aufgrund der beschränkten Vergleichbarkeit solch eines Ausgangsszenarios eines bestimmten Brownfield-Werks, mit den dort eingesetzten Logistikkonzepten, logistischen Betriebsmittel und Lagerspezifikationen, wäre dieser Vergleich jedoch nicht allgemein aussagekräftig genug für die Automobilproduktionslogistik und wurde deshalb aus dieser Dissertation ausgeklammert. Für spätere Anwendungsuntersuchungen der drei neuen Logistikkonzepte sind derartige Vergleiche, insbesondere in Bezug auf logistische Kennzahlen aber auch Logistikkosten, sinnvoll und sollten projektbezogen eingesetzt werden.

⁶⁰¹ Die Vorgehensweise zur Aufstellung und Untersuchung solcher Szenarien orientiert sich an anderen wissenschaftlichen Arbeiten, bei denen Simulationen eingesetzt werden, siehe beispielsweise Pohl (2006), S. 76 ff.

⁶⁰² Die prozentualen Verteilungen wurden im Logistkarbeitskreis in ARENA2036 erarbeitet, vorgestellt und abgestimmt. Ergebnis dieser Abstimmung war, dass die Werte eine gute Vergleichbarkeit der Logistikkonzepte ermöglichen. Grundidee ist, dass die unterschiedlichen Verteilungen zeigen, dass jedes Konzept für bestimmte Umfänge der Materialbereitstellung genutzt werden kann. Die Ober- und Untergrenzen (z. B. 14 % beim Einzel-FTF-Konzept) ergeben sich durch die Notwendigkeit der Belieferung kompletter Stationen. Eine Belieferung nur bestimmter Materialien einer Station mit einem Konzept und anderer Materialien mit einem anderen Konzept wurde ausgeschlossen. Beim Warenkorb kommt als Besonderheit für die Untergrenze noch hinzu, dass mindestens zwei Stationen in Folge per Warenkorb beliefert werden müssen.

Tabelle 6: Untersuchungsszenarien in der Simulationsstudie der TÜrenvormontage

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Einzel-FTF-Konzept	36 %	-	14 %	-
Riegelkonzept	64 %	21 %	50 %	64 %
Warenkorb-Konzept	-	43 %	22 %	-
Gitterbox-Konzept	-	36 %	14 %	36 %

Es wurden deshalb vier Szenarien gewählt, um abweichende Einsatzmöglichkeiten der neuartigen Logistikkonzepte in den Simulationen abzubilden und nicht gewisse Stationen nur mit bestimmten Konzepten zu versorgen. Die Zusammenstellung der Szenarien erfolgte im Rahmen dieser Arbeit mit Blick auf aktuelle sowie zukünftige Produktionssituationen und in Abstimmung mit der Logistikarbeitsgruppe in ARENA2036. Dabei sollten unterschiedliche, denkbare Situationen ermittelt werden. Im Szenario 1 ist eine komplette Umstellung der bestehenden Logistik auf die neuen Logistikkonzepte angedacht. Die Materialbelieferung der Montage erfolgt ausschließlich durch die beiden neuen Konzepte Riegel und Einzel-FTF. Wobei ca. 2/3 der Stationen durch das Riegelkonzept beliefert werden, da dies gegenüber dem Einzel-FTF-Konzept weniger FTF-Fahrten notwendig macht. Beim Szenario 2 versorgt das Riegelkonzept nur 1/5 der Montagestationen, das Warenkorb-Konzept fast die Hälfte der Stationen und das Gitterbox-Konzept die verbleibenden Menge (ca. 1/3) der Montagestationen. Dieses Szenario stellt den Warenkorb deutlich in den Vordergrund und nutzt das Riegel- und Gitterbox-Konzept nur zur Unterstützung an einigen Stellen. Beim Szenario 3 wird das Riegelkonzept an der Hälfte aller Stationen eingesetzt. Das Warenkorb-Konzept beliefert ca. 1/5 der Montagestationen und die verbleibenden Stationen erhalten ihr Produktionsmaterial vom Einzel-FTF- und Gitterbox-Konzept. Das Szenario zielt damit deutlich auf eine Umsetzung des Riegel-Konzepts unter Verwendung der anderen Konzepte an einigen Stationen ab. Im letzten Szenario, dem Szenario 4 werden die Stationen nur durch das Riegel- und das Gitterbox-Konzept beliefert. Dieses Szenario soll, im Gegensatz zu Szenario 3, aufzeigen, wie eine fast vollständige Belieferung der Montage mit dem Riegelkonzept aussehen könnte. Das Gitterbox-Konzept stellt bei den verbleibenden Stationen eine Art Unterstützung für besonders großvolumige Bauteile dar.

4.3 Sondersituation große Bauteile

Da großvolumige Bauteile z. B. Seitenscheiben, die nicht in den größten KLT (600 x 400 mm Grundmaß) mit den Nutzmaßen 544 x 359 x 262 mm (RL-KLT) passen, aktuell noch nicht mit den drei neuartigen Logistikkonzepten (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) transportiert werden können, wird hierfür das heute schon bekannte Konzept der Materialbereitstellung per Gitterbox, siehe die Beschreibung in Kapitel 2.4.5, angewendet. Dieses Logistikkonzept wird in den Szenarien 2 - 4 angewendet. Die Gitterbox steht dabei stellvertretend für die Belieferung der Montage mit großen Bauteilen, die sonst per Sonder-

ladungsträger, Gitterboxen oder Faltboxen transportiert und bereitgestellt werden.⁶⁰³ Da in wenigen Monaten oder Jahren derartig großvolumige Bauteile mit den neu entwickelten Universalladungsträgern, siehe Kapitel 3.8.5, aufgenommen und dann auch mit den drei neuartigen Logistikkonzepten transportiert werden können, wird im Szenario 1 die Materialbereitstellung ohne Gitterbox-Konzept aufgezeigt.⁶⁰⁴

4.4 Prüfen der möglichen Weiterverwendbarkeit bisheriger Simulationsmodelle

Anhand der Beschreibung der drei neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) in Kapitel 3 ist erkennbar, dass die drei Konzepte völlig neue, revolutionäre Ansätze für die Produktionslogistik liefern und dadurch wesentlich von den aktuell eingesetzten Verfahren der Automobilproduktionslogistik, siehe Kapitel 2.3, abweichen. Während bei den alten Konzepten ein Umfang bzw. die zugehörigen Bauteile zu einem Montageort transportiert und dort vorgehalten wurden, bis das zugeordnete Fahrzeug diese Station im Takt durchlaufen hat und die zugeordneten Teile montiert worden sind, zielen die neuen Konzepte auf eine direkte Zuteilung der gerade benötigten Bauteile zum jeweiligen Fahrzeug ab (just-in-real-time). Deshalb können bisherige Simulationsmodelle für die Produktionslogistik in der Automobilproduktion an dieser Stelle nicht weiterverwendet werden und stattdessen müssen neue Modelle erstellt werden.

4.5 Grundlagen von Simulationen

Die VDI 3633 definiert die Simulation als „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“⁶⁰⁵. Weiterhin ist ein System laut VDI 3633 definiert als eine „abgegrenzte Anordnung von Komponenten, die miteinander in Beziehung stehen“⁶⁰⁶, wohingegen ein Modell „eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder [real] existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System [ist]. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Ziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.“⁶⁰⁷ Oertli-Cajacob definiert ein Modell deutlicher in Bezug auf die Abbildungseigenschaften in-

⁶⁰³ Durch die Verwendung des Gitterbox-Konzepts für großvolumige Bauteile wird in dieser Arbeit eine relativ grobe Vereinfachung getroffen. Dies ermöglicht eine Berücksichtigung auch großvolumiger Bauteile in der Simulation, die andererseits mit vertretbarem Aufwand nur schwierig hätten erfasst werden können.

⁶⁰⁴ Bei Gleichteilen mit hoher Verbaquote, also Bauteilen die nur eine Variante besitzen (z. B. Dämmmatten) und in fast jedem Fahrzeug verbaut werden, wird die Gitterbox bzw. der Großladungsträger voraussichtlich auch in der Zukunft als Logistikkonzept zum Einsatz kommen, da dies für derartige Teile eine sehr wirtschaftliche Lösung darstellt.

⁶⁰⁵ Vgl. VDI 3633 (2013), S. 16.

⁶⁰⁶ Vgl. VDI 3633 (2013), S. 19 f.

⁶⁰⁷ VDI 3633-1 (2000), S. 3.

dem er sagt „Ein Modell ist eine Abbildung oder Darstellung eines Systems, welches das wirkliche System (Realität) oder ein zu verwirklichendes System möglichst gut im interessierenden Sachverhalt abbildet.“⁶⁰⁸ Bei beiden Definitionen wird außerdem deutlich, dass der Detaillierungsgrad des Modells⁶⁰⁹ und seine Eigenschaften einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben. Zusammengefasst ist Simulation ein geplantes Experimentieren mit Modellen, die wiederum eine Abbildung von realen oder fiktiven Systemen darstellen.

Grundsätzlich muss vor Durchführung einer Simulationsstudie immer geprüft werden, ob wirtschaftlichere Methoden oder Vorgehensweisen zur Lösung der Aufgabe vorhanden sind.⁶¹⁰ Dies ist für die neuartigen Logistikkonzepte nicht der Fall, da eine Umsetzung der Konzepte, aufgrund fehlender Betriebsmittel und Probeumgebungen in der Realität noch nicht möglich ist. Deshalb sollen an dieser Stelle Simulationsstudien eingesetzt werden, um die Umsetzbarkeit und den Nutzen⁶¹¹ der neuen Konzepte zu überprüfen.⁶¹² Die Simulation als Werkzeug eignet sich dazu, da es damit möglich ist, die dynamischen Vorgänge in Montageumgebungen abzubilden und statistisch zutreffende Ergebnisse zu erreichen.⁶¹³ Zu Beginn des Kapitels wird auf die Grundlagen von Simulationen inklusive der Phase der Modellierung⁶¹⁴ und der Simulationserstellung eingegangen. Die beschriebene Vorgehensweise wird dann für die neuartigen Logistikkonzepte in den drei Simulationsstudien für eine Automobilproduktion umgesetzt.

4.5.1 Ablauf einer Simulationsstudie

Grundsätzlich sind vom realen System bis zum Modell einige Schritte notwendig. Beim Ablauf einer Simulationsstudie werden dabei, je nach Autor andere Vorgehensweisen oder Modelle unterschieden. Sauerbier beschreibt vier dieser Modelle für den Ablauf einer Simulationsstudie. Erstens das Grundmodell, zweitens das Prognosemodell, drittens das Ablaufmodell und viertens das Ebenenmodell. Die Betrachtungsweisen können bei diesen Modellen entweder theoretischer Natur, beim Grundmodell und Prognosemodell, oder praktischer Natur, beim Ablaufmodell und Ebenenmodell, sein.⁶¹⁵

Das **Grundmodell** stellt die allgemeinste Gesamtübersicht für den Ablauf von Simulationsstudien dar. Dieses Modell wird, mit weiteren Vertiefungen, auch in dieser Arbeit verwendet. Zuerst wird das Originalsystem anhand der folgenden Fragen analysiert⁶¹⁶:

⁶⁰⁸ Oertli-Cajacob (1977), S. 20.

⁶⁰⁹ Im Zuge der Vereinfachung des abzubildenden Systems wird häufig, je nach Betrachtungsrichtung, eine sogenannte Simplifikation getätigt. (Vgl. Oertli-Cajacob (1977), S. 21).

⁶¹⁰ Vgl. VDI 3633-3 (1997), S. 3.

⁶¹¹ Vgl. Eley (2012), S. 6.

⁶¹² Vgl. Günthner u. a. (2010), S. 150.

⁶¹³ Vgl. Gupta u. a. (1999), S. 1066.

⁶¹⁴ Die Modellierung kann auch als Modellbildung bezeichnet werden.

⁶¹⁵ Vgl. Sauerbier (1999), S. 7.

⁶¹⁶ Vgl. Sauerbier (1999), S. 7.

- Was sind die wesentlichen Elemente des Systems?
- Welche Beziehungen haben diese Elemente zueinander?
- Wie verhalten sich die Elemente?

Mithilfe der Antworten auf die Fragen, lässt sich ein formales Systemmodell entwickeln. Diese Phase wird folglich als Modellbildung bezeichnet. Unter Berücksichtigung des zuvor definierten Untersuchungszwecks, wird anschließend die Eignung des Modells bewertet. Die zentrale Frage lautet hierbei: Kann das Systemmodell das interessierende Verhalten des realen Systems ausreichend genau wiedergeben? Dementsprechend wird in dieser Phase die Modelleignung geprüft. Kann die Frage positiv beantwortet werden, wird das Systemmodell anschließend in ein ausführbares Computerprogramm, den Simulator, übertragen. Ziel ist hierbei, dass das Simulationsmodell im Simulator den gewünschten Sachverhalt abbildet. Bezeichnet wird diese Phase als Modellimplementierung. Nachdem der Simulator erstellt ist, muss seine inhaltliche Korrektheit überprüft werden. Dabei wird untersucht, ob das Simulationsmodell genau dem formalen Modell entspricht. Diese Phase wird als Modellverifikation bezeichnet. Abschließend erfolgt die Modellvalidierung, bei der untersucht wird, ob zwischen den Simulationsergebnissen und dem tatsächlichen oder prognostizierten Verhalten des Originalsystems gravierende Abweichungen vorliegen.⁶¹⁷

Das **Prognosemodell** beschreibt die Sicht eines Anwenders, der das Verhalten des Originalsystems in einer bestimmten Situation prognostizieren will. Diese Modelle werden dementsprechend verwendet, um, unter Verwendung von Annahmen, ein zukünftiges Modellverhalten zu ermitteln.⁶¹⁸ Dazu wird eine Reihe von Simulationsexperimenten mit jeweils anderen Ausgangszuständen oder unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt.⁶¹⁹

Beim **Ablaufmodell** werden Tätigkeiten nach einer vorgegebenen Reihenfolge hintereinander abgearbeitet.⁶²⁰ Zu Beginn der Simulationsstudie wird anhand der Problemformulierung das Modell entwickelt und anschließend implementiert. Dabei ist es wesentlich, wie der zu untersuchende Realitätsausschnitt gewählt ist, um auch den Detaillierungsgrad des Modells festlegen zu können. Nach erfolgreicher Verifizierung und Validierung werden die eigentlichen Simulationsläufe durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet.⁶²¹

Bei Verwendung des **Ebenenmodells** werden die Aufgaben in drei Fachebenen (Realproblem, Modell und Simulator) aufgeteilt, um darauf aufbauend eine bestmögliche Zuordnung von Mitarbeitern und deren Qualifikationen vornehmen zu können.⁶²² Ausgangspunkt ist die Fachabteilung, die eine Aufgabe oder ein Problem lösen möchte. Dazu werden Systemanalytiker engagiert, die das System analysieren und das Simulationsmodell erstellen. Falls be-

⁶¹⁷ Vgl. Sauerbier (1999), S. 7 f.

⁶¹⁸ Vgl. Arnold (2006b), S. 250 und Scholl (2008), S. 36.

⁶¹⁹ Vgl. Sauerbier (1999), S. 8 f.

⁶²⁰ Vgl. Weiss und Jakob (2005), S. 84 sowie Vgl. Eversheim und Abels (2003).

⁶²¹ Vgl. Sauerbier (1999), S. 10 f.

⁶²² Vgl. Liebl (1995), S. 225 f.

sondere Kenntnisse für das Simulationssystem benötigt werden, kommen unterstützende Informatiker zum Einsatz. Wesentliche Voraussetzung für die Funktionsweise bei diesem Modell ist eine erfolgreiche Kommunikation zwischen den Fachebenen sowie die Transparenz der Methoden.⁶²³

4.5.2 Modellarten

Grundsätzlich können Modelle nach drei Kriterien unterteilt werden. Das erste Kriterium ist die Darstellung der Zeit, bei der statische und dynamische Modelle unterschieden werden, siehe Abbildung 4.1. Statische Modelle hängen nicht von der Zeit ab, sondern stellen eine Momentaufnahme eines Systems dar.⁶²⁴ Dagegen sind dynamische Modelle zeitablaufbezogen und ändern sich dementsprechend über den Zeitverlauf.⁶²⁵ Die statischen und dynamischen Modelle lassen sich jeweils weiter in nichtlineare und lineare Modelle unterteilen. Dynamisch nichtlineare Modelle sind entweder stabil oder instabil und verlaufen stationär oder transient⁶²⁶. Gleiches gilt für dynamisch lineare Modelle. Statisch nichtlineare Modelle können nur stabil und stationär sein, genauso wie statisch lineare Modelle.

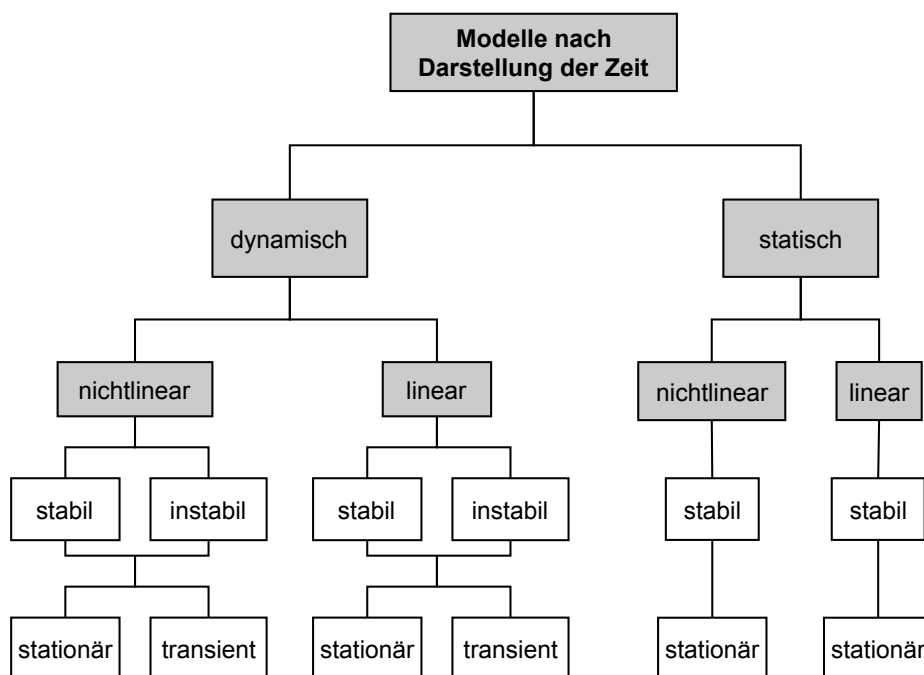


Abbildung 4.1: Unterscheidung von Modellen in Bezug auf die Darstellung der Zeit in Anlehnung an Sommer (2015), S. 67 nach Shannon (1975), S. 7

⁶²³ Vgl. Sauerbier (1999), S. 15.

⁶²⁴ Vgl. Adam (1996), S. 88 und Fröming (2009), S. 126.

⁶²⁵ Vgl. Adam (1996), S. 89.

⁶²⁶ Als transienter Zustand wird die Einschwingphase eines Modells bezeichnet. (Vgl. Suhl und Mellouli (2013), S. 285).

Das zweite Kriterium ist das Abbildungsmedium siehe hierzu Abbildung 4.2. Hierbei lassen sich materielle und immaterielle Abbildungen unterscheiden. Die immaterielle Abbildung kann weiter in formal und informal unterteilt werden.

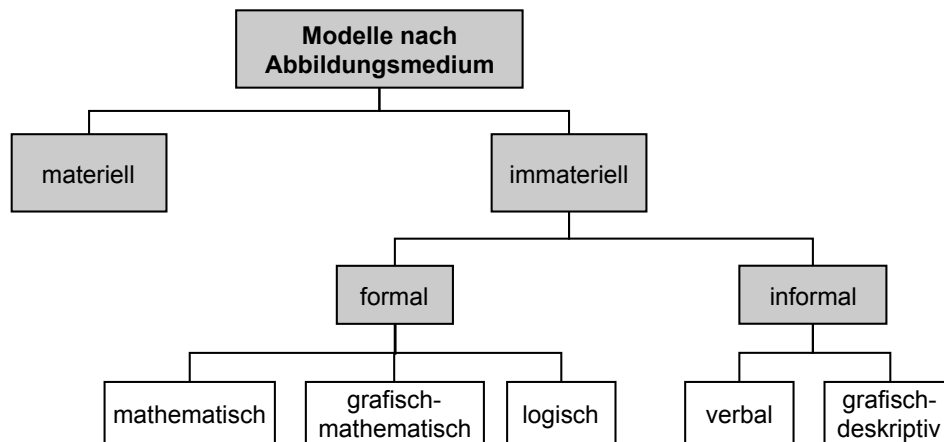


Abbildung 4.2: Unterscheidung von Modellen in Bezug auf das Abbildungsmedium nach Haun (2014), S. 42 f.

Das dritte Kriterium ist die Art der Zustandsübergänge, nach der kontinuierliche (zeitgesteuert), hybride und diskrete (ereignisgesteuerte) Modelle unterschieden werden können, siehe Abbildung 4.3.⁶²⁷ Die kontinuierlichen Modelle, welche häufig im physikalisch-technischen Bereich eingesetzt werden, sind zeitgesteuert. Hierbei ändert sich der Systemzustand in einem endlichen Zeitintervall beliebig oft, wobei die Systemzustände aber jederzeit bekannt sind.⁶²⁸ Bei den (ereignis-) diskreten Modellen wiederum ändert sich der Systemzustand sprunghaft nach Ereignissen, also nicht beliebig oft in einem Zeitabschnitt.⁶²⁹ Deshalb sind diese Modelle besonders geeignet, um logistische Systeme zu simulieren.⁶³⁰ Aufgrund dieser sprunghaften Zustandsänderungen werden (ereignis-)diskrete Systeme auch als ereignisgesteuerte Systeme bezeichnet.⁶³¹ Alle drei Modellarten (kontinuierlich, hybrid und diskret) gibt es in den Ausprägungen als deterministisches und stochastisches Modell.⁶³² Bei deterministischen Modellen sind alle Daten vorherbestimmt und zu jedem Input des Modells gibt es einen Output.⁶³³ Bei stochastischen Modellen hingegen sind die Systemvariablen zufällig.⁶³⁴ Die Daten werden also per Zufall erzeugt, beispielsweise durch eine Zufallsverteilung der Inputgrößen oder eine Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Störung.⁶³⁵ In dieser Arbeit werden dynamische, ereignisdiskrete Modelle verwendet, die sowohl über determi-

⁶²⁷ Vgl. VDI 3633 (2013), S. 17, Barton und Pantelides (1994), S. 966 ff. und Engeil u. a. (1997), S. 399.

⁶²⁸ Vgl. Wenzel (2000), S. 7.

⁶²⁹ Vgl. Mattern und Mehl (1989), S. 201 und Fröming (2009), S. 124.

⁶³⁰ Vgl. Eley (2012), S. 8.

⁶³¹ Vgl. VDI 3633 (2013), S. 17.

⁶³² Vgl. Sauerbier (1999), S. 11.

⁶³³ Vgl. Fröming (2009), S. 125.

⁶³⁴ Vgl. Sauerbier (1999), S. 23.

⁶³⁵ Vgl. VDI 3633 (2013), S. 21.

nistische (Produktionszeiten) als auch über stochastische (z. B. Ausfall von Betriebsmitteln) Ereignisse verfügen.

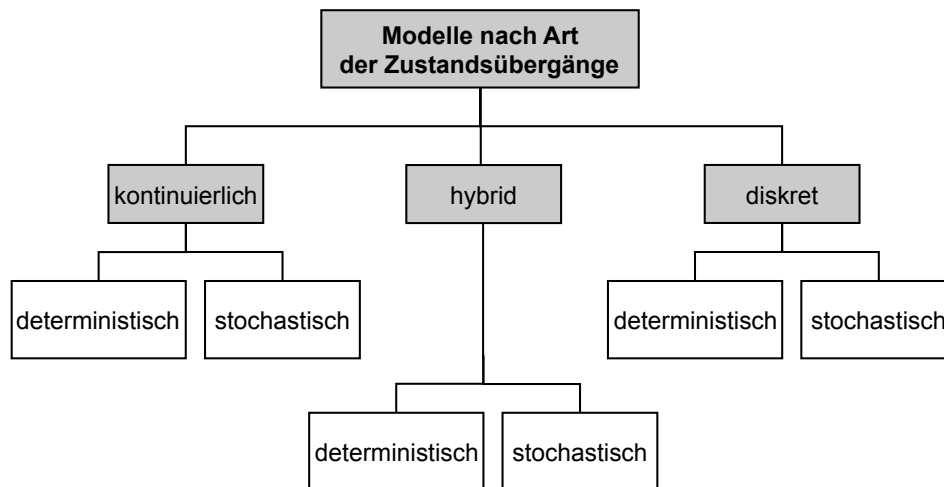


Abbildung 4.3: Unterscheidung von Modellen in Bezug auf die Zustandsübergänge in Anlehnung an VDI 3633 (2013), S. 17 und Elmqvist u. a. (1993), S. 31

4.5.3 Phasen einer Simulationsstudie

An dieser Stelle soll die Vorgehensweise für die Durchführung von Simulationsstudien dargestellt werden. Dabei können laut VDI 3633-1 drei Phasen voneinander abgegrenzt werden⁶³⁶:

- 1. Die Vorbereitungsphase, umfasst die Aufgaben- und Zieldefinition, die Datenbeschaffung und -aufbereitung sowie die Erstellung des Simulationsmodells.
- 2. Die Durchführungsphase konzentriert sich auf die Durchführung der Simulationsexperimente.
- 3. Die Auswertungsphase beinhaltet die Ergebnisanalyse und Diskussion.

Rabe et al. erweitern das Vorgehensmodell aus der VDI 3633-1, um eine ständige Verifikation und Validierung. Diese Vorgehensweise findet auch in der vorliegenden Arbeit Anwendung. Die Idee ist hierbei, dass Fehler direkt in der Phase und nach dem Arbeitsschritt entdeckt werden, bei denen sie erzeugt wurden. Dadurch sollen falsche Ergebnisse von Simulationen frühzeitiger entdeckt und ausgebessert werden können. Folglich findet die Verifikation und Validierung in dieser Arbeit begleitend zu allen Phasen der Simulation statt. Eine andere Vorgehensweise wäre nicht sinnvoll, da eine späte Erkennung von Fehlern unwirtschaftlich wäre und die Modelle mit jeder Phase komplexer werden.⁶³⁷ Dadurch ergeben sich Änderungen in

⁶³⁶ Vgl. VDI 3633-1 (2000), S. 11.

⁶³⁷ Vgl. Rabe u. a. (2008), S. 6 f.

der Durchführungsreihenfolge, die in Abbildung 4.4 zu sehen sind. Die Hauptaufgaben sind durch abgerundete Rechtecke auf dem mittleren Pfeil symbolisiert, während die Ergebnisse dieser Aufgaben (im rechten Bereich) jeweils direkt verifiziert und validiert werden.

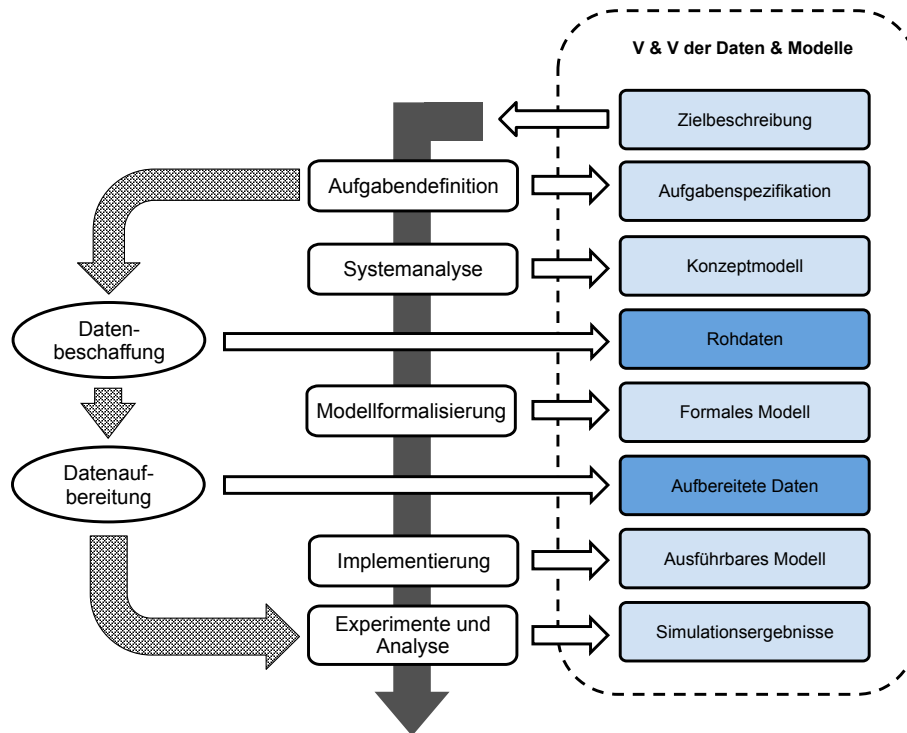


Abbildung 4.4: Vorgehensmodell bei einer Simulation nach Rabe u. a. (2008), S. 5 und VDI 3633-1 (2000), S. 11

In der vorlaufenden Phase der Zielbeschreibung, auch bezeichnet als Problemdefinition, erfolgt eine möglichst detaillierte Beschreibung der Problemsituation. Insbesondere die exakte Formulierung des vorliegenden Problems stellt sich häufig als anspruchsvoll heraus, ist jedoch wichtig für den nachfolgenden Prozess.⁶³⁸ Wie zu Beginn des Kapitels beschrieben, sollte dieser Phase eine Suche nach konventionellen Berechnungs- und Analysemethoden, die ohne passende Ergebnisse beendet wurde, vorausgegangen sein.⁶³⁹

In der Phase der Aufgabendefinition wird die Aufgabe anhand der Zielbeschreibung und des Lasten- sowie Pflichtenhefts analysiert und konkretisiert. Als Phasenergebnis wird die Aufgabenspezifikation erstellt.⁶⁴⁰ Dabei wird das Gesamtziel häufig in mehrere Teilziele zerlegt, damit Abhängigkeiten identifiziert werden können.⁶⁴¹ Gleichzeitig wird mit dem Prozess der Datenbeschaffung begonnen. Denn während in den nächsten Stufen ein detailliertes Modell aufgebaut wird, sind anschließend qualitativ hochwertige Daten für die Simulationsläufe

⁶³⁸ Vgl. Liebl (1995), S. 113 f. und Sauerbier (1999), S. 35.

⁶³⁹ Vgl. Kadachi (2004), S. 25.

⁶⁴⁰ Vgl. Rabe u. a. (2008), S. 47 und Banks (1998), S. 15.

⁶⁴¹ Vgl. Rabe u. a. (2008), 6 f.

notwendig.

Während der Systemanalyse erfolgt die Ableitung des Konzeptmodells aus dem realen oder geplanten System. Dabei wird bestimmt, welche wesentlichen Elemente des realen Systems im Simulationsmodell enthalten sein sollen und mit welcher Genauigkeit diese aufzubauen sind. Folglich werden in dieser Phase die grundlegenden Voraussetzungen für die Funktionsfähigkeit des Simulationsmodells gelegt.⁶⁴² Das Ergebnis dieser Phase ist ein Konzeptmodell. Parallel dazu erfolgt eine Zusammenstellung der Rohdaten auf Basis der Datenbeschaffung.

Die folgende Modellformalisierung hat zur Aufgabe, das Konzeptmodell in das formale Modell zu überführen. Der Anspruch an das formale Modell lautet, die weitere Vorgehensweise der Simulationserstellung, ohne zusätzliche Fachdiskussion, zu ermöglichen. Die Analyse und Aufbereitung der Rohdaten mündet in den aufbereiteten Daten, die später im Simulationsmodell eingesetzt werden können.

Im Rahmen der Implementierung wird das ausführbare Modell, auch als Simulationsmodell bezeichnet, erstellt. Grundsätzlich wird in dieser Phase, ausgehend vom realen System, ein möglichst passendes Modellabbild erstellt.⁶⁴³ In der VDI 3633-1 wird dazu von der „Umsetzung in ein Softwaremodell“⁶⁴⁴ durch einen Simulationsexperten gesprochen. Zu den kritischsten Schritten der Modellerstellung gehört gleich zu Beginn die Definition der Modellgrenzen oder auch Systemgrenzen. Werden die Grenzen zu weit gewählt, folgt sehr großer Arbeitsaufwand für die Erstellung des Modells. Bei zu enger Wahl der Modellgrenzen, fehlen möglicherweise wichtige Einflussfaktoren im Modell und relevante Funktionen werden folglich entweder gar nicht oder nur unzureichend abgebildet. Bei den Simulationsläufen wird dementsprechend ein von den realen Ergebnissen abweichendes Resultat folgen.

Zwei Arten zur Erstellung von Simulationsmodellen können unterschieden werden. Erstens der Top Down und zweitens der Bottom Up-Ansatz.⁶⁴⁵ Beim Top Down-Ansatz wird vom Groben ins Detail gegangen.⁶⁴⁶ Beim Bottom Up-Ansatz hingegen werden zunächst Teile detailliert betrachtet und diese anschließend als Grundlage für weitere Modelle genutzt.⁶⁴⁷ Das Programm Plant Simulation unterstützt durch seine Hierarchie sowohl Top Down als auch Bottom Up-Vorgehensweisen. An die Phase der Modellerstellung schließt sich die Modellnutzung des ausführbaren Modells an.

Im Anschluss an die Modellerstellung findet wieder eine Modellverifikation und -validierung statt. Dabei wird das Modell zuerst in Bezug auf die korrekte Abbildung der Modellierungs-

⁶⁴² Vgl. Ohlendorf (2006), S. 62 f.

⁶⁴³ Laut Nyhuis (2008) sind die Anforderungen von Oertli-Cajaob in Bezug auf Theorien auch auf die Modellerstellung zu übertragen. Dies sind Allgemeingültigkeit, Verständlichkeit, Bezug zur Realität und Beschränkung auf die wesentlichen Aspekte. (Vgl. Nyhuis (2008), S. 9 nach Oertli-Cajacob (1977), S. 17 f.).

⁶⁴⁴ VDI 3633-1 (2000), S. 18.

⁶⁴⁵ Eine detaillierte Gegenüberstellung findet sich in Košturiak und Gregor (1995), S. 119.

⁶⁴⁶ Vgl. Ohlendorf (2006), S. 63 sowie Bangsow (2008), S. 21.

⁶⁴⁷ Vgl. VDI 3633 (2013), S. 5.

bzw. der Simulationssprache hin überprüft.⁶⁴⁸ Weiterhin wird in der Modellvalidierung untersucht, ob das Verhalten des Modells bzw. der Simulation mit seinen Ergebnissen den Eigenschaften des Originals entsprechen kann.⁶⁴⁹

Zum Abschluss von Simulationsstudien werden in der Phase Experimente und Analyse die Simulationsergebnisse erzeugt und anschließend untersucht. Voraussetzung ist das Vorhandensein des ausführbaren Modells und der aufbereiteten Daten.⁶⁵⁰ Je nach Gestaltung der zu untersuchenden Szenarien muss das Simulationsmodell bzw. müssen die Parameter des Modells während dieser Phase verändert werden. Anschließend erfolgt die Analyse der Ergebnisse der Simulationen um daraus Schlussfolgerungen ziehen zu können. Dabei sollte auch eine Diskussion der Ergebnisse stattfinden, in deren Verlauf überprüft wird, ob eine Realitätsnähe der Simulationsergebnisse gegeben ist.⁶⁵¹ Falls die Antwort negativ ausfällt, muss der gesamte Ablauf der Simulationserstellung und Simulationsdurchführung noch einmal analysiert und gegebenenfalls wiederholt werden.

4.5.4 Regelkreis der Modellnutzung

Die Abbildung 4.5 skizziert die Methodik der Modellnutzung, die nachfolgend beschrieben wird. Grundsätzlich wird dabei, ausgehend von einem realen System (dem Urbild), durch Modellierung und Abstraktion ein Simulationsmodell erstellt. Das durch Modellierung oder Abstraktion erstellte Modell entspricht einem experimentierfähigen Abbild des realen Systems. Unter Verwendung dieses Simulationsmodells werden anschließend Simulationsläufe vorgenommen, bei denen formale Ergebnisse entstehen. Diese Ergebnisse können nach gründlicher Interpretation und Verifikation sowie Validierung auf ein reales System übertragen werden. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, zusätzliche Simulationen mit veränderten Parametern vorzunehmen oder das Modell durch Erkenntnisse gezielt zu verbessern. Der zweite Fall wird als iterative Vorgehensweise bei Simulationsstudien bezeichnet.⁶⁵²

⁶⁴⁸ Vgl. Zauner und Schrempf (2008), S. 230.

⁶⁴⁹ Vgl. Sauerbier (1999), S. 8 und Zauner und Schrempf (2008), S. 230.

⁶⁵⁰ Vgl. Rabe u. a. (2008), 48 ff.

⁶⁵¹ Vgl. Oertli-Cajacob (1977), S. 24.

⁶⁵² Vgl. Ohlendorf (2006), S. 64 nach Schraft u. a. (1999), S. 10-56 und Shannon (1975), S. 22 ff.

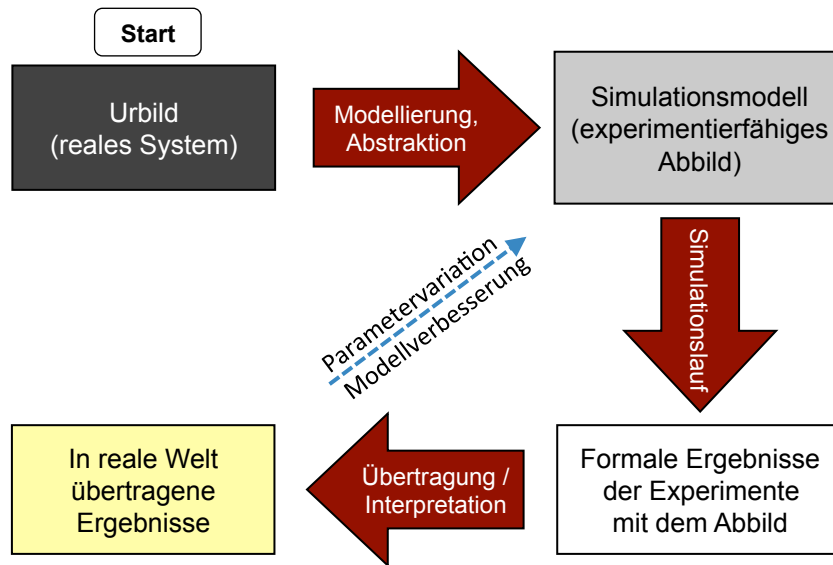


Abbildung 4.5: Methodik der Modellnutzung in Anlehnung an Kuhn (1993), S. 1 und Hrdliczka u. a. (1997), S. 3 sowie Sauerbier (1999), S. 9

Ein Simulationslauf ist definiert als die „[...] Nachbildung des Verhaltens eines Systems in einem spezifizierten ablauffähigen Modell über einen bestimmten (Modell-)Zeitraum.“⁶⁵³ Dagegen ist ein Simulationsexperiment weiter gefasst, da es „die gezielte empirische Untersuchung des Modellverhaltens über einen bestimmten Zeithorizont durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischen Parametervariationen“⁶⁵⁴ enthält. Die Simulationsexperimente oder Simulationsläufe werden in der Phase der Experimente und Analyse, siehe Abbildung 4.4, durchgeführt.

4.5.5 Simulationsprogramme

Heutzutage werden für die Durchführung von Simulationen unterschiedliche Simulationsprogramme⁶⁵⁵, auch als Simulationswerkzeuge bezeichnet, verwendet. Diese sind häufig an die Art der Simulation oder die Simulationsumgebung angepasst. Eine aktuelle Übersicht zu unterschiedlichen Programmen gibt die Abbildung 4.6, die nachfolgend von unten nach oben beschrieben wird.

⁶⁵³ VDI 3633 (2013), S. 17.

⁶⁵⁴ VDI 3633 (2013), S. 17.

⁶⁵⁵ Während in den Jahren 1986 und 1987 die ersten Firmen für Simulationsprogramme entstanden, waren dies größtenteils Ausgründungen aus Hochschulen, beispielsweise DOSSIMIS-3 (aus Dortmund) oder SIMFLEX aus Berlin. (Vgl. Bayer u. a. (2003), S. 11).

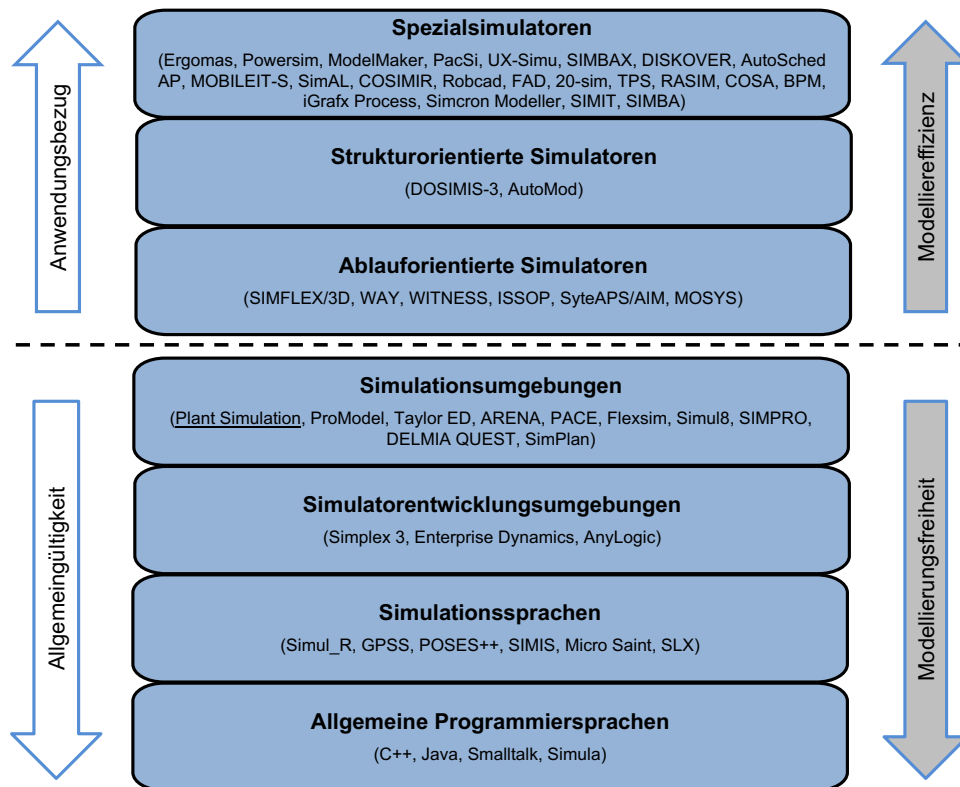


Abbildung 4.6: Zuordnung von Simulationsebene und Simulationsprogrammen, aktualisiert in Anlehnung an Kuhn (1993), S. 291 ff. Noche (2006), S. 10 und Eley (2012), S. 10 nach Wenzel (2000), S. 9

Allgemeine Programmiersprachen, wie C++ oder Java, sind aufgrund ihrer Funktionalitäten für unterschiedliche Problemstellungen auch abseits von Simulationen anwendbar. Simulationssprachen, wie MATLAB, sind hingegen „höhere Programmiersprachen, die den Problemstellungen der Simulation angepasst sind“⁶⁵⁶. Simulationsumgebungen oder Simulatorentwicklungsumgebungen werden, ähnlich wie Computer Aided Software Engineering (CASE)-Tools, zur Entwicklung von Simulationen verwendet, wobei als Besonderheit Simulationskomponenten in einem Paket bereitgestellt werden.⁶⁵⁷ Bei den Simulationsumgebungen, wie sie auch für diese Arbeit zum Einsatz kommen, sind Möglichkeiten zum Hinzufügen von Bausteinen oder Funktionen vorhanden. Von den ablauforientierten Simulatoren über strukturorientierte Simulatoren bis hin zu Spezialsimulatoren wird der Anwendungsbezug immer spezieller. Gleichzeitig wird über vorhandene Bausteine und Methoden eine rasche Modellierung ermöglicht.⁶⁵⁸

⁶⁵⁶ Vgl. VDI 3633 (2013), S. 18.

⁶⁵⁷ Vgl. VDI 3633 (2013), S. 18.

⁶⁵⁸ Vgl. Eley (2012), S. 10 f.

Das in dieser Arbeit eingesetzte Programm Plant Simulation⁶⁵⁹ zählt zur Gruppe der ereignisdiskreten Simulationsumgebungen und erfüllt somit die Anforderungen hinsichtlich Einsatzbreite aber auch Implementierungsmöglichkeiten. Das Programm unterstützt die Modellierung und Simulation von Produktions- und Logistikprozessen. Integrierte Anwendungsbibliotheken ermöglichen eine effiziente Modellierung, während über Methoden und deren Programmierung mit der Programmiersprache SimTalk weitere Steuerungselemente und Umsetzungen realisiert werden können.⁶⁶⁰ Das Programm ist grundsätzlich bildschirmgeführt und ermöglicht über Drag-and-Drop einen raschen Einstieg in die Modellerstellung. Eine Beschreibung der Grundmaske findet sich im Anhang A.4.

Für den Zeitfortschritt wird in den folgenden Simulationen die zeitorientierte Simulation mit der Verwendung von Schleifen eingesetzt.⁶⁶¹ Die Darstellung dieser Schleifen kann sehr übersichtlich in Flussdiagrammen erfolgen. Zeitorientierte Simulation bedeutet, dass jeder Simulationsdurchlauf einem vordefinierten Zeitabschnitt zugeordnet ist. Dieser Abschnitt wird durchlaufen, wenn die Simulation ausgeführt wird.⁶⁶² Damit die Vorteile von Simulationen besonders in Bezug auf schnellere Ergebnisse genutzt werden können, werden die Simulationen um einen Faktor 10 bis 100 schneller durchgeführt als die Realzeit. Sauerbier beschreibt neben der zeitorientierten Simulation noch die prozessorientierte und die ereignisorientierte Simulation.⁶⁶³ Bei der prozessorientierten Simulation werden zwischen Methoden definierte Wartezeiten durchlaufen in denen beispielsweise parallele Methoden ablaufen können. Der erreichte Prozesszustand muss dazu gesichert und aufrecht erhalten werden.⁶⁶⁴ Bei der ereignisorientierten Simulation wird der Fortschritt der Zeit über die Reihenfolge der einzutretenden Ereignisse mit ihren Zeitbedarfen gesteuert.⁶⁶⁵

4.6 Simulationsdaten

Als Simulationsdaten konnten aus einem laufenden Projekt heraus reale und vertrauenswürdige Materialflussdaten⁶⁶⁶ von zwei Produktionsbereichen eines großen Automobilwerkes genutzt werden. Die Daten sind von einem Premiumhersteller vertraulich zur Verfügung gestellt worden. Sie liegen dem IFT vor, dürfen aber nicht veröffentlicht werden. Einerseits waren dies Daten einer Türenvormontage und andererseits einer Endmontagelinie. Die Taktzeit für die Endmontage beträgt für den ausgewählten Datensatz 90 Sekunden bei der Endmontage. Da ein Großteil der Fahrzeuge vier Türen benötigt, beträgt die Taktzeit der Vormontage

⁶⁵⁹ Die Software Plan Simulation wurde 1986 am IPA in Stuttgart entwickelt, anschließend in Simple++ umbenannt und 2007 von der Siemens AG übernommen. Die Software wird heute von Siemens PLM (Product Lifecycle Management) im Rahmen des Produktportfolios Technomatix weiterentwickelt.

⁶⁶⁰ Vgl. Fil'o u. a. (2013), S. 165 ff.

⁶⁶¹ Vgl. Sauerbier (1999), S. 31.

⁶⁶² Vgl. Sauerbier (1999), S. 31 und Fröming (2009), S. 135 f.

⁶⁶³ Vgl. Sauerbier (1999), S. 11.

⁶⁶⁴ Sauerbier (1999), S. 32.

⁶⁶⁵ Sauerbier (1999), S. 33.

⁶⁶⁶ Laut VDI 3633-3 sollten möglichst immer Realdaten für die Durchführung von Simulationen eingesetzt werden. (Vgl. VDI 3633-3 (1997), S. 4).

mit 48 Sekunden ungefähr die Hälfte der Taktzeit der Endmontage. Die Daten der Vormontage stammen aus einem Fertigungsbereich mit 14 Montagestationen in Ovalform und einer Ausbringungsmenge von 1.096 Türen am Tag in zwei Schichten, d. h. 548 Türen pro Schicht. Je Station werden dabei zwischen zwei und drei Montageteilen benötigt. Bei den Daten für die Endmontage handelt es sich um Materialflussdaten eines Produktionstages im Frühjahr 2015 mit einer Ausbringungsmenge von insgesamt 600 Fahrzeugen in zwei Schichten (also 300 Fahrzeuge pro Schicht). Je Station werden hierbei zwischen drei und fünf Montageteile benötigt. Beide Datensätze (sowohl Türenvor- als auch Endmontage) weisen eine hohe Datengüte auf, sind vollständig und umfassen Informationen zu folgenden Eigenschaften der anzuliefernden Materialien und Module:

- Stückzahl,
- Abmessungen,
- Gewicht,
- Varianz,
- Oberflächenempfindlichkeit,
- elektrostatische Empfindlichkeit,
- Verbauquote und
- Verbauort (Nummer der Montagestation).

Aus den Rohdaten wurden die überarbeiteten Daten erstellt, siehe hierzu auch den Ablauf in Abbildung 4.4. Dazu wurden aus den Rohdaten nicht relevante Informationen ausgeblendet und die verbleibenden Daten in Bezug auf Doppelungen und Extremwerte untersucht. Doppelungen wurden entfernt und Extremwerte im Expertengespräch geklärt und entfernt oder korrigiert. Zusätzlich wurde auf die Fehlerfreiheit der Daten geachtet, indem die Daten der Abmessungen, Varianten, oder Verbauquoten vorab in der Excel-Liste über Methoden auf Sinnhaftigkeit für die Vor- und Endmontage durchsucht wurden. Auch hier erfolgten Expertengespräche mit dem Ziel der Korrektur der fehlerhaften Daten.

4.7 Simulation einer Türenvormontage

Die erste Simulationsstudie wurde, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, für eine Türenvormontage erstellt. Aufbauend auf den Erklärungen in Kapitel 2.1.1 werden in Vormontagebereichen Tätigkeiten ausgeführt, die zu einer Reduzierung der Anzahl der Montagestationen der Endmontage führen und die Komplexität verringern. Der beispielhafte Aufbau einer Türenvormontage in U-Form ist auf Seite 24 abgebildet.

In der Einleitung dieses Kapitels wurde das Ziel der durchzuführenden Simulationsstudie für eine TÜrenvormontage definiert. Dieses Ziel ist der Beweis der Durchführbarkeit der Materialbereitstellung für eine TÜrenvormontage mit den drei neuartigen Logistikkonzepten (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) unter Hinzunahme des Gitterbox-Konzepts für große Bauteile bei den Szenarien 2 - 4. Weiterhin sollen die Simulationläufe als Ergebnis die erforderlichen Betriebsmittel für die Anwendung der neuartigen Logistikkonzepte in einer TÜrenvormontage angeben.

4.7.1 Aufbau des Simulationsmodells

Die Grundlage für das erstellte Simulationsmodell ist eine reale TÜrenvormontage eines deutschen Premiumherstellers aus der auch die verwendeten Materialdaten stammen. Der abzubildende Montageprozess ist eine TÜrenvormontage mit 14 Stationen in U-Form⁶⁶⁷. Der Transport der TÜren von einer zur nächsten Montagestation erfolgt über ein Fördersystem. Die zu simulierenden Logistikprozesse laufen zwischen Wareneingang bzw. dem erstem Lager auf dem Werksgelände und dem Verbauort ab. Damit sind die Modellgrenzen festgelegt und das Modell kann aufgebaut werden. Die Materialflüsse vom Zulieferer ins Werk, welche über die Modellgrenze hinweg stattfinden, werden als gegeben angenommen, indem der Lagerbestand im Modell immer den Sollvorgaben entspricht. Das bedeutet Fehler des Zulieferers oder Logistikdienstleisters bei der Materialversorgung werden ausgeblendet.

Das Simulationsmodell der TÜrenvormontage ist in ein Montagenetzwerk⁶⁶⁸ und vier Unternetzwerke, sogenannte Bereitstellungsnetzwerke, unterteilt. Die Bereitstellungsnetzwerke stellen die vier verschiedenen Bereitstellungskonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF-, Warenkorb- und Gitterbox-Konzept) dar. Das Montagenetzwerk, stellt den Montagebereich dar und steht mit den Bereitstellungsnetzwerken in direkter Verbindung. Im weiteren Verlauf wird auf die unterschiedlichen Netzwerke detailliert eingegangen.

Die Abbildung 4.7 stellt einen Gesamtüberblick über das Montagenetzwerk mit allen Bausteinen, Methoden⁶⁶⁹, Tabellen⁶⁷⁰ und Variablen⁶⁷¹ dar. Im oberen Bereich finden sich links die Materialflüsselemente (Bereitstellung Gitterbox, Bereitstellung FTS, Bereitstellung Riegel und Bereitstellung Warenkorb) und rechts der Montagebereich mit 14 Stationen in U-Form. Oben links ist in der Form einer Stoppuhr der Ereignisverwalter abgebildet, der das Starten und Stoppen sowie Einstellen der Simulationsgeschwindigkeit und der Simulationszeit ermöglicht. Im unteren Bereich sind die erforderlichen Methoden, Tabellen und Variablen zur

⁶⁶⁷ Für das Layout einer Montage in U-Form siehe die Abbildung 2.2

⁶⁶⁸ Im Montagenetzwerk findet die Montage der im Aufbau befindlichen TÜren statt.

⁶⁶⁹ Methoden sind Mini-Programme, die gewisse Teilaufgaben des Simulationsmodells (z. B. Befüllung der Riegelgestelle mit Material), ausführen.

⁶⁷⁰ Tabellen sind Auflistungen, die in dieser Arbeit besonders zur Verknüpfung von Variablen und Bauteilen verwendet werden.

⁶⁷¹ Variablen sind benannte Orte im Speicher des Computers auf dem die Simulation läuft. (Vgl. Bangsow (2011), S. 18) Sie werden als veränderliche Größen zur Ausführung des Simulationsmodells verwendet.

Steuerung des Montageablaufs zu sehen. In der Bildmitte befinden sich Zähler, beispielsweise für die aktuell im Einsatz befindlichen FTF. Die Abbildung 4.7 dient lediglich zur Übersicht des Simulationsmodells, einzelne Details und Beschriftungen werden ab Kapitel 4.7.7 beschrieben.

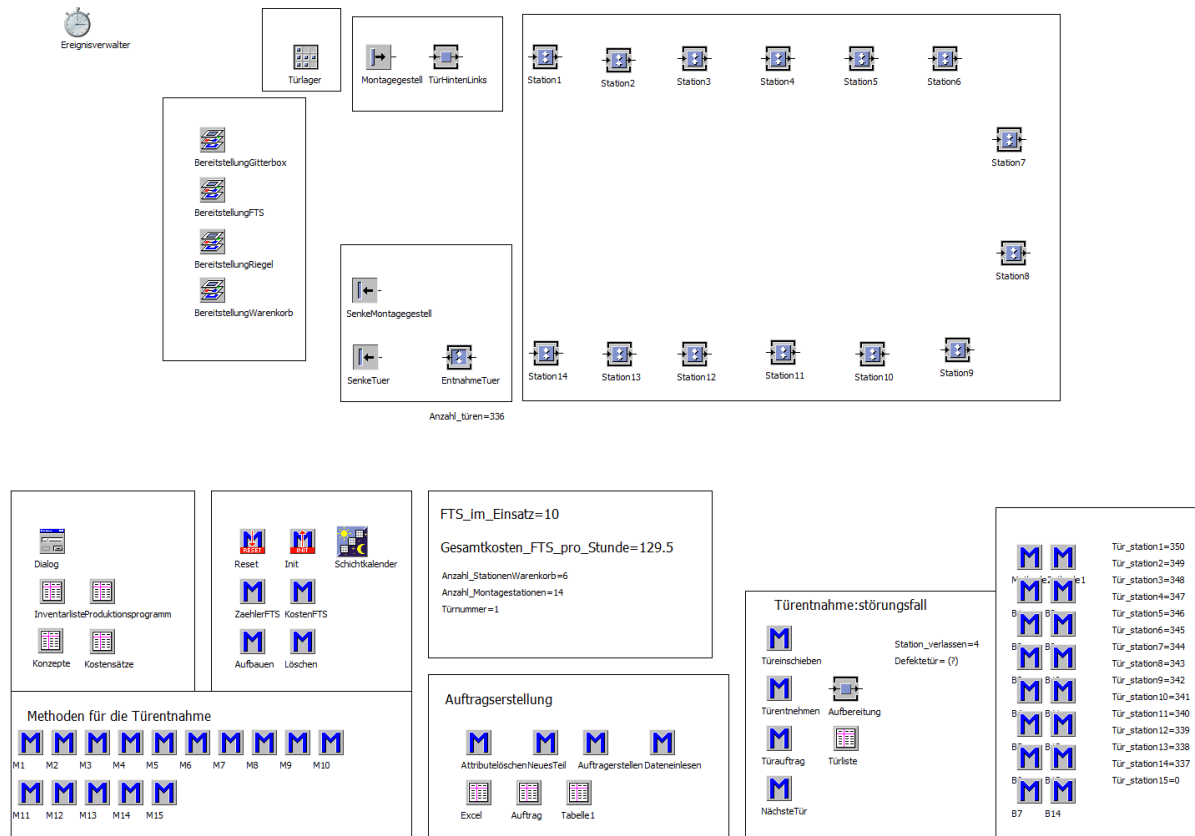


Abbildung 4.7: Übersicht des Montagenetzwerks im Simulationsmodell der Türvormontage

4.7.2 Konzeptauswahl

Die Auswahl der an der jeweiligen Station zum Einsatz kommenden Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF-, Warenkorb- und Gitterbox-Konzept) wird über die sogenannte Konzepttabelle erreicht. Für die Szenarien (1-4)⁶⁷² wird die Tabelle, unter Verwendung von Zufallszahlen für die Zuteilung der Konzepte zu den Stationen, vor jedem Simulationslauf erzeugt. Dementsprechend ist in dieser Tabelle die Anzahl der Montagestationen hinterlegt und für jede Station genau für einen Simulationslauf das ausgewählte Bereitstellungs-konzept eingetragen. Die Tabelle 7 stellt einen Ausschnitt aus einer fertig ausgefüllten Konzepttabelle dar. Auch hier werden für die Identifizierung im Simulationsmodell wieder nummerierte Strings (string 1 - string 2) verwendet. Anhand dieser Tabelle wird im Folgenden das Bereit-

⁶⁷² Die Szenarien werden im Kapitel 4.7.11 im Detail vorgestellt.

stellungskonzept für die jeweilige Station ersichtlich.

Tabelle 7: Ausschnitt aus der Konzepttabelle der Türenvormontage

Montagestation	Logistikkonzept
string 1	string 2
Station 1	Riegelkonzept
Station 2	Riegelkonzept
Station 3	Warenkorb-Konzept
Station 4	Warenkorb-Konzept
Station 5	Warenkorb-Konzept
Station 6	Gitterbox-Konzept
Station 7	Warenkorb-Konzept
Station 8	Warenkorb-Konzept
Station 9	Warenkorb-Konzept
Station 10	Riegelkonzept
Station 11	Riegelkonzept
Station 12	Riegelkonzept
Station 13	Riegelkonzept
Station 14	Riegelkonzept

4.7.3 Überblick über die vier Bereitstellungsnetzwerke

An dieser Stelle sollen die vier Bereitstellungsnetzwerke (Riegelkonzept, Einzel-FTF-, Warenkorb- und Gitterbox-Konzept) kurz in Bezug auf die Layouts und Anbindung an das Montagenetzwerk beschrieben werden. Die Bereitstellungsnetzwerke der drei neuartigen Logistikkonzepte verfügen ebenso wie das Bereitstellungsnetzwerk des Gitterbox-Konzepts jeweils über direkte Verbindungen zu den notwendigen Positionen im Montagenetzwerk. In allen vier Bereitstellungsnetzwerken befindet sich ein Lager, das die für das jeweilige Konzept notwendigen Bauteile bereithält.

In allen vier Bereitstellungsnetzwerken finden sich neben dem Lagerbereich jeweils Methoden für die Beladung der Gestelle (Einzel-FTF-Gestelle,⁶⁷³ Riegelgestelle, Warenkorb-Gestelle und Gitterboxen) sowie Methoden für die Erzeugung und Rückführung der FTF (Einzel-FTF, Unterfahr-FTF, Warenkorb-FTF und Flurförderzeuge). Grundsätzlich könnte das Unterfahr-FTF, siehe Kapitel 3.8.2 alle Gestelle und über eine Anpassung auch die Gitterboxen transportieren. Die namentliche Unterteilung in Einzel-FTF, Unterfahr-FTF, Warenkorb-FTF und Flurförderzeuge für Gitterboxen dient dazu, die für die jeweiligen Logistikkonzepte benötigten Betriebsmittel getrennt voneinander bestimmen zu können. Zudem sind die Bereitstellungswege mit Hin- und Rückfahrt zu den jeweiligen Montagestationen abgebildet. Die Abbildung 4.8(a) zeigt die Materialbereitstellung für das Einzel-FTF-Konzept und die Abbildung 4.8(b) stellt die Materialbereitstellung mittels Riegelkonzept dar. Ein Riegelgestell

⁶⁷³ Anzumerken ist hierbei, dass Einzel-FTF und Einzel-FTF-Gestell ständig eine Einheit bilden und im Gegensatz zu den anderen Gestellen nicht voneinander getrennt werden.

könnte generell auch mehrere Montagestationen beliefern, dies soll hier aber nicht simuliert werden. Weiterhin zeigt die Abbildung 4.8(c) die Bereitstellung mittels Gitterbox-Konzept und die Abbildung 4.8(d) die Bereitstellung mittels Warenkorb-Konzept. Die vier Bereitstellungsnetzwerke werden im Folgenden im Kapitel 4.7.9 mit den jeweiligen Bausteinen und Methoden detailliert erläutert, an dieser Stelle soll nur ein Überblick gegeben werden. Im unteren Bereich befindet sich bei allen vier Bereitstellungsnetzwerken das Lager und im oberen Bereich die Anfahrts- und Abfahrtswege hin zum Montagenetzwerk. Während bei den Konzepten Einzel-FTF (Abbildung 4.8(a)), Riegel (Abbildung 4.8(b)) und Gitterbox (Abbildung 4.8(c)) die Hin- und Rückwege der FTF bzw. Flurförderzeuge (beim Gitterbox-Konzept) in der Form eines umgedrehten U gut zu erkennen sind, befinden sich im Bereitstellungsnetzwerk des Warenkorbkonzepts L-förmige Anfahrtswege und nur ein zentraler Rückweg für alle leeren Warenkörbe, dargestellt unten rechts in der Abbildung 4.8(d).

4.7.4 Randbedingungen

Im weiteren Verlauf werden allgemeine Randbedingungen erläutert, nach denen die Simulationsstudie der Türenvormontage und mit den später beschriebenen Änderungen auch die anderen beiden Simulationsstudien ablaufen. Dazu wurden bestimmte Annahmen für die Simulationsläufe getroffen.⁶⁷⁴ Diese Angaben sollen unter anderem eine Vergleichbarkeit und bessere Einordnung der Simulationsergebnisse in Relation zu aktuellen Produktionsumgebungen ermöglichen. Für die Durchführung der Simulationsläufe der Türenvormontage wurden im Logistikkreis in ARENA2036 gemeinsam folgende Annahmen festgelegt, wobei diese Annahmen auch für heutige Produktionswerke der Premiumhersteller gültig sind:⁶⁷⁵

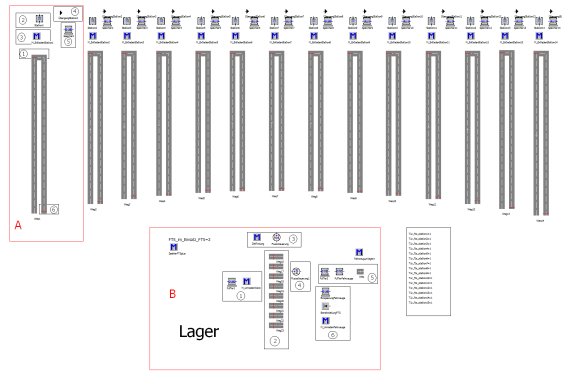
- Annahme 1: Ein Produktionstag bietet 15 Produktionsstunden zu 2 Schichten mit jeweils 7,5 Stunden.⁶⁷⁶
- Annahme 2: Die Taktzeit beträgt 48 Sekunden.
- Annahme 3: Alle zu verbauenden Teile sind im Lager oder den Lagern vorhanden, d. h. sie wurden von den Zulieferern und Dienstleistern korrekt und rechtzeitig angeliefert.
- Annahme 4: Die Bauteile, die an den Montagestationen bereitgestellt werden, sind als fehlerfreie Teile definiert.⁶⁷⁷

⁶⁷⁴ Dieses Vorgehen orientiert sich an anderen wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Themengebiet der Materialflusssimulation in der Materialbereitstellung, für ein Beispiel siehe Gupta u. a. (1999), S. 1069 und Golz u. a. (2012), S. 4.

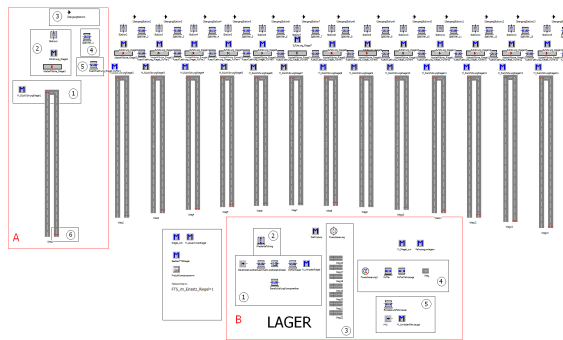
⁶⁷⁵ Diese Annahmen sind aus einer aktuellen Türenvormontage in einem Produktionswerk eines Premiumherstellers entnommen und beschreiben hiermit heutige Gegebenheiten für die Türenvormontage. Dadurch ist eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit realen Produktionssituationen möglich.

⁶⁷⁶ Ähnliche Werte werden auch zur Modellierung in der Arbeit von Grünz verwendet, siehe Grünz (2004), S. 158.

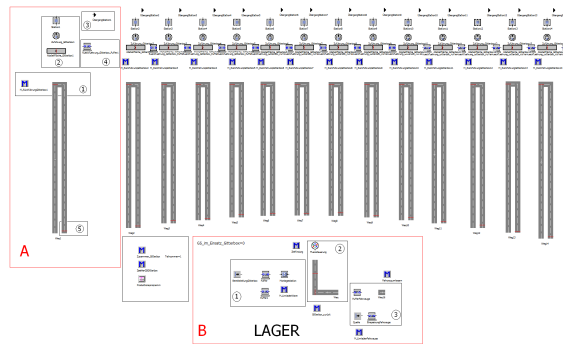
⁶⁷⁷ Eine Ausnahme stellt die Simulation der Störfälle in Kapitel 4.7.13 dar.



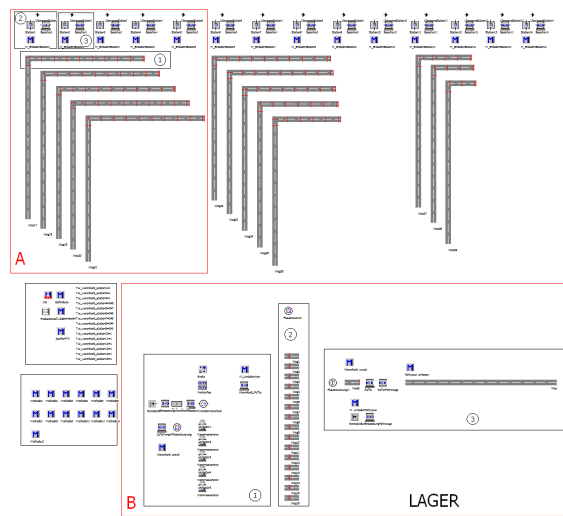
(a) Einzel-FTF-Konzept



(b) Riegelkonzept



(c) Gitterbox-Konzept



(d) Warenkorbkonzept

Abbildung 4.8: Überblick der vier Bereitstellungsnetzwerke

- Annahme 5: Die Belade- und Entladezeiten für die Flurförderfahrzeuge sind deterministisch vorgegeben.
- Annahme 6: Die FTF fahren mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1 m/s.
- Annahme 7: Die Gabelstapler simulierenden FTF, im Folgenden bezeichnet als Flurförderzeuge, fahren mit einer konstanten Geschwindigkeit von 4,5 m/s.
- Annahme 8: Die Verfügbarkeit der Flurförderfahrzeuge beträgt 99 %.
- Annahme 9: Festgelegte Fahrstraßen können von unterschiedlichen Flurförderfahrzeugen gewählt werden und die Flurförderzeuge behindern sich nicht gegenseitig.⁶⁷⁸
- Annahme 10: Das Layout der Produktionshalle inklusive Logistikfläche ist vorgegeben und stützenfrei.
- Annahme 11: Der Abstand zwischen den Montagestationen beträgt 2,5 m.
- Annahme 12: Die Weglängen vom Lagerbereich zu den Montagestationen betragen im Durchschnitt 30 m.

Die Bestimmung der Weglängen wird anhand der Abbildung 4.9 noch einmal für eine Vormontage mit 14 Stationen verdeutlicht. Jedes Bereitstellungsnetzwerk (Riegelkonzept, Einzel-FTF-, Warenkorb- und Gitterbox-Konzept) besitzt im Simulationsmodell eigene Wege zu jeder Montagestation, da in Plant Simulation auf den Fahrwegen keine Überholvorgänge abgebildet werden können. Der durchschnittliche Fahrweg zwischen Lager und Bereitstellort beträgt für alle Stationen und alle Konzepte 30 m, dieser Wert gilt für den Anfahrs- und Rückfahrweg.⁶⁷⁹ Da die FTF bei der Materialbereitstellung per Warenkorbkonzept zusätzlich zum Anfahrtsweg auch noch neben der im Aufbau befindlichen Tür mitfahren, um weiter Material bereitzustellen, sind die Abstände der Montagestationen mit in die Abbildung 4.9 eingezeichnet, die dann auf die gesamte Rundfahrt des FTF beim Warenkorb-Konzept aufsummiert werden. Die zurückgelegten Strecken und dafür benötigten Zeiten sind für die Bestimmung der Anzahl an benötigten FTF im Rahmen der Auswertung relevant.

⁶⁷⁸ Diese Annahme zielt darauf ab, dass in naher Zukunft intelligente Steuerungen für FTF verfügbar sein werden, die teilweise dezentral in Form von Agentensystemen die Fahrten und zugehörigen Routen der FTF bestimmen.

⁶⁷⁹ Die Berechnung der Wegstrecken erfolgte über den Satz des Pythagoras.

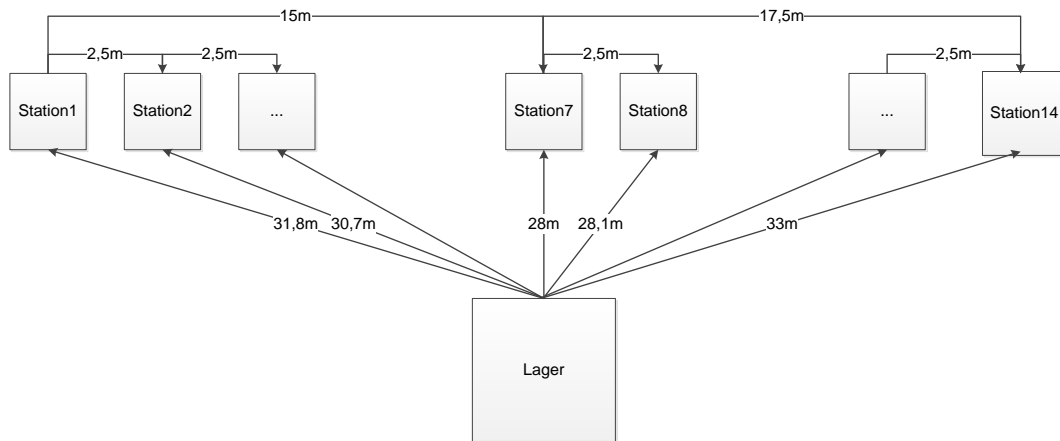


Abbildung 4.9: Weglängen in der Türenvormontage mit 14 Stationen (eigene Darstellung)

4.7.5 Auftragserstellung

Zu Beginn der Durchführung eines Simulationslaufs wird jeder zu fertigenden Tür über eine Methode ein zufälliger Fertigungsauftrag zugeordnet. Dieser Auftrag besteht aus allen Bauteilen, die an der entsprechenden Tür montiert werden sollen. Die Summe aller zu produzierenden Türen und die Montagereihenfolge der Türen wird vor dem Simulationslauf in der sogenannten Auftragstabelle gespeichert. Diese Auftragstabelle kann nur korrekt erstellt werden, wenn zusätzlich zu den Fertigungsaufträgen für jede Montagestation passende und aufbereitete Daten zur Verfügung stehen. Die für diese Arbeit zur Verfügung gestellten Daten beinhalten Angaben zu den Bauteilen inklusive Angabe der Sachnummer und die Information an welcher Montagestation das jeweilige Montageteil verbaut werden soll und erfüllen nach der Aufbereitung, siehe Kapitel 4.6, demnach die Anforderungen. Im Simulationsmodell der Türenvormontage besteht ein Fertigungsauftrag aus verschiedenen Bauteilen, unter anderem dem Türmodul, dem Außenspiegel und den Lautsprechern. Die Bauteile können entweder vom Typ sortenrein (z. B. Dichtungen) oder vom Typ Variantenteil (z. B. Außenspiegel in 120 verschiedenen Ausführungen) sein. Letzteres hat entsprechenden Einfluss auf die notwendige Sequenzierung in der Materialbereitstellung. Die Aufträge werden anhand der Sachnummern der Bauteile zusammengestellt, wobei jeder Auftrag eine individuelle Tür bedeutet. In der Tabelle 8 ist beispielhaft ein Ausschnitt aus der Auftragstabelle zu sehen, wobei jede Zeile (1 bis 11) eine Tür darstellt. In der Abbildung sind die Fertigungsaufträge für die ersten 11 Türen eines Simulationslaufs aufgelistet. Zu sehen sind die Sachnummern der Bauteile, die an den jeweiligen Montagestationen zu montieren sind. Die unterschiedlichen Bauteile (z. B. Türmodul, Außenspiegel) werden im Simulationsmodell über einen nummerierten String (string 5 - string 9) umgesetzt. Anhand dieser Tabelle werden im Verlauf der Simulation die korrekten Bauteile zur richtigen Zeit, für die passende Tür an der jeweiligen

Montagestation bereitgestellt.⁶⁸⁰

Tabelle 8: Ausschnitt aus der Auftragsliste der Türenvormontage

Tür	Türmodul string 5	Außenspiegel string 6	Türgriff string 7	Rollo string 8	Fensterblende string 9
1	A 233 490 890	A 590 756 471	A 430 349 234	A 210 870 345	A 670 066 290
2	A 233 490 556	A 590 756 232	A 430 349 443	A 210 870 312	A 670 066 298
3	A 233 490 232	A 590 756 221	A 430 349 569	A 210 870 234	A 670 066 245
4	A 233 490 321	A 590 756 124	A 430 349 897	A 210 870 678	A 670 066 354
5	A 233 490 235	A 590 756 343	A 430 349 899	A 210 870 567	A 670 066 235
6	A 233 490 334	A 590 756 363	A 430 349 698	A 210 870 755	A 670 066 632
7	A 233 490 435	A 590 756 392	A 430 349 612	A 210 870 553	A 670 066 511
8	A 233 490 656	A 590 756 773	A 430 349 422	A 210 870 366	A 670 066 490
9	A 233 490 289	A 590 765 441	A 430 349 278	A 210 870 567	A 670 066 632
10	A 233 490 277	A 590 756 642	A 430 349 423	A 210 870 765	A 670 066 378
11	A 233 490 267	A 590 756 452	A 430 349 599	A 210 870 908	A 670 066 489

4.7.6 Bauteilbenennung

Die Bauteile aus der Auftragsliste (siehe Tabelle 8) werden über ihren Namen und ihre Sachnummer sowie eine interne Bezeichnung (benutzerdefiniertes Attribut in Plant Simulation) eindeutig definiert. Für eine erleichterte Handhabbarkeit im Simulationsmodell werden die per Auftragsliste zugewiesenen Bauteile als „TeilNummer“ bezeichnet. Weiterhin werden anhand der in Kapitel 4.7.5 beschriebenen Auftragsliste dem Bauteil noch zwei zusätzliche Bezeichnungen zugewiesen, siehe hierzu Abbildung 4.10. Zum einen der „richtige“ Name des zu montierenden Bauteils über den Bezeichner „Bauteil“ und zum anderen die Variante des Bauteils über den Bezeichner „Sachnummer“, wobei jede Variante eines Bauteils eine andere Sachnummer besitzt. Die Kombination aus TeilNummer, Bauteilname und Sachnummer ist im Simulationsmodell ausschlaggebend für die richtige Zuordnung eines Bauteils zum passenden Türauftrag. Somit entspricht beispielsweise die rot umkreiste Sachnummer in der Detailansicht des Bauteils Teil5, siehe Abbildung 4.10, dem Türmodul der ersten Tür aus der Auftragsliste, siehe Tabelle 8.

⁶⁸⁰ Anhand der abweichenden Sachnummern (A ...) in diesem kleinen Ausschnitt ist die Vielfalt der jeweiligen Bauteile zu erkennen.

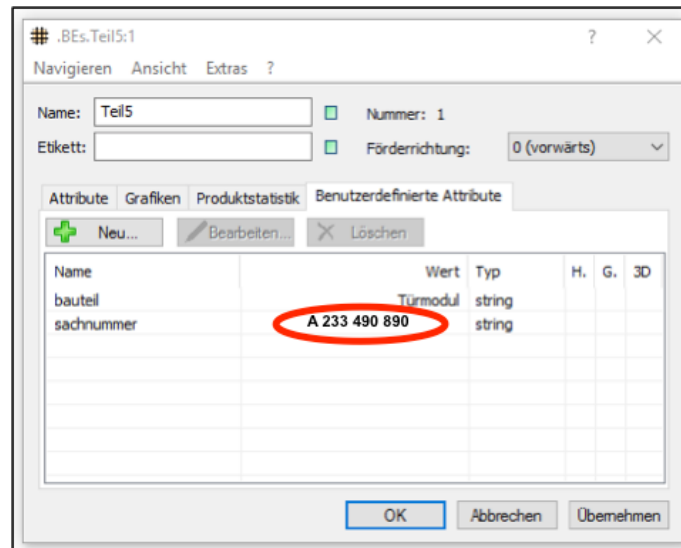


Abbildung 4.10: Detailansicht Bauteil

4.7.7 Simulationsmodell des Montagenetzwerks der Türenvormontage

Das Montagenetzwerk bildet die Montagevorgänge für die 14 Stationen der Türenvormontage, siehe Abbildung 4.11, ab. Mit Hilfe der Punkte ① bis ⑤ wird der Ablauf der Simulation im Montagenetzwerk nachfolgend beschrieben. Für die Betrachtung der Türenvormontage in dieser Arbeit und die durchgeführten Simulationsläufe wurde das Modell auf Basis der vorhandenen Produktionsdaten und in Hinsicht auf die angestrebte Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse mit dem Modelllayout für 14 Montagestationen in U-Form verwendet, siehe ③.⁶⁸¹ Die Verbindung des Montagenetzwerks mit den vier Bereitstellungsnetzwerken erfolgt über die jeweiligen Übergangspunkte in den Bereitstellungsnetzwerken, siehe ⑤. Die benötigten Türen werden in einem Türlager, siehe ①, bereitgestellt. Weiterhin gibt es eine Quelle zur Erstellung der Montagegestelle, siehe ②, auf denen die Türen die Montagestationen durchlaufen. Die fertigen Türen werden, nachdem alle Montagestationen durchlaufen werden, zusammen mit dem Montagegestell über eine Senke, siehe ④, aus dem System entfernt. Der allgemeine Ablauf der Montage wird im Folgenden erläutert.

⁶⁸¹ Grundsätzlich wurde das Simulationsmodell für die Türenvormontage so aufgebaut, dass die Anzahl der Montagestationen in einem Bereich von 1 bis 15 Stationen frei gewählt werden kann. Dies soll eine einfache Weiterverwendbarkeit im Rahmen nachfolgender Forschungsarbeiten ermöglichen. Dazu werden die Stationen nach Eingabe des gewünschten Wertes automatisch mit allen Verbindungen (Kanten) und Einstellungen (Bearbeitungszeit, Montageliste,...) im Montagenetzwerk aufgebaut.

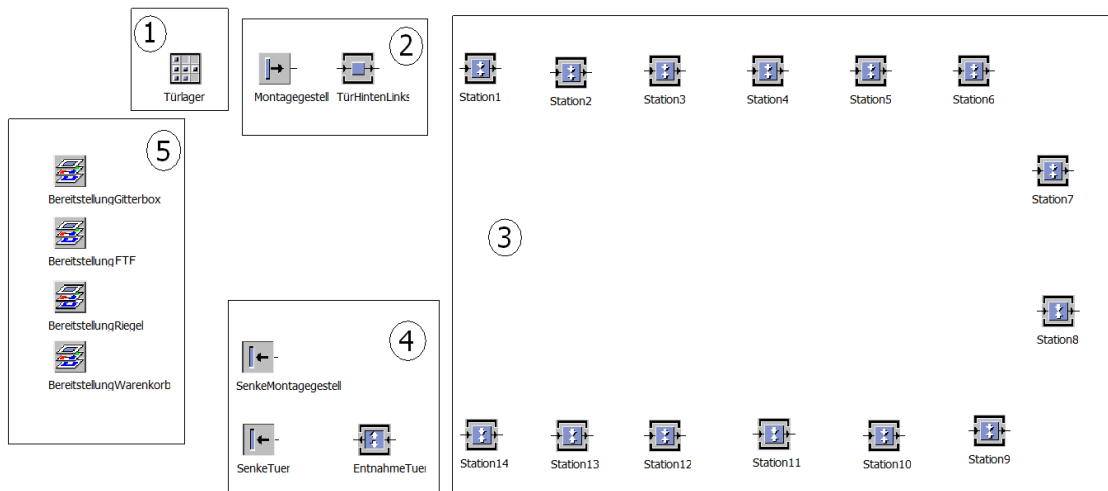


Abbildung 4.11: Übersicht des Montagenetzwerks der Türevormontage

4.7.8 Montageablauf

Zu Beginn eines Simulationslaufs werden die leeren Türgestelle erzeugt und in einem Lager gepuffert. Jeder Türrahmen verfügt anhand der weiter oben beschriebenen Auftragstabelle über eine Auflistung der benötigten Bauteile für den folgenden Montageablauf. Aufgrund der unterschiedlichen Bauteilvarianten mit ihren jeweiligen Sachnummern ist jeder Türauftrag individuell. Die Simulation startet am Punkt des Aufsetzens der ersten Tür der Auftragstabelle auf das Montagegestell. Danach durchläuft jedes Montagegestell mit dem darauf befindlichen Türrahmen die Montagestationen. An jeder Montagestation werden die zu montierenden Bauteile durch eines der zuvor in der Konzepttabelle ausgewählten Bereitstellungsnetzwerke angeliefert und anschließend an der Tür montiert. Sobald die Tür alle Montagestationen durchlaufen hat, wird sie vom Montagegestell getrennt und sowohl die fertige Tür als auch das Montagegestell verlassen über eine Senke das System. Durch einen an der Senke platzierten Zähler ist sowohl während des Simulationslaufs als auch am Ende jedes Simulationslaufs die Menge der montierten Türen ersichtlich. In den nächsten Abschnitten wird auf die einzelnen Bereitstellungsnetzwerke und die damit abgebildeten Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF-, Warenkorb- und Gitterbox-Konzept) näher eingegangen.

4.7.9 Beschreibung der Bereitstellnetzwerke

Zuerst erfolgt die Beschreibung des Bereitstellnetzwerks des **Einzel-FTF-Konzepts**. Dieses neuartige Logistikkonzept stellt bei der Simulation der Türevormontage die Bereitstellung eines Bauteils mittels Einzel-FTF an einer Montagestation dar. Das Konzept wird in den Simulationsläufen sowohl für die sortenreine Bereitstellung als auch für die Bereitstellung von variantenreichen Bauteilen verwendet. Die Abbildung 4.12 gibt einen Überblick über den Aufbau des Bereitstellnetzwerks im Simulationsprogramm. Es können die Bereiche A

und B, jeweils dargestellt durch die roten umrundeten Buchstaben in der Abbildung, unterteilt werden. Während im Bereich A, der Hin- und Rückweg der Einzel-FTF, sowie die Entladung der Einzel-FTF dargestellt ist, finden sich im Bereich B die Beladung der Einzel-FTF mit Bauteilen und die Einspeisung bzw. Rückführung der leeren Einzel-FTF. Beide Bereiche und deren Umsetzung im Simulationsmodell werden im Folgenden noch detaillierter erläutert.

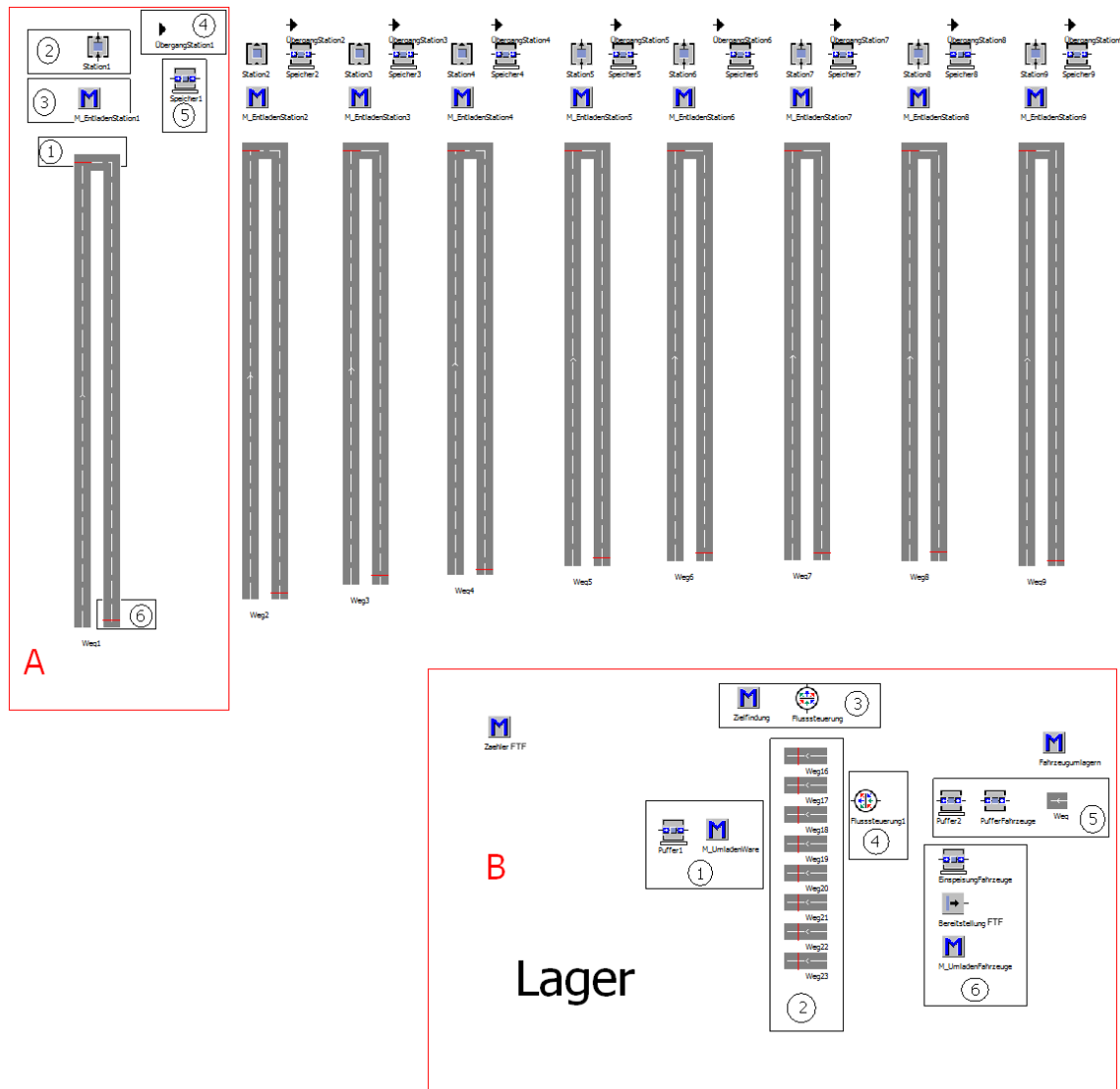


Abbildung 4.12: Bereitstellnetzwerk des Einzel-FTF-Konzepts im Simulationsmodell

Zuerst soll der Bereich B in Abbildung 4.13 beschrieben werden: Sobald eine Tür in den Montageprozess einfährt, wird jeweils an der vorherigen Montagestation überprüft, um welche Tür es sich laut Auftragsliste, siehe Kapitel 4.7.5, handelt und ob die folgende Montagestation mittels Einzel-FTF beliefert werden muss. Ist dies der Fall, wird das entsprechende Bauteil für diese Tür aus dem Lager entnommen und in den Puffer, siehe ①, umgeladen. Die

Einzel-FTF werden über eine Quelle⁶⁸² erzeugt, siehe ⑥, und über einen Puffer, siehe ④, und eine Flusssteuerung, siehe ⑤, auf die Fahrwege, siehe ②, weitergeleitet. Sobald einer der Sensoren auf den Fahrwegen (dargestellt als roter Strich) überfahren wird, erfolgt eine Umladung des im Puffer befindlichen Bauteils auf das Einzel-FTF. Mit Hilfe der Flusssteuerung, siehe ③, wird das Einzel-FTF anschließend zur richtigen Montagestation weitergeleitet. Dies geschieht über eine Methode mit dem Namen Zielfindung und eine Abfrage des Bauteils, das sich auf dem Einzel-FTF befindet.

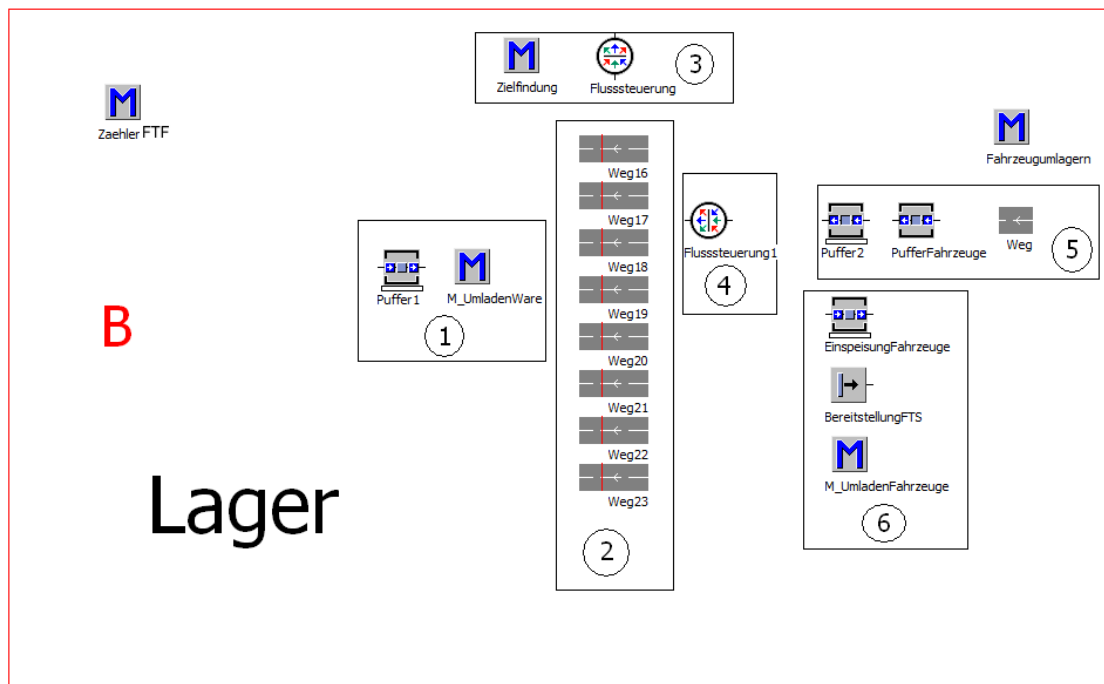


Abbildung 4.13: Detailansicht Bereich B des Einzel-FTF-Konzepts

⁶⁸² Die Programmierung für die Erzeugung von Einzel-FTF ist derart gestaltet, dass nur dann ein weiteres Einzel-FTF erzeugt wird, wenn die Verladestation frei ist und sich kein Einzel-FTF mehr im Puffer befindet. Während des Simulationslaufs werden Einzel-FTF, die bereits eine Montagestation beliefert haben, zum Puffer zurückgeführt und stehen für den nächsten Transportauftrag bereit. Durch diese Programmierung wird nur die Anzahl an Einzel-FTF im Simulationsmodell erstellt, die auch benötigt wird.

Im Bereich A, siehe Detailansicht in Abbildung 4.14, fahren die Einzel-FTF zur Materialbereitstellung an die zugeordnete Montagestation. Überfährt das Einzel-FTF den Sensor, siehe ①, dann wird eine Methode, siehe ③, aufgerufen. Diese Methode vergleicht das Bauteil, das sich auf dem Einzel-FTF befindet mit dem Auftrag der Tür, die sich im Montagenetzwerk an der Montagestation befindet. Stimmt das aufgeladene Bauteil mit dem Türauftrag an dieser Montagestation überein, wird das Bauteil auf die Einzelstation, siehe ②, umgeladen und über den Übergang, siehe ④, an der Montagestation im Montagenetzwerk bereitgestellt. Das leere Einzel-FTF fährt weiter und wird sobald der Sensor, siehe ⑥, überfahren wird, ins Lager, den Bereich B, umgeladen.

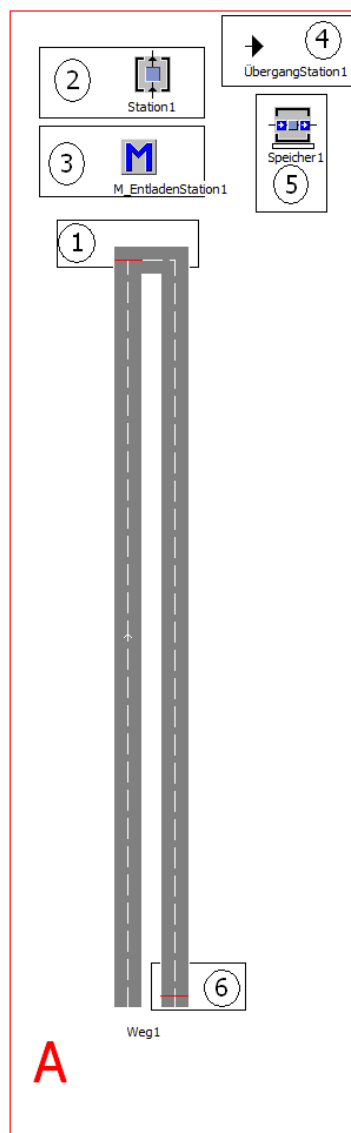


Abbildung 4.14: Detailansicht Bereich A des Einzel-FTF-Konzepts

Als zweites erfolgt die Beschreibung des Bereitstellnetzwerks des **Riegelkonzepts**. Im Si-

mulationsmodell kann ein Riegelgestell 64 KLT⁶⁸³ (Grundmaße 600 x 400 mm) mit den darin befindlichen Bauteilen aufnehmen. Das Konzept ist im Simulationsmodell sowohl für die sortenreine Bereitstellung als auch für die variantenreiche Bereitstellung einsetzbar. Die Befüllung der Riegelgestelle wird auf Basis der Produktionsaufträge, die in der Auftragsliste angegeben sind, vorgenommen. Die Abbildung 4.15 zeigt das Bereitstellnetzwerk des Riegelkonzepts im Simulationsmodell. Dabei können, ähnlich wie beim Einzel-FTF-Konzept, zwei Bereiche unterteilt werden. Erstens die Materialbereitstellung der Riegelgestelle im Bereich A und zweitens die Beladung der Riegelgestelle sowie die Einspeisung und Rückführung der Unterfahr-FTF im Bereich B.

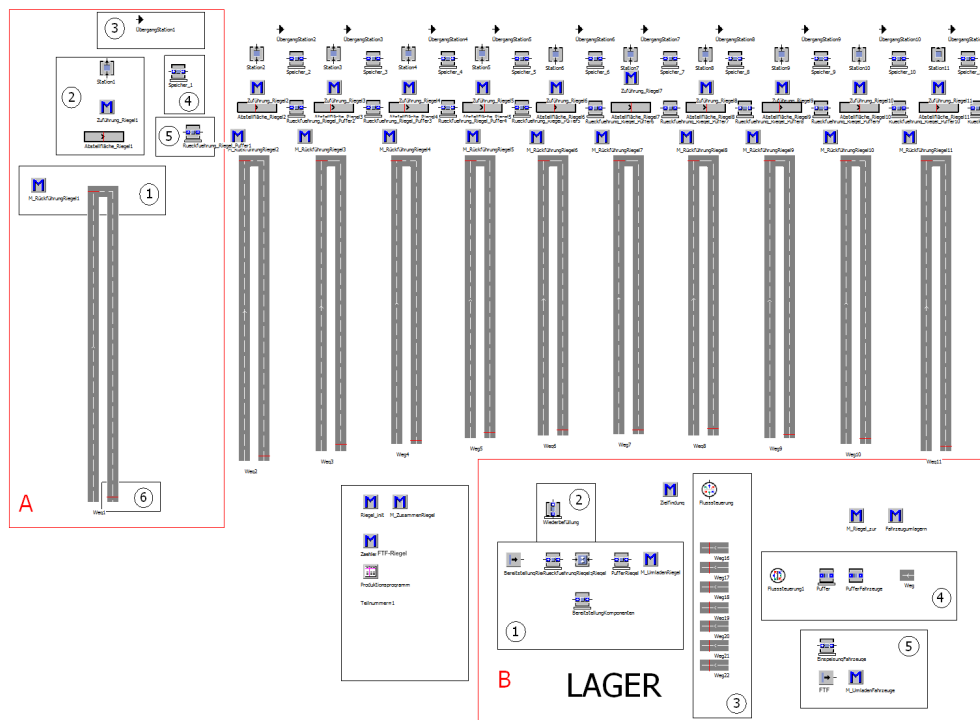


Abbildung 4.15: Bereitstellnetzwerk des Riegelkonzepts im Simulationsmodell

In Abbildung 4.16 ist der Bereich B des Riegelkonzepts, in dem die Beladung der Riegelgestelle, siehe ①, stattfindet, zu sehen. Hierbei werden die Riegelgestelle, auf Basis der Auftragsliste, mit den notwendigen Materialien für die nächsten Türen beladen. Riegelgestelle, die aus dem Montagebereich zurückkommen, werden in einem weiteren Bereich, siehe ②, direkt wieder beladen. Die Zeit für die Befüllung beträgt ca. 15 Minuten, da ein einzelner Beladevorgang mit 14 Sekunden pro Ladungsträger zurückhaltend geschätzt wurde.⁶⁸⁴ Wie im Kapitel 3.7.1 beschrieben, können die Materialien unter Verwendung des Mini-RBG direkt am Verbauort in der gewünschten Reihenfolge entnommen und dem Montagemitarbeiter an-

⁶⁸³ Diese Zahl weicht vom Wert des Prototyps des Riegelgestells (40 KLT mit Grundmaß 600 x 400 mm), siehe Kapitel 3.8.1, ab. Der Hintergrund hierfür ist, dass der Prototyp aus statischen und experimentellen Gründen bisher noch nicht die volle Größe des Riegelgestells erreicht hat.

⁶⁸⁴ Bei einer Beladezeit von 14 Sekunden und einer Belademenge von 64 KLT ergeben sich 14,93 Minuten Beladezeit.

geboden werden. Deshalb wird bei der Materialbereitstellung per Riegelkonzept, aufgrund des anderen Zeitrahmens für die Sequenzierung, vom Bereitstellungsprinzip JIRT gesprochen.⁶⁸⁵ Über eine Quelle werden die notwendigen Unterfahr-FTF erzeugt, siehe ⑤, und über einen Puffer und eine Flusststeuerung, siehe ④, auf die Fahrwege weitergeleitet, siehe ③. Fährt ein Unterfahr-FTF über einen der Sensoren, dann wird das beladene Riegelgestell am Unterfahr-FTF angekoppelt und mit Hilfe der Flusststeuerung, siehe ③, zum richtigen Ziel geleitet. Die Zielfestlegung geschieht wieder über eine Methode Zielfindung in Kombination mit einer Abfrage des Inhalt des Riegels.

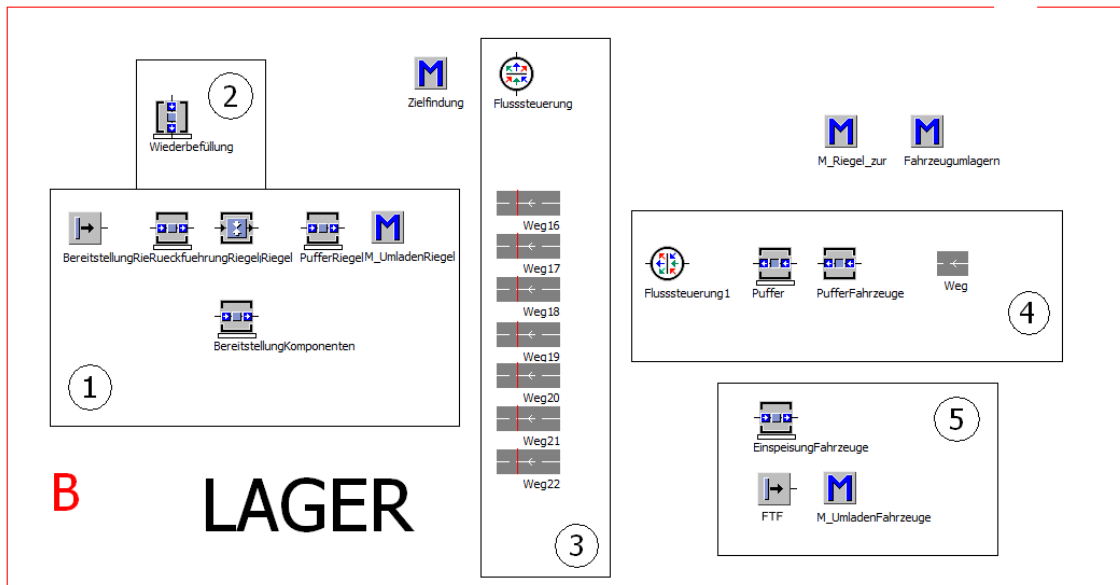


Abbildung 4.16: Detailansicht Bereich B des Riegelkonzepts

Die Abbildung 4.17 stellt eine Detailansicht des Bereichs A für die Entladung der Riegelgestelle am Verbauort dar. Nachdem das Unterfahr-FTF mit dem Riegelgestell die entsprechende Montagestation erreicht hat, wird das Riegelgestell abgekoppelt. Dies erfolgt in der Simulation durch das Überfahren eines Sensors, siehe ①. Dies löst eine Methode aus, die wiederum das Umladen des Riegelgestells auf eine gedachte Förderstrecke, siehe ②, durchführt. Sobald eine Tür zur Bearbeitung an dieser Montagestation im Montagenetzwerk bereitsteht, wird mit Hilfe einer weiteren Methode, siehe ②, das Riegelgestell nach dem benötigten Bauteil durchsucht⁶⁸⁶ und über die Einzelstation und den Übergang, siehe ③, an der Montagestation das Bauteil bereitgestellt. Sobald alle Materialien eines Riegelgestells am Verbauort entnommen wurden oder sich nur noch unbrauchbare Bauteile im Riegelgestell befinden, ist dieses bereit für den Rücktransport zum Lagerbereich. Dazu wird es im Puffer, siehe ⑤, zwischengelagert bis es vom Unterfahr-FTF abgeholt wird. Dies geschieht über einen Austausch des nächsten vollen Riegelgestells mit dem leeren Riegelgestell. Danach fährt das

⁶⁸⁵ Vgl. Wehking und Popp (2015a), S. 339.

⁶⁸⁶ Dies geschieht über ein Abgleichen der Sachnummer des Turauftrags mit den Sachnummer der Bauteile im Riegelgestell. Die Bezeichnung der Bauteile muss nicht mehr abgeglichen werden, da das Riegelgestell aufgrund der vorgeschalteten Methoden im Bereich B an die korrekte Montagestation gefahren wurde.

Unterfahr-FTF mit dem leeren Riegelgestell zurück und wird über einen Sensor, siehe ⑥, ins Lager, den Bereich B, überführt.

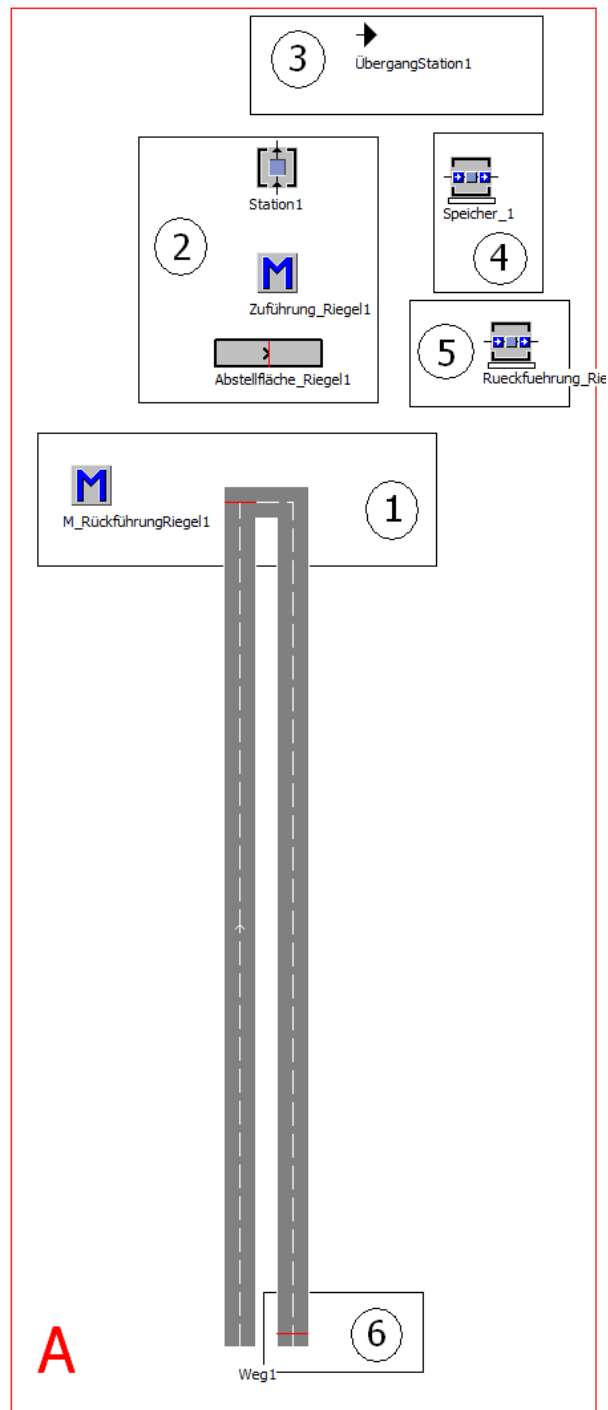


Abbildung 4.17: Detailansicht Bereich A des Riegelkonzepts

Der grundsätzliche Ablauf in den beiden Bereitstellnetzwerken ist beim Einzel-FTF-Konzept und beim Riegelkonzept ähnlich, jedoch beim Riegelkonzept komplexer, da ein Riegelgestell eine große Menge von Ladungsträgern (bis zu 64 KLT) aufnimmt. Außerdem kehrt das

Unterfahr-FTF beim Riegelkonzept direkt nach dem Bereitstellen des gefüllten Riegelgestells am Verbauort zum Lagerbereich zurück, während das Gestell in Verbindung mit dem Mini-RBG die Bauteile bereitstellt. Beim Einzel-FTF-Konzept wartet das FTF bis die Materialentnahme durch den Montagemitarbeiter erfolgt ist und transportiert den Ladungsträger dann direkt zurück zum Lagerbereich.

Der generelle Ablauf der Materialbereitstellung per Riegelkonzept wird in Abbildung 4.18 anhand eines Flussdiagrammes veranschaulicht.⁶⁸⁷ In einer Schleife (For $i = 1$ to 14) werden die 14 Montagestationen der Türenvormontage durchlaufen und abgefragt, ob das Riegelkonzept für die Materialbereitstellung an der jeweiligen Station laut Konzepttabelle ausgewählt ist. Für den Fall einer negativen Antwort, d. h. keine Belieferung der betreffenden Montagestation per Riegelkonzept, wird eine Methode der anderen Bereitstellungskonzepte (Einzel-FTF-, Warenkorb oder Gitterbox-Konzept) aufgerufen. Im Falle einer positiven Antwort, d. h. Belieferung der betreffenden Station per Riegelkonzept, werden die als nächstes an dieser Montagestation zu verbauenden Bauteile (max. 64 KLT des Grundmaßes 600 x 400 mm) in das Riegelgestell eingelagert. Anschließend wird das Riegelgestell zuerst am Übergabepuffer für die Station bereitgestellt und danach vom Unterfahr-FTF zur Station transportiert. Ab diesem Zeitpunkt kann die Station mit den entsprechenden Bauteilen aus dem Riegelgestell versorgt werden. Diese Schleife ist im Simulationsmodell nur für das Riegelkonzept notwendig. Bei den Bereitstellnetzwerken der drei anderen Logistikkonzepte (Einzel-FTF-, Warenkorb oder Gitterbox-Konzept) wird schon bei der Beladung mit Material im jeweiligen Lager die zu beliefernde Montagestation, bzw. die erste zu beliefernde Montagestation beim Warenkorb, bestimmt.⁶⁸⁸

⁶⁸⁷ Ähnliche Vorgehensweisen finden sich in Shannon (1975), S. 25.

⁶⁸⁸ Das bedeutet, bei der Beladung mit einem Bauteil für Station 7 wird beispielsweise dem Einzel-FTF direkt mitgeteilt, dass es zur Station 7 fahren muss, um das Bauteil dort bereitzustellen.

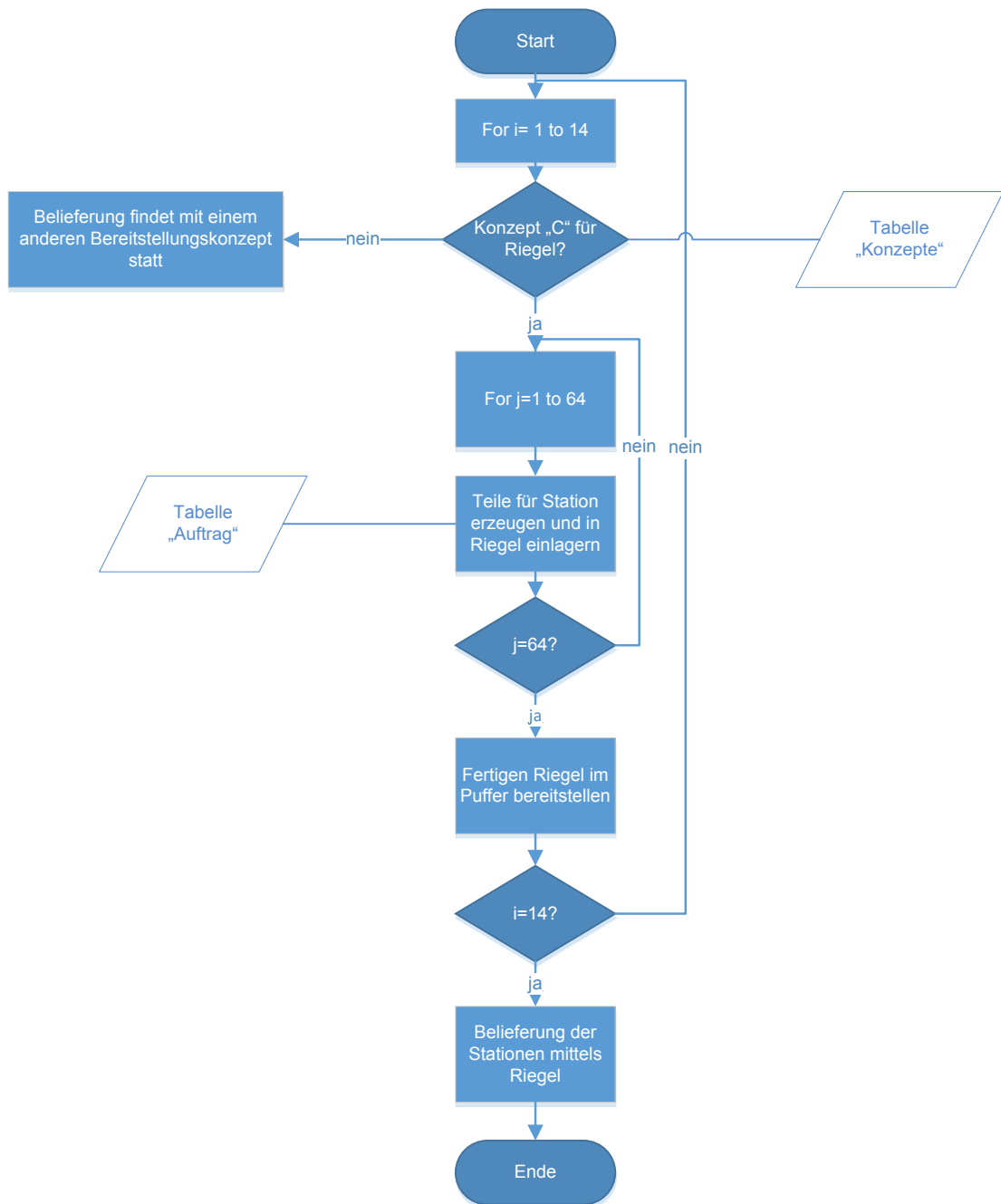


Abbildung 4.18: Flussdiagramm Erstbelieferung Riegelkonzept

Als drittes wird das Bereitstellnetzwerk des **Warenkorb-Konzepts** beschrieben. Die Materialbereitstellung kann bei Verwendung dieses Konzepts sowohl für sortenreine als auch für variantenreiche Bauteile erfolgen. Weiterhin kann ein Warenkorb unterschiedliche Anzahlen von Teilen aufnehmen, je nachdem wie viele Montagestationen er beliefert. Dabei muss beim Warenkorb-Konzept, zusätzlich zum Vermerk in der Konzepttabelle, die Gesamtanzahl der

Montagestationen, die jeweils mit einem Warenkorb beliefert werden sollen⁶⁸⁹, vor dem Simulationslauf eingegeben werden.⁶⁹⁰ Die Abbildung 4.24 zeigt die beiden Bereiche A und B der Modellierung des Warenkorb-Konzepts. Im Bereich A werden die Warenkörbe entladen und im Bereich B kommissioniert und auf bereitgestellte Warenkorb-FTF verladen.

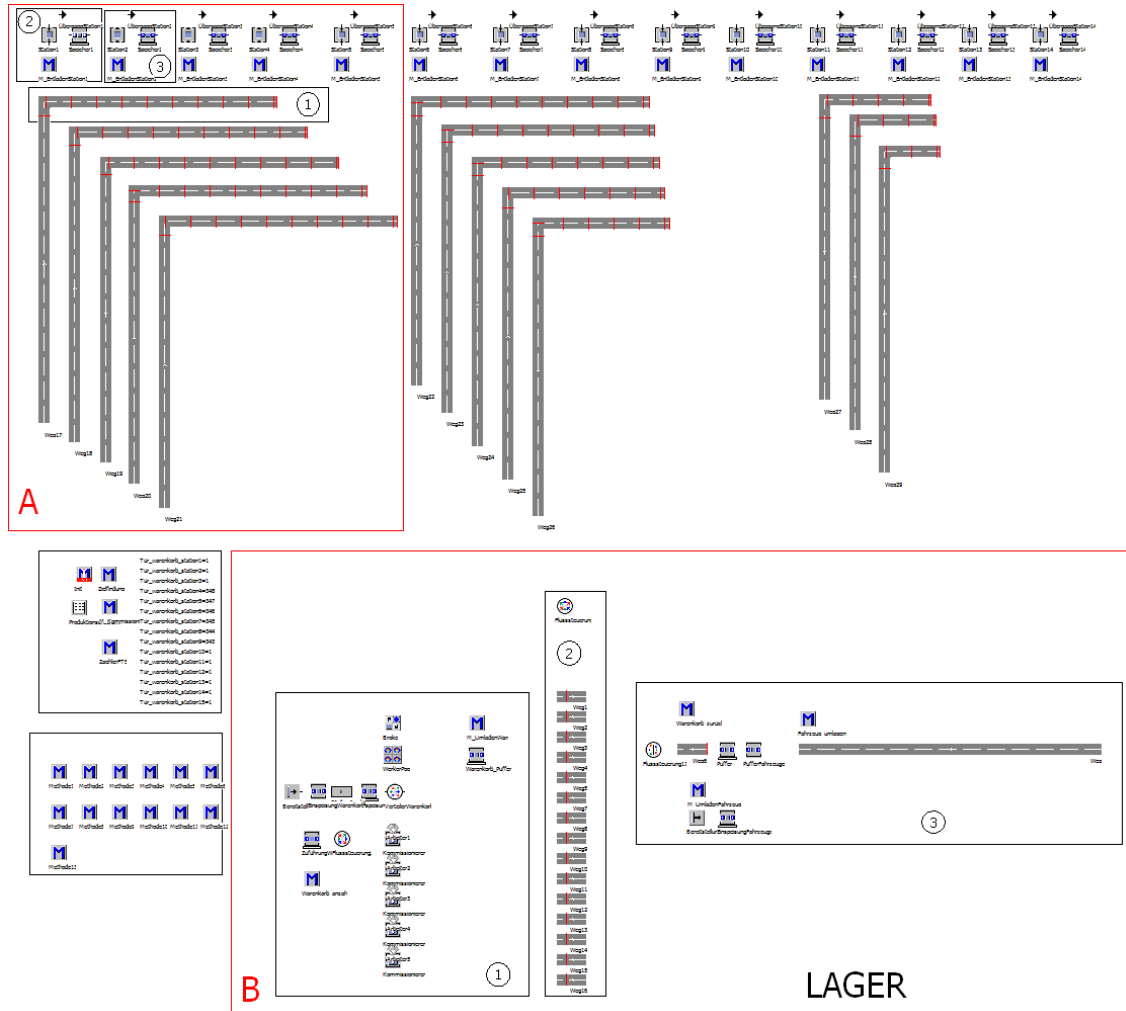


Abbildung 4.19: Bereitstellnetzwerk des Warenkorb-Konzepts im Simulationsmodell

Die Abbildung 4.20 stellt eine Detailansicht des Bereichs B des Bereitstellnetzwerks des Warenkorb-Konzepts dar. Zuerst findet eine Kommissionierung statt, bei der die Warenkörbe mit den benötigten Bauteilen bestückt werden, siehe ①. Im Modell sind, lediglich aus Gründen der Vereinfachung der Modellierung, manuelle Kommissionierplätze eingebaut. Diese übernehmen die abzubildende Aufgabe der Zusammenstellung von Warenkörben, die beim Warenkorb-Konzept, siehe Kapitel 3.7.3 von einem AKL durchgeführt wird. Anschließend

⁶⁸⁹ Als untere Begrenzung für die Materialbereitstellung per Warenkorbkonzept wurde aus Auslastungsgründen (Minimalbelastung) der Wert 3 gewählt, während als Obergrenze maximal 10 Montagestationen ausgewählt werden können.

⁶⁹⁰ Sollen 6 Montagestationen direkt hintereinander mit einem Warenkorb beliefert werden, so ist in das Dialogfenster die Anzahl 6 einzutragen. Bei der Aufteilung auf 2 Warenkörbe, von denen jeder 3 Montagestationen beliefert, ist die Zahl 3 einzutragen.

werden die kommissionierten Warenkörbe kurzzeitig zwischengelagert. Über eine Quelle werden Warenkorb-FTF, siehe ③, erzeugt, die den Transport der Warenkörbe zum Verbauport übernehmen. Sobald ein leeres Warenkorb-FTF einen der Sensoren auf den Fahrwegen, siehe ②, überfährt, wird der kommissionierte Warenkorb vom Warenkorb-FTF mitgenommen und, unter Verwendung der Flusssteuerung, an der passenden Montagestation bereitgestellt. Dazu wird die erste Montagestation bestimmt, ab der die Materialbereitstellung per Warenkorb erfolgen soll. Damit unterschiedliche Kombinationen bei der Materialbereitstellung per Warenkorb simuliert werden können, wurden mehrere Fahrwege angelegt, um ein gegenseitiges Behindern von unterschiedlichen Warenkörben auf den Fahrwegen zu verhindern.⁶⁹¹

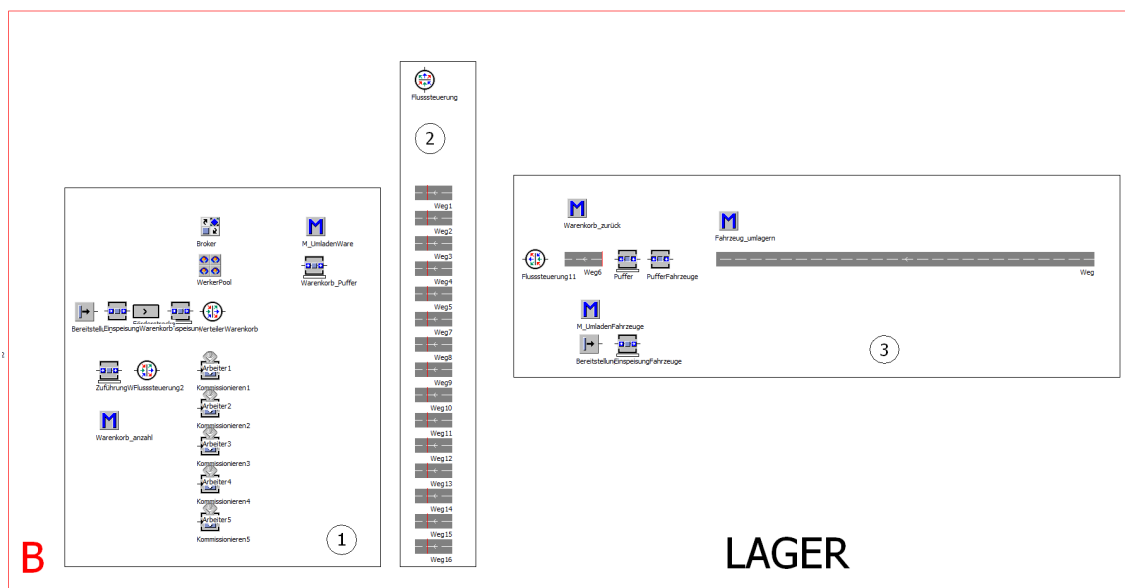


Abbildung 4.20: Detailansicht Bereich B des Warenkorb-Konzepts

Eine Detailansicht des Bereichs A ist in Abbildung 4.20 zu sehen. Das Warenkorb-FTF kommt mit dem kommissionierten Warenkorb aus dem Lagerbereich und überquert den Sensor ① auf dem Fahrweg, um die Bereitstellung in einer Methode anzukündigen. Sobald das Warenkorb-FTF den zweiten Sensor überfährt, wird über eine weitere Methode, siehe ②, das benötigte Bauteil auf die Montagestation umgeladen und im Montagenetzwerk bereitgestellt. Danach fährt das Warenkorb-FTF mit dem Warenkorb weiter zur nächsten Station, die durch den nächsten Sensor dargestellt wird. Wird dieser überfahren, erfolgt das Umladen des nächsten Bauteils an die Station über die nächste Methode, siehe ③, und das Bauteil wird im Montagenetzwerk bereitgestellt. Je nachdem, welche Montagestationen mittels Warenkorb versorgt werden, erfolgt eine Bereitstellung der Bauteile über die Auslagerung aus dem Warenkorb an den entsprechenden Sensoren. Sind alle Bauteile aus dem Warenkorb entnommen worden, erfolgt der Rücktransport zum Lagerbereich.

⁶⁹¹ In der Realität können sich die Warenkörbe teilweise auf einem Fahrweg überholen, bisher ist dies im Simulationsprogramm Plant Simulation nicht darstellbar.

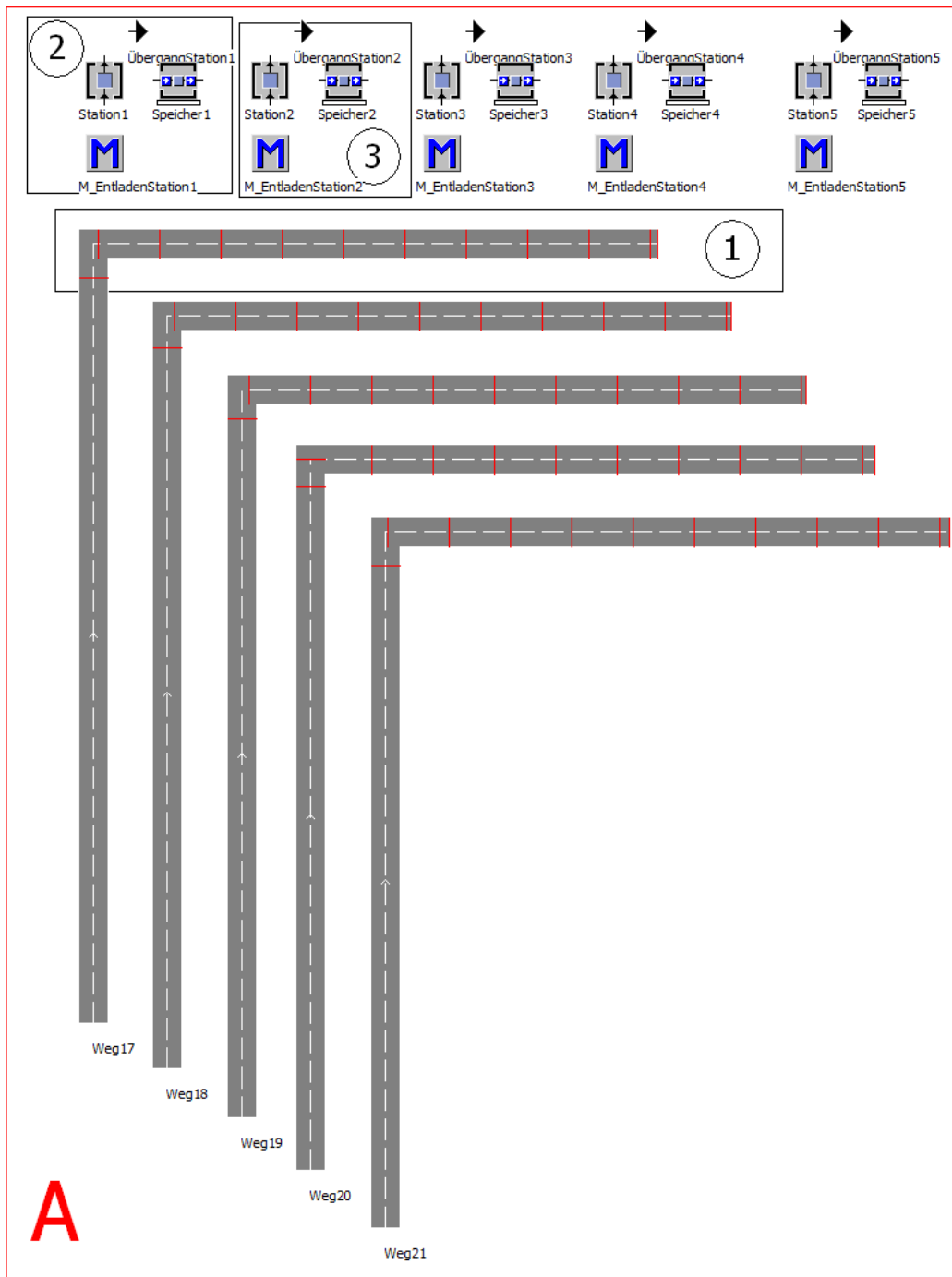


Abbildung 4.21: Detailansicht Bereich A des Warenkorb-Konzepts

Als viertes erfolgt die Beschreibung des Bereitstellnetzwerks des **Gitterbox-Konzepts**. Für dieses Konzept wird in den Simulationsmodellen eine Gitterbox jeweils mit einer maximalen Kapazität von 50 identischen Bauteilen angenommen.⁶⁹² Dementsprechend wird das Gitterbox-Konzept, im Gegensatz zu den anderen drei neuartigen Logistikkonzepten (Riegel-

⁶⁹² Der Wert 50 wurde anhand von Recherchen in dieser Arbeit aufgestellt und im Logistkarbeitskreis in ARE-NA2036 von den anderen Teilnehmern bestätigt.

konzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept), nur für die Bereitstellung von sortenreinen Bauteilen verwendet. Der Grund hierfür ist der Entfall der sonst notwendigen Vorsequenzierung des Materials in den Gitterboxen. Der Transport der Gitterbox zur Montagestation erfolgt in der Realität meist mittels Gabelstapler oder Routenzug. Im Simulationsmodell wird der Transport per Gabelstapler mit einem universellen Flurförderzeug nachgestellt. Die Abbildung 4.22 stellt einen Überblick des Bereitstellnetzwerks dar. Wieder können zwei Bereiche unterteilt werden. Erstens die Materialbereitstellung der Gitterboxen im Bereich A und zweitens die Beladung der Gitterboxen sowie die Einspeisung und Rückführung der Flurförderzeuge im Bereich B.

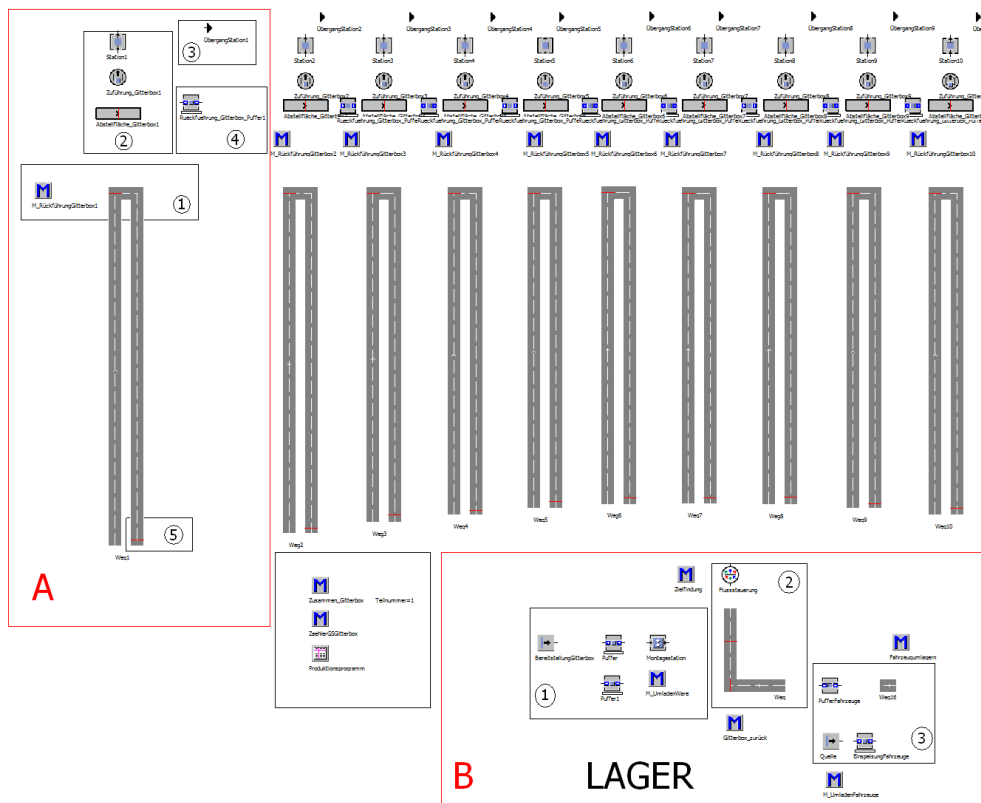


Abbildung 4.22: Bereitstellnetzwerk des Gitterbox-Konzepts im Simulationsmodell

In Abbildung 4.23 ist eine Detailansicht des Bereichs B für die Beladung der Gitterboxen, siehe ①, zu sehen. Über eine Quelle werden die Gitterboxen erstellt und mittels einer Methode mit den nächsten 50 Bauteilen bestückt. Sobald das angeforderte Flurförderzeug den Sensor, siehe ②, überfährt, wird die beladene Gitterbox aufgeladen und mit Hilfe der Flusssteuerung zum richtigen Ziel gesendet. Dies geschieht, wie bei den vorherigen Konzepten, über die Methode Zielfindung. Die Bereitstellung der erforderlichen Flurförderzeuge wird über eine Quelle, siehe ③, erreicht, bevor diese an den Fahrwegen, siehe ②, übergeben werden. Im Bereich der Fahrzeugbereitstellung, siehe ③, findet über einen Puffer auch das wiederholte Lossenden der schon eingesetzten Flurförderzeuge statt.

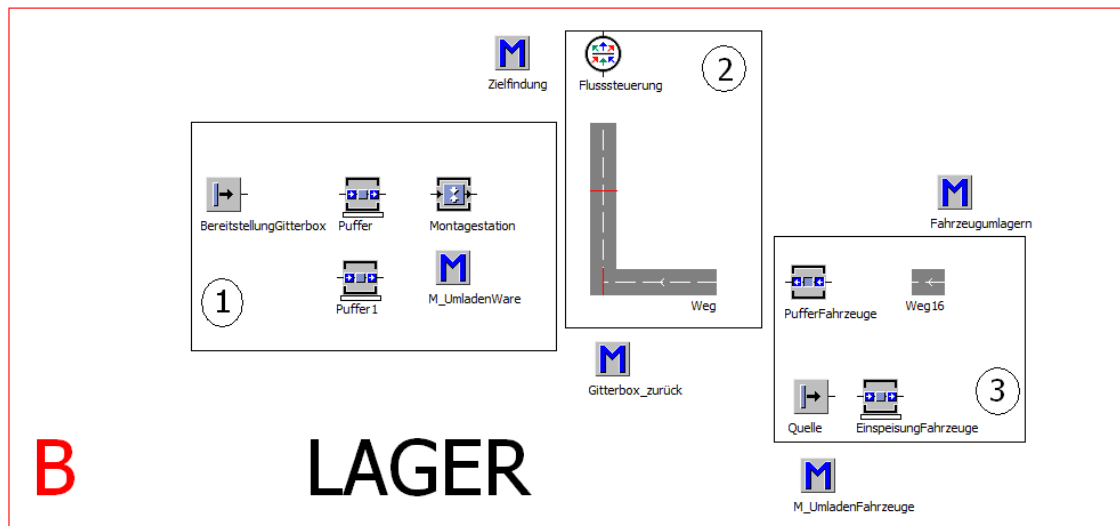


Abbildung 4.23: Detailansicht Bereich B des Gitterbox-Konzepts

Die Abbildung 4.24 stellt eine Detailansicht des Bereichs A mit der Materialbereitstellung per Gitterbox am Verbauort dar. Die Modellierung der Entladung der Gitterbox ist vom Aufbau identisch zur Entladung der Riegelgestelle. Eine Ausnahme stellt lediglich die Tatsache dar, dass die Gitterbox nicht über eine Methode geleert wird, sondern über eine Umladestation und dann an der Montagestation im Montagenetzwerk wieder bereitgestellt wird, siehe ②. Die Vereinfachung ist an dieser Stelle möglich, da die Gitterboxen nur sortenreine Bauteile beinhalten und somit jedes Teil, unter der Beachtung der Verbauquote, an jeder Tür montiert werden kann. Sobald die Gitterbox vollständig entleert wurde, wird diese in einem Puffer, siehe ④, zwischengelagert. Anschließend erfolgt der Rücktransport der Gitterbox. Das nächste Flurförderzeug, das eine neue, beladene Gitterbox auf der Stellfläche ablädt, nimmt die leere Gitterbox auf und befördert sie zurück zum Lager.

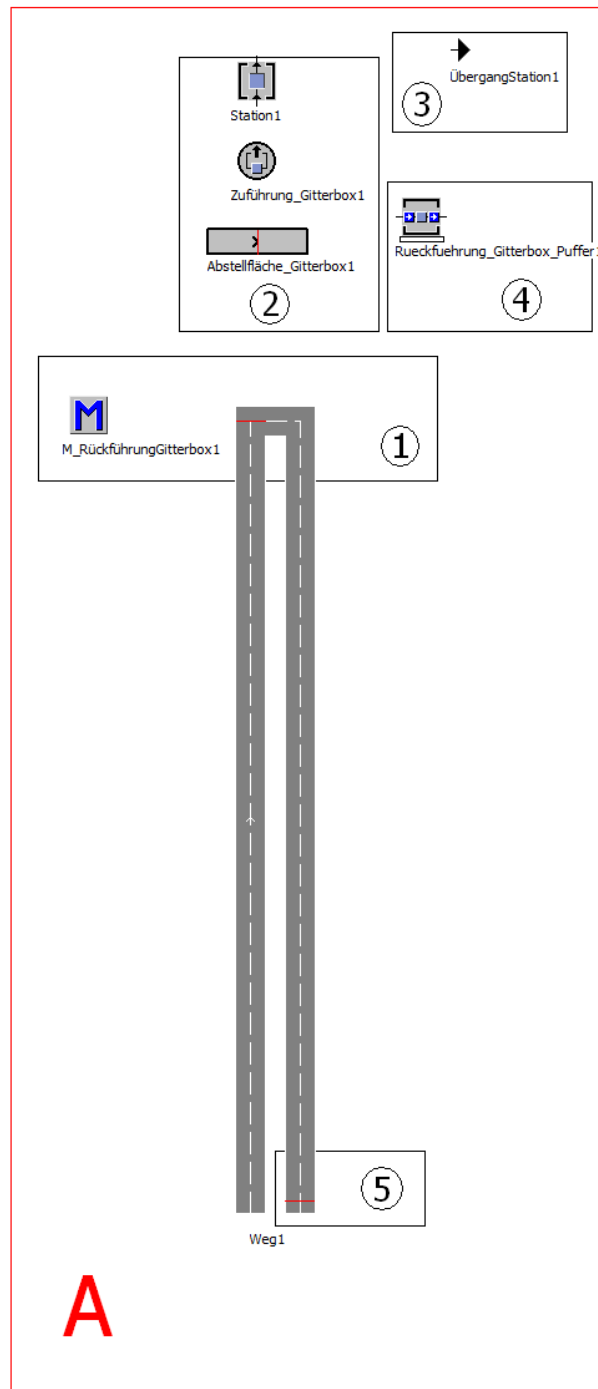


Abbildung 4.24: Detailansicht Bereich A des Gitterbox-Konzepts

4.7.10 Untersuchungsgegenstände

Die folgenden Untersuchungsgegenstände werden im Rahmen der Simulationsstudie der Türenvormontage analysiert:

1. Beweis der Funktionalität der neuartigen Logistikkonzepte inklusive Gitterbox-Konzept

durch Erreichen der, laut Daten, vorgegebenen Menge an produzierten Türen.⁶⁹³

2. Bestimmung der Anzahl an insgesamt benötigten Betriebsmitteln: Damit ein gegenseitiger Vergleich der Szenarien möglich ist, wurde bei jedem Simulationslauf die Anzahl von Einzel-FTF, Warenkorb-FTF, Unterfahr-FTF, Riegelgestellen, Gitterboxen und Warenkörben bestimmt⁶⁹⁴, die benötigt werden, um die Materialbereitstellung gewährleisten zu können.

Die Tabelle 9 stellt die laut Daten erreichbaren Produktionsmengen der TÜRENVORMONTAGE in Verbindung mit weiteren Spezifikationen des Simulationsmodells, siehe Kapitel 4.7.4 übersichtlich dar:

Tabelle 9: Durchsatz der TÜRENVORMONTAGE auf Basis der Daten (Stand heute)

Anzahl der Montagestationen	14
Taktzeit	48 s
Länge des Produktionstages	15 h
Stunden pro Schicht	7,5 h
Durchsatz/Produktionsmenge pro Schicht (laut Daten)	548 Türen
Maximale Produktionsmenge pro Produktionstag (laut Daten)	1.096 Türen

4.7.11 Durchführung der Simulationsläufe

Ein Simulationslauf besteht in allen drei Simulationsstudien (Türevor-, End- und Matrixmontage) aus 2 Schichten. Diese Schichten werden mit Hilfe eines Schichtkalenders in Plant Simulation simuliert. Die erste Schicht läuft von 6 Uhr bis 14 Uhr mit einer halben Stunde Pause. Die zweite Schicht beginnt um 14 Uhr und endet um 22 Uhr und beinhaltet ebenso eine halbe Stunde Pause. Während der Pausen werden keine Montagearbeiten an den Türen getätigt. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wurden pro Simulationsstudie 1.000 Simulationsläufe getätigt. Weiterhin sind in den Simulationsstudien immer die 4 Szenarien für unterschiedliche Verteilungen der neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF-, Warenkorb- und Gitterbox-Konzept) simuliert worden. Die Verteilungen der jeweiligen Szenarien führt zu folgenden Absolutwerten in Bezug auf die belieferten Montagestationen mit den jeweiligen Konzepten, siehe Abbildung 4.25. Im Szenario 1 werden 5 Stationen mit dem Einzel-FTF-Konzept versorgt und 9 Stationen per Riegelkonzept. Hingegen werden nur 3 Stationen beim Szenario 2 mit dem Riegelkonzept beliefert, 6 Stationen mit dem Warenkorb-Konzept und 5 Stationen mit dem Gitterbox-Konzept. Im Szenario 3 kommen alle Logistikkonzepte zum Einsatz, wobei das Einzel-FTF-Konzept 2 Stationen mit Material versorgt, das

⁶⁹³ Anhand der Produktionsmenge kann das Erreichen des geforderten Materialflusses gezeigt werden. Grund hierfür ist, dass die Türen nur dann zur nächsten Station weitertransportiert werden, wenn alle benötigten Bauteile an einer Station verbaut wurden.

⁶⁹⁴ Gezählt werden die Betriebsmittel jeweils an den Einspeisepunkten im Simulationsmodell.

Riegelkonzept 7 Stationen, das Warenkorb-Konzept 3 Stationen und das Gitterbox-Konzept 2 Stationen. Abschließend erfolgt die Belieferung von 9 Stationen per Riegelkonzept und 5 Stationen der Türenvormontage per Gitterbox-Konzept im Szenario 4. Anhand der farbigen Balken ist in Abbildung 4.25 die Anzahl der belieferten Stationen pro Konzept zusätzlich graphisch in Form von Säulen dargestellt. Damit ist beispielsweise beim Szenario 1 die Anzahl der Stationen, die vom Einzel-FTF-Konzept beliefert werden, mit 5 Stationen angegeben.

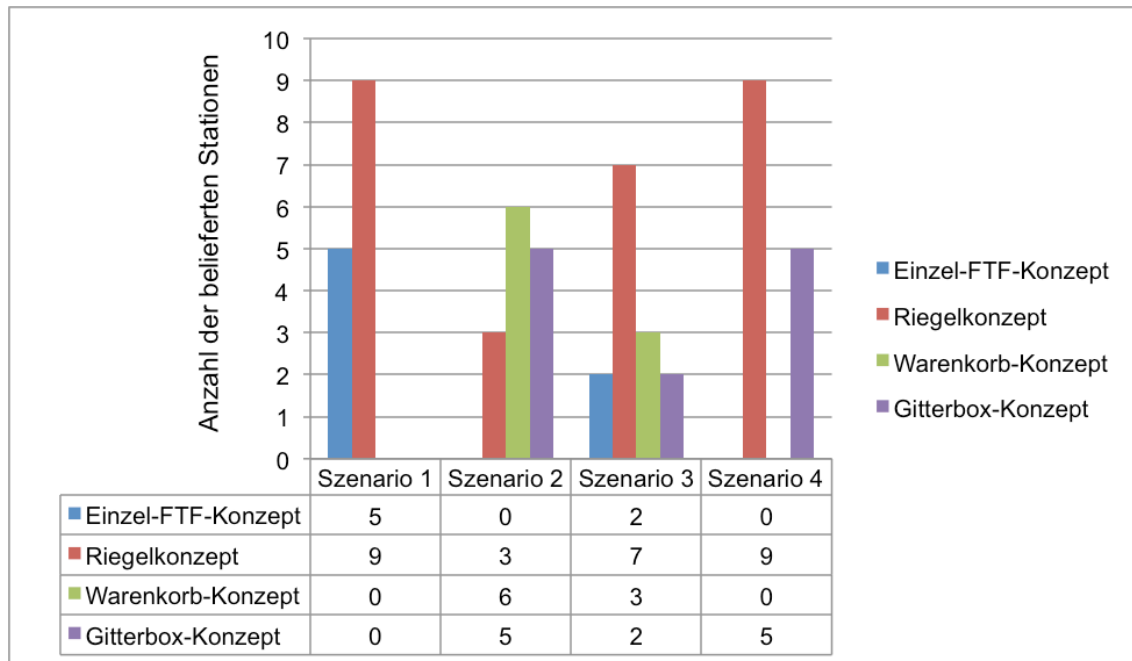


Abbildung 4.25: Belieferte Konzepte je Station bei den Szenarien der Türenvormontage

4.7.12 Ergebnisse und Auswertung

In allen Simulationsläufen der Türenvormontage und damit auch bei allen 4 Szenarien wurde eine Produktionsmenge von 548 Türen pro Schicht erreicht. Weiterhin wurde pro Produktionstag (mit zwei Schichten) eine Produktionsmenge von 1.096 Türen erreicht. Alle geforderten Bauteile wurden zeitgerecht zur passenden Montagestation transportiert, womit die geforderte Materialversorgung stattgefunden hat. Da die erreichte Produktionsmenge gleich der vorgegebenen Produktionsmenge laut Daten ist, konnte gezeigt werden, dass die drei neuartigen Logistikkonzepte, unter Hinzunahme des Gitterbox-Konzepts bei den Szenarien 2 - 4, die Materialversorgung einer Türenvormontage sicherstellen können. Die Funktionalität der neuartigen Logistikkonzepte konnte somit durch das Erreichen des geforderten Materialflusssatzes bewiesen werden.

Neben der Auswertung der Simulationsläufe in Bezug auf die Umsetzbarkeit der Materialversorgung mit den neuartigen Logistikkonzepten, erfolgte die Bestimmung der benötigten Betriebsmittel. Je nach eingesetztem Szenario wurden, die in Tabelle 10 aufgelisteten Betriebs-

mittel verwendet. Beim Szenario 1 wurden 5 Einzel-FTF, 1 Unterfahr-FTF und 17 Riegelgestelle für den Materialfluss der Türenvormontage benötigt. Beim Szenario 2 muss ebenso 1 Unterfahr-FTF vorhanden sein, jedoch nur 5 Riegelgestelle, 1 Gitterbox-Flurförderzeug, 6 Warenkorb-FTF und 8 Warenkorb-Gestelle. Das Szenario 3 kommt mit 4 Warenkorb-Gestellen und 3 Warenkorb-FTF sowie einem Gitterbox-Flurförderzeug aus, benötigt aber zusätzlich zum Szenario 2 noch 13 Riegelgestelle, 1 Unterfahr-FTF und 2 Einzel-FTF. Beim Szenario 4 wird neben einem Unterfahr-FTF und 17 Riegelgestellen 1 Gitterbox-Flurförderzeug eingesetzt.

Zusammenfassend eignet sich das Szenario 3 besonders gut für die Materialbereitstellung in der Türenvormontage. Grund hierfür ist die geringere Zahl an benötigten Riegelgestellen als bei den Szenarien 1 und 4 sowie weniger benötigte Warenkorb-FTF als beim Szenario 2. Lediglich müssen zusätzlich zum Szenario 2 und 4 noch Einzel-FTF verwendet werden. Grundsätzlich muss die Auswahl eines Konzepts für den jeweiligen Anwendungsfall jedoch auf Basis der örtlichen Gegebenheiten und möglicherweise schon vorhandenen Betriebsmittel zuerst analysiert und anschließend bestimmt werden.

Tabelle 10: Auswertung der benötigten Betriebsmittel für den Materialfluss in der Türenvormontage

Betriebsmittel	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Einzel-FTF	5	-	2	-
Unterfahr-FTF	1	1	1	1
Riegelgestelle	17	5	13	17
Gitterbox-Flurförderzeuge	-	1	1	1
Warenkorb-FTF	-	6	3	-
Warenkorb-Gestelle	-	8	4	-
gefertigte Türen pro Schicht	548	548	548	548
gefertigte Türen pro Produktionstag	1.096	1.096	1.096	1.096

Zu den Ergebnissen der benötigten FTF muss weiterführend erklärt werden, dass in der Betriebssituation der Ausfall eines FTF nicht dazu führen darf, dass die Leistung der Materialbereitstellung nicht mehr erbracht werden kann. Deshalb muss nach Ermessen des verantwortlichen Planers oder Produktionsleiter zusätzlich zu der in den Simulationsläufen ermittelten Mindestanzahl an FTF noch eine Anzahl an Sicherheits-FTF (z. B. 10 %) addiert werden oder andere Fördermittel bereitgehalten werden (z. B. manuell geführte Handhubwagen⁶⁹⁵). Weiterhin sollten bestimmte Ausfallszenarien für FTS vorab in Bezug auf die jeweilige Anlage untersucht werden, um passende Absicherungsmaßnahmen für einen Ausfall einrichten zu können.⁶⁹⁶

⁶⁹⁵ Zur Erklärung von Handhubwagen siehe Kapitel 2.4.2 und die weiterführenden Informationen dort.

⁶⁹⁶ Vgl. Ullrich (2014), S. 148.

- Ausfall der FTS-Steuerung: Ein Notsystem muss vorhanden sein, das die Aufgaben des ausgefallenen Systems übernimmt.
- Ausfall der Stromversorgung: Eine Notstromversorgung muss aktiviert werden können.

4.7.13 Simulation von Störfällen

Im Simulationsmodell der Türenvormontage wurde zusätzlich die Möglichkeit geschaffen, Störfälle zu simulieren. Dabei soll der Fall analysiert werden, dass eine im Aufbau befindliche Tür beschädigt wird oder Material fehlt bzw. falsch oder gar nicht geliefert wurde und Nacharbeit erforderlich ist. Da die gesamte Türenvormontage aus 14 Stationen besteht, wurde die Station 4 im Simulationsmodell zum Ausschleusen der defekten Tür vorbereitet. Diese Positionierung der Ausschleusemöglichkeit wurde im Logistkarbeitskreis in ARENA2036 zur Diskussion gestellt und hat sich durchgesetzt. Dies bedeutet, dass eine Tür, die in den Montagestationen 1 bis 4 beschädigt wurde, an der Station 4 ausgeschleust wird. Das Ziel der Modellierung einer Ausschleusestation war die Untersuchung der Veränderungen in der Materialbereitstellung. Die Türentnahme als Störfall soll zeigen, dass es mit den neuartigen Logistikkonzepten möglich ist, eine defekte Tür kurzfristig auszuschleusen und nach der Reparatur wieder einschleusen zu können. Dies stellt eine Alternative zur heute verbreiteten Nacharbeit, die teuer und zeitaufwendig ist, dar.⁶⁹⁷ Dabei wird die Tür von der Ausschleusestation auf eine Nacharbeitsstation umgeladen. Gleichzeitig wird eine Ersatztür, die auf der Nacharbeitsstation bereitgestellt war, zur Station 5 weitergeleitet. Diese Ersatztür hat die Stationen 1 bis 4 in der Vergangenheit schon durchlaufen und wurde dann an der Station 4 ausgeschleust und bereitgehalten. Nachdem der Defekt an der beschädigten Tür behoben wurde, kann die Tür an der darauffolgenden Montagestation 5 wieder eingeschleust werden und die restlichen Montagestationen werden durchlaufen. Tritt der Fehler hingegen erst nach Station 4 auf, so wird die Tür bis zum Ende der Vormontage (Station 14) weitertransportiert.

4.7.14 Durchführung der Störfall-Simulation

Für die Simulation des Störfalls wurde im Logistkarbeitskreis das Szenario 3 (14 % Einzel-FTF-Konzept, 50 % Riegelkonzept, 22 % Warenkorb-Konzept und 14 % Gitterbox-Konzept) ausgewählt, da bei diesem Szenario alle neuartigen Logistikkonzepte inklusive des Gitterbox-Konzepts zum Einsatz kommen. Durch ein erfolgreiches Reagieren aller Logistikkonzepte auf die Störfallsituation, soll der Beweis für die Fähigkeit kurzfristiger Resequenzierungen für die neuartigen Logistikkonzepte geliefert werden. Die Auftragstabelle mit den Türaufträgen wurde während der 100 Störfall-Simulationsläufe jeweils zu Beginn der Simulation erstellt. Basierend auf dem Szenario 3 wurde die Verteilung der Logistikkonzepte, wie in Konzepttabelle 11 aufgelistet, angenommen.

⁶⁹⁷ Vgl. Richter (2006), S. 100.

Tabelle 11: Konzepttabelle für die Simulation von Störfällen

Stationsnummer	Logistikkonzept
Montagestation 1	Gitterbox-Konzept
Montagestation 2	Einzel-FTF-Konzept
Montagestation 3	Gitterbox-Konzept
Montagestation 4	Gitterbox-Konzept
Montagestation 5	Riegelkonzept
Montagestation 6	Riegelkonzept
Montagestation 7	Riegelkonzept
Montagestation 8	Riegelkonzept
Montagestation 9	Warenkorb-Konzept
Montagestation 10	Warenkorb-Konzept
Montagestation 11	Warenkorb-Konzept
Montagestation 12	Riegelkonzept
Montagestation 13	Riegelkonzept
Montagestation 14	Riegelkonzept

Das Auftreten eines Fehlers wird über die Methode „Türentnehmen“ simuliert. Diese Methode entnimmt zu zufälligen Zeitpunkten in den Simulationsläufen, jedoch mindestens mit 15 Minuten Abstand, eine Tür an der Montagestation 4 und lädt diese auf die Nacharbeitsstation um. Nach Ablauf der vorgegebenen Nacharbeitszeit, die zufällig zwischen 5 Minuten und 15 Minuten⁶⁹⁸ zugeteilt wird, erfolgt das Wiedereinschleusen der reparierten Tür über die Methode „Türeinschieben“ an der Montagestation 5. Anschließend wird die nachbearbeitete Tür bis zum Ende der Vormontage weiterbearbeitet.

4.7.15 Ergebnisse der Störfall-Simulation

In den Simulationsläufen wurden pro Schicht 548 Türen produziert und somit über einen Produktionstag (2 Schichten) 1.096 Türen. Damit sind die Ergebnisse der Simulation eines Störfalls genauso hoch, wie bei den Simulationsläufen ohne Störfall und ebenso bei den bereitgestellten Daten. Dadurch kann bewiesen werden, dass die Bewältigung einer begrenzten Zahl von Störfällen je Produktionstag aus Sicht der Materialbereitstellung über die neuartigen Konzepte möglich ist. Hierfür müssen Ersatztüren bereitstehen, die anstatt der ausgefallenen oder beschädigten Tür ab dem nächsten Takt weiter montiert werden können. Zwei Anmerkungen sind den Ergebnissen jedoch hinzuzufügen. Erstens darf ein Störfall nur alle 15 Minuten eintreffen, damit die Nacharbeitszeit stets kleiner oder maximal genauso groß ist. Andernfalls sinkt die Produktionsmenge. Zweitens führen längere Nacharbeitszeiten als die angenommen maximalen 15 Minuten zu einem Absinken der produzierten Menge

⁶⁹⁸ Diese Zeitangaben für die Nachbearbeitung einer Tür wurde auf Basis von Expertenschätzungen in ARE-NA2036 aufgestellt.

an Türen.⁶⁹⁹

4.8 Simulation einer Endmontagelinie

Im Zuge der Bearbeitung wurden, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, drei Simulationsstudien durchgeführt. Die zweite Simulationsstudie bildet eine Automobilendmontage nach aktuellem Layout in Linienform, jedoch unter Verwendung des Montage- und Logistik-Groß-FTF für den Transport der Karossen durch die Montage, ab. Aus Gründen der Vereinfachung wird angenommen, dass die Montage von Bauteilen an den Montagestationen jeweils im gestoppten Zustand stattfindet. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, ist grundsätzlich auch eine Montage denkbar, wenn das Montage- und Logistik-Groß-FTF sich bewegt und die Montage-mitarbeiter somit im Fluss montieren.⁷⁰⁰ Das Simulationsmodell der Endmontage ist ähnlich aufgebaut, wie das Modell der Türenvormontage, siehe Abbildung 4.7. Unterschiedlich sind drei Punkte:

Erstens erfolgt die Anordnung der Stationen im Simulationsmodell der Endmontage, dargestellt im oberen Bereich, in einer Linie hintereinander und nicht in U-Form, wie bei der Türenvormontage. Zweitens umfasst das Simulationsmodell der Endmontage 50 Montagestationen⁷⁰¹ und damit ca. die vierfache Menge an Stationen gegenüber der Türenvormontage.⁷⁰²

Drittens sind die Hin- und Rückwege für die Logistikkonzepte mit durchschnittlich 42 Meter ca. 1,5 mal länger als bei der Türenvormontage. Grundlage für das erstellte Simulationsmodell ist, genauso wie bei der Türenvormontage, der Endmontagebereich eines deutschen Premiumherstellers, der auch die Materialdaten zur Verfügung gestellt hat. Der Materialfluss wird ebenso wie bei der Simulation der Türenvormontage, siehe Kapitel 4.7.1, für den Bereich zwischen Wareneingang oder dem ersten Lager im Werk bis zum Verbauort modelliert.

Die vier Bereitstellungsnetzwerke für die Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF-, Warenkorb- und Gitterbox-Konzept) wurden aus dem Simulationsmodell der Türenvormonta-

⁶⁹⁹ Beide Anmerkungen wurden von Fachexperten als realistisch für den Großteil der logistischen Anwendungsfälle in der Produktionslogistik beschrieben.

⁷⁰⁰ Da solch ein Montagekonzept der Montage im bewegten Zustand auf dem Montage- und Logistik-Groß-FTF von Seiten der Montagespezialisten in ARENA2036 noch nicht bewertet oder simuliert wurde, ist es an dieser Stelle nicht mit in die Simulation einbezogen worden.

⁷⁰¹ Grund hierfür ist die Restriktion des Simulationsprogramms Plant Simulation in Bezug auf die bewegten Elemente. Trotz der Restriktion ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse jedoch aus zweierlei Hinsicht gegeben: Erstens könnten Simulationen einer größeren Endmontage abschnittsweise durchgeführt werden, wobei die Abschnitte immer überlappend angeordnet werden.

Zweitens umfasst ein Bandabschnitt in den besuchten Werken der deutschen Premiumhersteller nicht mehr als 50 Stationen, bevor am Hallenende ein Umsetzen erfolgt. Erst das Aufsummieren der einzelnen Bandabschnitte führt zur großen Zahl an Stationen einer Endmontage.

⁷⁰² Ähnlich wie beim Simulationsmodell der Türenvormontage kann der Benutzer zu Beginn eines Simulationslaufs die Anzahl der Montagestationen, zwischen 1 und 50, frei eingeben. Für die weitere Betrachtung der Simulation einer Endmontage an dieser Stelle, insbesondere die anschließend durchgeführten Simulationsläufe, wurde das Modell, wegen der vorhandenen Produktionsdaten und in Hinblick auf eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse, immer mit 50 Montagestationen aufgebaut.

ge, siehe Kapitel 4.7.9 übernommen. Obwohl die anzuliefernden Bauteile und Komponenten für die Endmontage teilweise größere Abmessungen (z. B. Frontschürze) aufweisen, sind die Abläufe bei den Logistikkonzepten identisch zu denen bei der Türenvormontage. Zur Anpassung an die Endmontage wurden lediglich die Bauteildaten ausgetauscht, die Fahrwege verlängert und weitere Fahrwege sowie zugehörige Übergabepunkte zum Montagenetzwerk im Modell eingefügt. Ansonsten ist der grundsätzliche Aufbau der Bereitstellungsnetzwerke, siehe dazu im Anhang die Abbildungen A.3, A.4, A.5 und A.6, unverändert und wird deshalb nicht noch einmal gesondert beschrieben.

4.8.1 Randbedingungen

Für die Simulation der Endmontage wurden die in Kapitel 4.7.4 beschriebenen Randbedingungen der Simulationsstudie der Türenvormontage übernommen und angepasst. Abweichend zur Aufstellung von Seite 125 sind lediglich die folgenden Angaben:

- Annahme 2: Die Taktzeit beträgt 90 Sekunden.⁷⁰³
- Annahme 11: Der Abstand zwischen den Montagestationen beträgt 5 m.⁷⁰⁴
- Annahme 12: Die Weglänge vom Lager zu den Montagestationen beträgt im Durchschnitt 42 m, dieser Wert wurde anhand der Abbildung 4.26 berechnet.

Der Wert für die durchschnittliche Weglänge kann, ebenso wie bei der Türenvormontage, siehe Kapitel 4.7.4, anhand der Abbildung 4.26 nachvollzogen werden.⁷⁰⁵ Der Abstand der Montagestationen, vom Mittelpunkt einer Station bis zum Mittel der nächsten Station beträgt bei der Endmontage 5 Meter. Obwohl jedes Bereitstellungsnetzwerk (Riegelkonzept, Einzel-FTF-, Warenkorb- und Gitterbox-Konzept) eigene Anfahr- und Rückfahrwege aufweist, wird als Durchschnittswert eine Strecke von 42 Meter pro Richtung angenommen. Beim Bereitstellungsnetzwerk des Warenkorb-Konzepts werden zusätzlich zum An- und Rückfahrweg auch noch die Mitfahrwege⁷⁰⁶ übernommen. Die Wegstrecken sind wieder relevant für die Anzahl der jeweils pro Konzept benötigten Betriebsmittel.

⁷⁰³ Dabei handelt es sich um einen realen Wert aus der heutigen Endmontage.

⁷⁰⁴ Dieser Wert spiegelt die heutige Situation in einer Endmontage wieder.

⁷⁰⁵ Die Berechnung der Strecken erfolgte über den Satz des Pythagoras.

⁷⁰⁶ Mitfahrwege sind die Fahrabschnitte des Warenkorbs, bei denen der Warenkorb dem im Aufbau befindlichen Fahrzeug parallel folgt, weil vom Montagemitarbeiter kontinuierlich Bauteile aus dem Warenkorb entnommen werden.

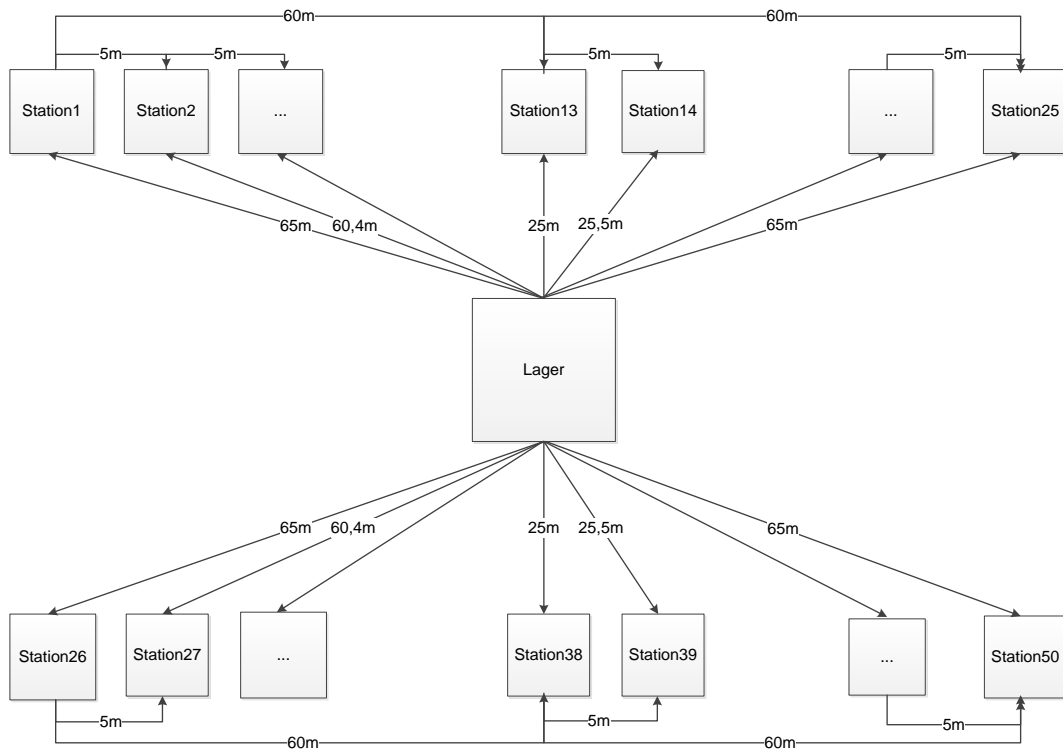


Abbildung 4.26: Weglängen in der Endmontage mit 50 Stationen (eigene Darstellung)

4.8.2 Auftragserstellung, Bauteilbenennung und Konzeptauswahl

Zu Beginn jedes Simulationslaufs wird, ähnlich wie bei der Türvormontage, jedem zu produzierenden Fahrzeug ein zufälliger Fertigungsauftrag, bestehend aus den jeweils zu verbauenden Montageteilen, zugeordnet. Diese Zuweisung erfolgte auf Basis der aufbereiteten Daten, die im Rahmen dieser Arbeit vorhanden sind. Die Bauteilbenennung findet in der gleichen Weise wie bei der Türvormontage statt. Weiterhin muss die Konzepttabelle mit dem zu simulierenden Szenario (1 bis 4) ausgefüllt und die Anzahl der aufeinanderfolgenden Stationen eingegeben werden, die per Warenkorbkonzept beliefert werden soll. Ein Warenkorb kann zwischen 3 und 10 aufeinanderfolgenden Stationen beliefern.⁷⁰⁷

4.8.3 Untersuchungsgegenstände

Untersuchungsgegenstände der Simulationsstudie der Endmontage sind, ähnlich wie bei der Simulation der Türvormontage, folgende Parameter:

1. Beweis der Umsetzbarkeit der neuartigen Logistikkonzepte unter Einsatz des Gitterbox-

⁷⁰⁷ In Bezug auf die Anzahl der bereitzustellenden Bauteile sind diese Werte im Logistkarbeitskreis in ARE-NA2036 als sinnvolle Grenzen festgehalten worden.

Konzepts zum Erreichen der auf Datenbasis vorliegenden Menge an produzierten Fahrzeugen.

2. Anzahl der benötigten Betriebsmittel für die Umsetzung der Logistikkonzepte: Für den paarweisen Vergleich der Szenarien wurde die Anzahl von Einzel-FTF inkl. Gestell, Unterfahr-FTF, Riegelgestelle, Flurförderzeug für die Gitterboxen, Warenkorb-FTF und Warenkorb-Gestelle bei jedem Simulationslauf bestimmt, die für die Materialbereitstellung benötigt wird.

Die folgende Tabelle 12 fasst die laut Daten erreichbaren Ergebnisse der Endmontage zusammen.

Tabelle 12: Durchsatz der Endmontage auf Basis der Daten

Stationen	50
Taktzeit	90 s
Stunden pro Schicht	7,5 h
Durchsatz/Produktionsmenge pro Schicht (laut Daten)	300 Fahrzeuge
Maximale Produktionsmenge pro Produktionstag (laut Daten)	600 Fahrzeuge

4.8.4 Durchführung der Simulationsläufe

Wie in Kapitel 4.2 beschreiben, wurden in der Logistikarbeitsgruppe in ARENA2036 vier Szenarien festgelegt, die im Rahmen der Simulationsläufe für die Endmontage untersucht werden sollten. Diese Szenarien mit den Prozentsätzen für die Anteile der jeweiligen Logistikkonzepte an der gesamten Materialbereitstellung sind in Tabelle 13 angegeben. Während im Szenario 1 36 % der Montagestationen mit dem Einzel-FTF-Konzept versorgt werden und 64 % der Montagestationen mit dem Riegelkonzept ist die Verteilung beim Szenario 2 mit 50 % der Montagestationen, die mit dem Riegelkonzept, 20 % die mit dem Warenkorbkonzept und den restlichen 30 % die mit dem Gitterbox-Konzept beliefert werden, etwas durchmischer. Hingegen nutzt das Szenario 3 alle drei neuartigen Logistikkonzepte, indem 14 % der Montagestationen mit dem Einzel-FTF-Konzept, 50 % mit dem Riegelkonzept, 20 % mit dem Warenkorb-Konzept und die restlichen 16 % mit dem Gitterbox-Konzept versorgt werden. Beim Szenario 4 übernimmt das Riegelkonzept 70 % der Materialflüsse und das Gitterbox-Konzept die verbleibenden 30 %.

Tabelle 13: Untersuchungsszenarien in der Simulationsstudie der Endmontage

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Einzel-FTF-Konzept	36 %	-	14 %	-
Riegelkonzept	64 %	50 %	50 %	70 %
Warenkorb-Konzept	-	20 %	20 %	-
Gitterbox-Konzept	-	30 %	16 %	30 %

Mit den angegebenen Prozentsätzen für die jeweiligen Logistikkonzepte ergeben sich die folgenden Absolutwerte für die Anzahl der pro Konzept belieferten Montagestationen, siehe Abbildung 4.27.

Bei Verwendung des Szenarios 1 werden 18 Stationen mit dem Einzel-FTF-Konzept versorgt und 32 Stationen per Riegelkonzept. Dagegen werden nur 25 Stationen beim Szenario 2 mit dem Riegelkonzept beliefert, 10 Stationen mit dem Warenkorb-Konzept und 15 Stationen mit dem Gitterbox-Konzept. Während im Szenario 3 alle Logistikkonzepte zum Einsatz kommen, werden vom Einzel-FTF-Konzept 7 Stationen mit Material versorgt, vom Riegelkonzept 25 Stationen, vom Warenkorb-Konzept 10 Stationen und vom Gitterbox-Konzept 8 Stationen. Im vierten Szenario erfolgt die Belieferung von 35 Stationen der Endmontage per Riegelkonzept und 15 Stationen per Gitterbox-Konzept. Gleichzeitig ist in Abbildung 4.27 die Anzahl der belieferten Stationen pro Konzept graphisch in der Form von Säulen dargestellt.

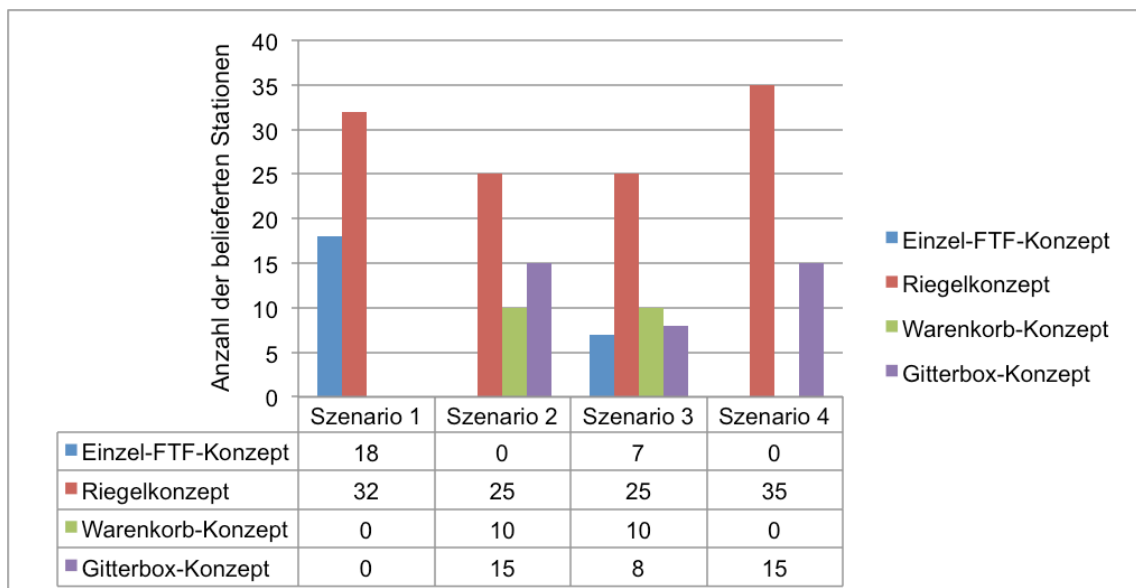


Abbildung 4.27: Belieferte Konzepte je Station bei den Szenarien der Endmontage

Beim Simulationsmodell der Endmontage wurde kein Störfall simuliert. Das Ziel der Funktionsweise des Ausschleusens von Türen und weiterhin passender Materialversorgung konnte über die Störfallsimulation in der Türvormontage ausreichend dargestellt werden.

4.8.5 Ergebnisse und Auswertung

Die Simulationsstudie der Endmontage hat als Ergebnis für alle 4 Szenarien eine Produktionsmenge von 300 montierten Fahrzeugen pro Schicht geliefert.⁷⁰⁸ Über einen gesamten Produktionstag mit 2 Schichten wurden 600 Fahrzeuge produziert, siehe hierzu die unterste Zeile der Tabelle 14. Diese Produktionszahlen waren nur erreichbar, da die geforderte Materialversorgung stattgefunden hat und alle Bauteile zur benötigten Zeit an die passenden Montagestationen geliefert wurden. Damit ist das wichtigste Ergebnis der Simulationsläufe, der Beweis der Umsetzbarkeit der Materialversorgung einer Endmontage mit den neuartigen Logistikkonzepten (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) unter Verwendung des Gitterbox-Konzepts bei den Szenarien 2 - 4, erreicht. Weiterhin wird durch das Erreichen der Produktionsmenge beim Szenario 1 die Funktionalität der drei neuartigen Logistikkonzepte (Warenkorb-, FTS- und Riegelkonzept) gezeigt, da diese den notwendigen Materialfluss der Produktionsmaterialien gewährleisten konnten und die erforderliche Produktionsmenge erreicht haben.

Zusätzlich zur Ermittlung der Produktionsmengen wurden auch die für die Funktionalität der Logistikkonzepte benötigten Betriebsmittel (Einzel-FTF inkl. Gestell, Unterfahr-FTF, Riegelgestelle, Flurförderzeuge für die Gitterboxen, Warenkorb-FTF und Warenkorb-Gestelle) ermittelt. Die Zählung der Betriebsmittel hat, ebenso wie bei der Türenvormontage, an den Einspeisepunkten ins Simulationsmodell stattgefunden. Folgende Betriebsmittel müssen für die Funktionalität der Logistikkonzepte eingesetzt werden: Beim Szenario 1 müssen 18 Einzel-FTF, 1 Unterfahr-FTF und 57 Riegelgestelle eingesetzt werden, um die Materialbelieferung sicherzustellen. Beim Szenario 2 bleibt die benötigte Anzahl an Unterfahr-FTF gleich und die Anzahl der Riegelgestelle reduziert sich auf 42. Zusätzlich müssen 10 Warenkorb-FTF und 1 Gitterbox-Flurförderzeug im Einsatz sein. Beim Szenario 3 werden 7 Einzel-FTF, 1 Unterfahr-FTF, 42 Riegelgestelle, 1 Gitterbox-Flurförderzeug und 10 Warenkorb-FTF sowie 11 Warenkorb-Gestelle benötigt. Das Szenario 4 benötigt hingegen nur 1 Unterfahr-FTF, jedoch 62 Riegelgestelle und 1 Gitterbox-Flurförderzeug.

Zusammenfassend kann das Szenario 2 besonders empfohlen werden, da bei fast allen Betriebsmitteln eine identische Zahl wie beim Szenario 3 benötigt wird, jedoch im Gegensatz zu Szenario 3 keine Einzel-FTF benötigt werden. Weiterhin kommt das Szenario 2 mit weniger Riegelgestellen als die Szenarien 1 und 4 aus. Ähnlich wie bei der Türenvormontage sei an dieser Stelle der Hinweis gegeben, dass eine passende Bewertung für den jeweiligen Anwendungsfall eine Analyse der örtlichen Besonderheiten und vorhandenen Betriebsmitteln sowie möglicherweise auch der Mitarbeiterkenntnisse und anderer Faktoren vorausgehen

⁷⁰⁸ Die produzierte Menge an Fahrzeugen steht ca. im Verhältnis 1:2 zu den produzierten Türen. Hintergrund hierfür ist, dass einerseits in der realen Türenvormontage immer 2 Türen auf einem Gestell montiert werden. Das Material wird von beiden Seiten und somit doppelt bereitgestellt. Dies wurde im Simulationsmodell nicht abgebildet, da es keine besonderen Herausforderungen darstellt, sondern lediglich das Simulationsmodell in Bezug auf die Anzahl der Elemente wesentlich vergrößert. Andererseits sind die Fahrzeuge in den Produktionsdaten sowohl Zwei- als auch Viertürer und benötigten somit teilweise 2 und teilweise 4 Türen.

muss.

Tabelle 14: Auswertung der benötigten Betriebsmittel für den Materialfluss in der Endmontage

Betriebsmittel	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Einzel-FTF	18	-	7	-
Unterfahr-FTF	1	1	1	1
Riegelgestelle	57	42	42	62
Gitterbox-Flurförderzeuge	-	1	1	1
Warenkorb-FTF	-	10	10	-
Warenkorb-Gestelle	-	11	11	-
gefertigte Fahrzeuge je Schicht	300	300	300	300
gefertigte Fahrzeuge je Produktionstag	600	600	600	600

Ebenso wie bei der Türenvormontage müssen zur Erreichung einer gewünschten Verfügbarkeit der Betriebsmittel, insbesondere der FTF, auf Basis des heutigen Standes der Technik gezielte Notfallkonzepte (z. B. 10 % Sicherheitsbestand) vorhanden sein.

4.9 Simulation einer Montage in Matrixform

Im Rahmen der Überlegungen zu neuartigen Produktionsabläufen wurde das Konzept einer Montage im Matrix- oder Schachbrettlayout in Kapitel 3.2 vorgestellt. Da dieses Produktionskonzept besondere Anforderungen an die Produktionslogistik, beispielsweise in Bezug auf die Ausgestaltung der Fahrwege, stellt, wird an dieser Stelle die Materialversorgung einer Montage in Matrixform modelliert und anschließend simuliert. Das Konzept basiert auf der Tatsache, dass die zu produzierenden Fahrzeuge nicht, wie Stand heute, siehe Kapitel 2.1.2 auf einem Stetigförderer durch die Montage bewegt werden, sondern individuell auf FTF-Plattformen, wie beispielsweise dem Montage- und Logistik-Groß-FTF, siehe Kapitel 3.3, unterwegs sind. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Montagepfade, also Wege durch das Produktionsnetzwerk, abzubilden. Diese Vorgehensweise bringt Flexibilität für die Produktion mit sich, da die Pfadwahl eines Automobils in Bezug auf die Taktzeit und das Auslassen bestimmter Stationen individuell gesteuert werden kann. Dadurch fahren beispielsweise nur Cabrios eine Montagestation für das Verdeck an, während Limousinen diese Station durchfahren oder umfahren können. Ein weiterer Vorteil einer Montage auf Basis des Matrixlayouts ist es, parallele Montagestationen, sogenannte Parallelstationen, mit gleichen Montagetätigkeiten (beispielsweise zeitlich intensive Vorgänge) aufzubauen, um Engpässe im Produktionsablauf ausgleichen zu können.⁷⁰⁹ Genauso wie bei der Simulationsstudie der Endmontage wird für die Simulation der Montage in Matrixform angenommen, dass die Montage von Bauteilen an den Prozessmodulen jeweils im gestoppten Zustand des Montage- und

⁷⁰⁹ Vgl. Zeile (1995), S. 64 und 82.

Logistik-Groß-FTF stattfindet. Wie anhand der Ausführungen in Kapitel 3.3 erkennbar, wäre grundsätzlich auch eine Montage im bewegten Zustand des Montage- und Logistik-Groß-FTF denkbar, diese Variante konnte jedoch, aufgrund der fehlenden Forschungsergebnisse siehe Fußnote 700, noch nicht mit in die Simulation einbezogen werden.

4.9.1 Produktionsmodell

Da eine in real-time stattfindende Produktionspfad-Planung für die im Aufbau befindlichen Fahrzeuge zur Zeit der Erstellung dieser Arbeit von den Montagespezialisten im Projekt ARENA2036 noch nicht abgeschlossen war, wurden auf Basis von Gesprächen mit Montageexperten in ARENA2036 Annahmen für die Produktionspfade im Matrixlayout getroffen. Dazu wurde ein passendes Modell der Produktionsabläufe erstellt, siehe Abbildung 4.28. Für die benötigten Montagezeiten an den jeweiligen Prozessmodulen wurde eine Grundtaktzeit⁷¹⁰ definiert. An einigen Stationen fallen Bearbeitungs- oder Montagezeiten an, die ein Vielfaches dieser Grundtaktzeit betragen. Das vorliegende Produktionsmodell im Matrixlayout besteht aus insgesamt 50 Montagestationen. Davon sind 8 Parallelstationen⁷¹¹, im weiteren bezeichnet als parallele Prozessmodule mit solchen gerade beschriebenen, gleichen Montagetätigkeiten. Dies sind die Prozessmodule 1a und 1b, 5a und 5b, 32a und 32b sowie 36a und 36b. Die parallelen Prozessmodule weisen jeweils die doppelte Taktzeit auf. Weiterhin sind 3 Prozessmodule eine n-fache Parallelstation, die ebenfalls identische Montageinhalte besitzen. Dies sind die Prozessmodule 19a, 19b und 19c. Diese Prozessmodule haben die dreifache Taktzeit. Weiterhin gibt es 3 Prozessmodule, die ausstattungspezifisch nur von bestimmten Fahrzeugen angesteuert werden. Dies sind die Prozessmodule 13, 26 und 39. Zusätzlich wurden Produktionspfade für 3 unterschiedliche Fahrzeugmodelle oder -ausstattungsvarianten (schwarz, rot und blau) erstellt. Die zu produzierenden Fahrzeuge durchlaufen die Produktion dadurch auf den drei Pfaden 1 bis 3. Diese Produktionspfade sind farblich dargestellt und lassen erkennen, dass Fahrzeuge des Typs 3 bestimmte Prozessmodule (beispielsweise 5 bis 13) während der Produktion auslassen. Zu erklären ist dies beispielsweise durch eine niedrigere Zahl an Ausstattungsoptionen des Fahrzeugmodells 3.

Ein beispielhafter Ablauf dreier Fahrzeugtypen, der in ARENA2036 mit Montageexperten aufgestellt wurde, soll den Ablauf der Montage im Matrixlayout näher erläutern. Der erste Fahrzeugtyp ist durch einen schwarzen Produktionspfad in der Abbildung 4.28 dargestellt, der zweite Fahrzeugtyp durch einen roten Produktionspfad und der dritte durch einen blauen Produktionspfad. Vereinfachend wird im folgenden vom schwarzen Fahrzeug, vom roten

⁷¹⁰ Die Grundtaktzeit stellt als Basisgröße die kleinste Taktzeit des gesamten Produktionsablaufs dar. Montagestationen mit höherem Zeitbedarf können ihre Arbeitsinhalte in Vielfache der Grundtaktzeit einpassen. Beispielsweise beträgt der Grundtakt 30 Sekunden und einige Prozessmodule haben eine Taktzeit von 60 oder 90 Sekunden.

⁷¹¹ Parallelstationen können aus Sicht der Maschinenbelastung oder Technologieuntersuchung an unterschiedlichen Prozessmodulen zum Einsatz kommen. Benötigt werden Sie aber auf jeden Fall, wenn ein Prozessmodule eine Bearbeitungszeit größer der Grundtaktzeit aufweist, da andernfalls Engpässe und Verzögerungen im Produktionsablauf entstehen.

Fahrzeug und vom blauen Fahrzeug gesprochen, wobei damit die Produktionspfade der beiden Fahrzeugtypen gemeint sind. Zum Start der Montage steuert das schwarze Fahrzeug, siehe schwarzer Pfad in Abbildung 4.28, das Prozessmodul 1a an. Nach Ablauf einer Taktzeit wird das rote Fahrzeug eingesteuert, die Montage dieses Fahrzeugs beginnt am Prozessmodul 1b. Nachdem die Bearbeitung des schwarzen Fahrzeugs am Prozessmodul 1a abgeschlossen ist, bewegt sich dieses weiter zum Prozessmodul 2. Das Prozessmodul 1a ist nun wieder frei und die Montage des blauen Fahrzeug kann im Prozessmodul 1 beginnen, während das schwarze Fahrzeug am Prozessmodul 2 bearbeitet wird. Nach Ablauf der nächsten Grundtaktzeit verlässt das schwarze Fahrzeug das Prozessmodul 2 und bewegt sich zum Prozessmodul 3. Das rote Fahrzeug fährt zum freien Prozessmodul 2 und wird dort bearbeitet. Bis einschließlich zum Prozessmodul 4 folgt das rote Fahrzeug nun dem schwarzen Fahrzeug. Das blaue Fahrzeug folgt den beiden anderen einen Grundtakt danach. Somit ist ein durchgängiger Fluss der Fahrzeuge gewährleistet. Nach Ende der Bearbeitung am Prozessmodul 4 erfolgt die weitere Montage des schwarzen Fahrzeugs im parallelen Prozessmodul 5a. Das folgende rote Fahrzeug wird im nächsten Takt im parallelen Prozessmodul 5b bearbeitet. Die parallelen Prozessmodule 5a und 5b weisen die doppelte Grundtaktzeit auf. Nachdem das schwarze Fahrzeug die Station 5a verlassen hat, fährt das blaue Fahrzeug in diese Station ein. Dieser Ablauf setzt sich im weiteren fort. Eine Besonderheit gibt es bei Station 13, da diese nur vom schwarzen und blauen Fahrzeug angefahren wird. Hierbei handelt es sich beispielsweise um eine Station an der die Hybridbatterie eingesetzt wird. Diese Station wird nur für Hybridfahrzeuge benötigt. Das rote Fahrzeug kann das Prozessmodul 13 auslassen und gelangt dann direkt in einen Zwischenpuffer, um von diesem nach einer Grundtaktzeit zur weiteren Bearbeitung am Prozessmodul 14 einzutreffen. Die Stationen 19a, 19b und 19c stellen eine dreifache Parallelstation dar, wobei jeweils die dreifache Grundtaktzeit anfällt. Deshalb nutzt das schwarze Fahrzeug das Prozessmodul 19a, das rote Fahrzeug das Prozessmodul 19b und das blaue Fahrzeug das Prozessmodul 19c. Durch diese Reihenfolge tritt keine Verzögerung im Montageablauf auf. Im weiteren Verlauf folgt das blaue Fahrzeug dem roten Fahrzeug welches wiederum dem schwarzen Fahrzeug folgt. Nach der Station 26 fährt das rote Fahrzeug in einen Puffer und wartet dort 2 Grundtaktzeiten lang, da für das blaue Fahrzeug ein Eilauftrag erzeugt wurde und seine Fertigstellung vorgezogen wird. Die Stationen 32a und 32b sowie 36a und 36b sind wieder Parallelstationen mit doppelten Grundtaktzeiten. Nach der Station 39 befindet sich ein Puffer, der für Fahrzeuge genutzt wird, die das Prozessmodul 39 nicht anfahren müssen. In diesem Beispiel fährt das blaue Fahrzeug direkt durch den Pufferbereich hindurch direkt zum Prozessmodul 40. Zum Ende des Montageablaufs ist das blaue Fahrzeug zuerst fertig montiert, da es die Prozessmodule 43 und 44 nicht benötigt. Einen Grundtakt später folgt das schwarze Fahrzeug und danach das rote Fahrzeug, welches nach Prozessmodul 43 schon komplett aufgebaut ist und keine weitere Bearbeitung am Prozessmodul 44 benötigt.

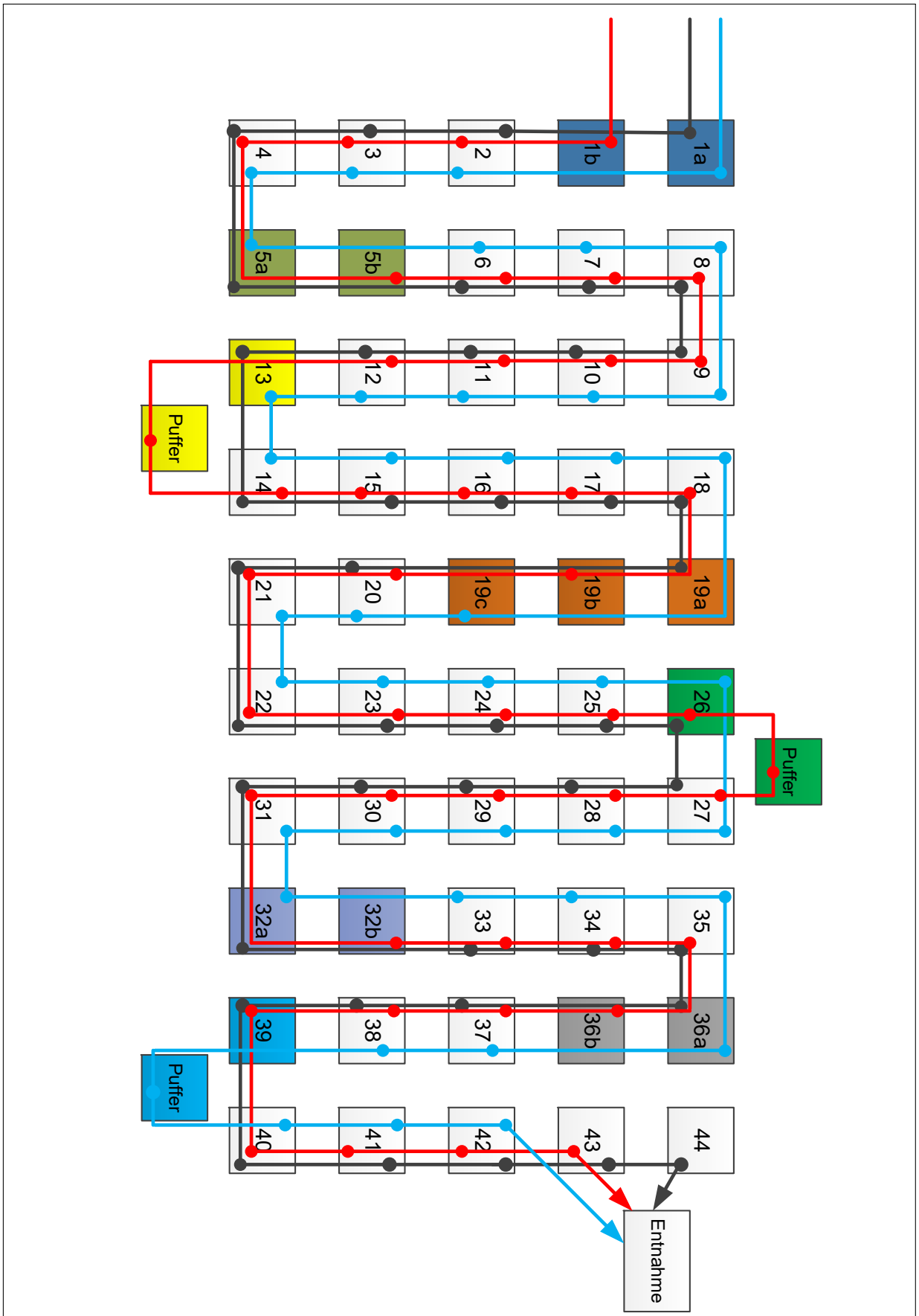


Abbildung 4.28: Ansicht der Montagepfade in Matrixanordnung

4.9.2 Simulationsmodell einer Montage in Matrixlayout

Das beschriebene Produktionsmodell der Matrixproduktion zur Erklärung der Montageabläufe wird an dieser Stelle in das Simulationsmodell, siehe Abbildung 4.29 übertragen. Dabei setzt sich das Modell grundsätzlich, wie auch bei der Türenvor- und der Endmontage, aus einem Montagenetzwerk und 4 Bereitstellungsnetzwerken zusammen. Ebenso wurde die Bauteilbenennung aus der Endmontage, siehe Kapitel 4.9.4, übernommen. Der wesentliche Unterschied liegt einerseits in der Anordnung der einzelnen Prozessmodule, die in der Endmontage als Montagestationen bezeichnet werden. Während beim Simulationsmodell der Türenvormontage und der Endmontage die Montagestation in Linienform hintereinander angeordnet sind und auch in dieser Form von den Automobilen durchlaufen werden, erfolgt nun eine Anordnung der Prozessmodule im Matrix-Layout. Andererseits durchlaufen die aufzubauenden Fahrzeuge die Montage nicht alle im gleichen Schema, sondern auf individuellen Produktionspfaden, siehe dazu die Abbildung 4.28 und zur Beschreibung der Abläufe den zugehörigen Begleittext in Kapitel 4.9.1. Das dort beschriebene Montagemodell wurde in ein Simulationsmodell, siehe Abbildung 4.29, überführt. Dieses Simulationsmodell ist die Basis für die Simulationsstudie der Montage im Matrixlayout. Im Produktionsmodell ist beschrieben, dass das Montagenetzwerk insgesamt 50 Prozessmodule umfasst, die von Prozessmodul 1 bis Prozessmodul 44 durchnummeriert sind. Für die Abbildung im Simulationsmodell wurden Parallelstationen jedoch nicht mit a und b usw. bezeichnet, sondern fortlaufend nummeriert. Aus diesem Grund finden sich im abgebildeten Montagenetzwerk des Simulationsmodell in Abbildung 4.29 die Prozessmodule 1 bis 50. Während die Anordnung der Stationen im Matrixlayout noch immer erkennbar ist, sind die Pfade der Fahrzeugtypen optisch nicht hervorgehoben sondern wurden in Methoden hinterlegt. Links ist in der Abbildung das Karosserielager zu sehen, von dem aus die Karossen auf Montagegestelle, die Montage- und Logistik-Groß-FTF verladen werden. Zum Ende der Montage lädt das Montage- und Logistik-Groß-FTF das fertig montierte Fahrzeug ab und steht für die nächste Karosse zur Verfügung.

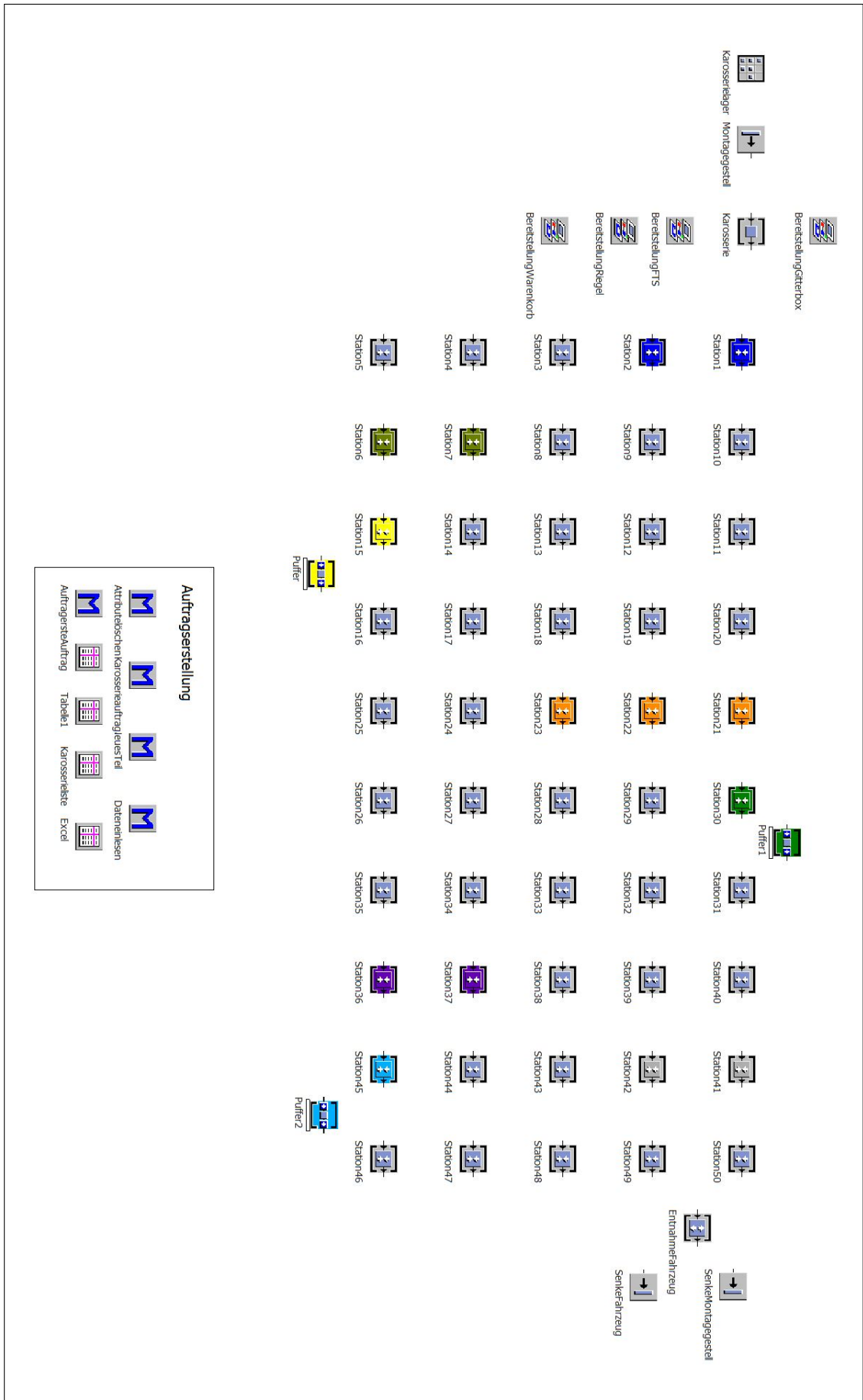


Abbildung 4.29: Übersicht des Montagenetzwerks im Simulationsmodell der Matrixmontage

4.9.3 Randbedingungen

Für die Simulation der Montage im Matrixlayout gelten die Randbedingungen aus der Türenvormontage, die auch beim Simulationsmodell der Endmontage zum Einsatz kamen und in Kapitel 4.7.4 beschrieben sind. Zwei Annahmen wurden, nach Diskussion mit Montageexperten in ARENA2036, an die geänderten Gegebenheiten der Matrixmontage angepasst:

- Annahme 2: Die Taktzeit beträgt 90 Sekunden.
- Annahme 12: Die Weglänge vom Lager zu den Montagestationen beträgt im Durchschnitt 60 m.⁷¹²

4.9.4 Auftragserstellung, Bauteilbenennung und Konzeptauswahl

Für die Simulationsläufe wird auf die beschriebenen drei Produktionspfade (schwarz, rot und blau), siehe Abbildung 4.28 und den zu zugehörigen Beschreibungstext im Kapitel 4.9.1, zurückgegriffen. Die Zuteilung der Produktionsdaten, die auch in der Endmontage verwendet wurden, zu den Produktionspfaden erfolgt per Gleichverteilung zu Beginn des Simulationslaufs. Das Ergebnis ist die Auftragsliste, die aus allen Bauteilen besteht, die an den betreffenden Prozessmodulen am Fahrzeug zu montieren sind.

Eine ausgefüllte Konzepttabelle zur beispielhaften Darstellung der Verteilung der Logistikkonzepte ist Tabelle 21 im Anhang A.6 für vier Simulationsläufe zu entnehmen. Die Konzepttabelle stellt beispielhaft dar, welches Logistikkonzept welches Prozessmodul je nach Szenario mit Bauteilen versorgt. Weitere Erläuterungen zu den Verteilungen der jeweiligen Szenarien erfolgen in Kapitel 4.9.6.

4.9.5 Untersuchungsgegenstände

Die Untersuchungsgegenstände der Simulationsstudie einer Montage im Matrixlayout sind die nachfolgenden zwei Punkte:

1. Beweis der Funktionalität der neuartigen Logistikkonzepte inklusive Gitterbox-Konzept zum Erreichen der theoretisch vorgegebenen Menge an produzierten Fahrzeugen.
2. Bestimmung der für die Umsetzung benötigten Betriebsmittel (Einzel-FTF inkl. Gestell, Unterfahr-FTF, Riegelgestelle, Flurförderzeuge für die Gitterboxen, Warenkorb-FTF und Warenkorb-Gestelle) zur Vergleichbarkeit der Szenarien.

⁷¹² Die längere Strecke ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass innenliegende Stationen des Matrixlayouts nicht über gerade Strecken, wie bei der Linienmontage, sondern nur über eine eckige Fahrstrecke angesteuert werden können.

Die folgende Tabelle 15 fasst die laut Daten erreichbaren theoretischen Ergebnisse der Montage im Matrixlayout zusammen.

Tabelle 15: Theoretischer Durchsatz der Matrixmontage

Stationen	50
Taktzeit	90 s
Stunden pro Schicht	7,5 h
theoretischer Durchsatz pro Schicht	300 Fahrzeuge
theoretischer Durchsatz am Produktionstag	600 Fahrzeuge

4.9.6 Durchführung der Simulationsläufe

Ähnlich wie bei der Simulationsstudie der Türenvor- und Endmontage wurden die Simulationsläufe der Montage im Matrixlayout mit vier Szenarien, siehe weitere Erläuterungen in Kapitel 4.2, durchgeführt. Diese Szenarien dienen dazu, die neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept) und das Gitterbox-Konzept jeweils mit kleineren oder größeren Anteilen am gesamten Materialfluss und weiterhin als Materialzuführung für unterschiedliche Prozessmodule zu simulieren. Diese Szenarien sind in der Tabelle 16 aufgeführt und werden nachfolgend beschrieben. Die prozentualen Verteilungen der vier Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF-, Warenkorb- und Gitterbox-Konzept) in den untersuchten Szenarien ist identisch mit den Verteilungen der Endmontage. Dies soll dazu beitragen, die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse von End- und Matrixmontage zu ermöglichen und Aussagen über die jeweiligen Vor- und Nachteile der beiden Montagemodelle treffen zu können. Das Szenario 1 bedeutet, dass 36 % der Prozessmodule mit dem Einzel-FTF-Konzept versorgt werden und 64 % der Prozessmodule mit dem Riegelkonzept. Im Szenario 2 kommt hingegen das Riegelkonzept bei 50 % der Prozessmodule zum Einsatz, das Warenkorbkonzept bei 20 % und das Gitterbox-Konzept bei den restlichen 30 %. Das Szenario 3 nutzt alle drei neuartigen Logistikkonzepte, indem 14 % der Prozessmodule mit dem Einzel-FTF-Konzept versorgt werden, 50 % mit dem Riegelkonzept, 20 % mit dem Warenkorb-Konzept und die restlichen 16 % mit dem Gitterbox-Konzept. Abschließend findet sich im Szenario 4 eine 70 % zu 30 % Verteilung zwischen Riegelkonzept und Gitterbox-Konzept. Die Ergebnisse der Simulationsläufe und folglich auch die Auswertung basiert auf diesen Verteilungen.

Tabelle 16: Untersuchungsszenarien in der Simulationsstudie der Matrixmontage

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Einzel-FTF-Konzept	36 %	-	14 %	-
Riegelkonzept	64 %	50 %	50 %	70 %
Warenkorb-Konzept	-	20 %	20 %	-
Gitterbox-Konzept	-	30 %	16 %	30 %

In der Abbildung 4.30 ist die Verteilung der Konzepte auf die Prozessmodule in Form von Absolutwerten und zusätzlich graphisch dargestellt. In Szenario 1 werden folglich 18 Prozessmodule mittels Einzel-FTF-Konzept und 32 Prozessmodule mittels Riegelkonzept beliefert. In Szenario 2 werden 25 Prozessmodule mittels Riegelkonzept, 10 mittels Warenkorb-Konzept und 15 mittels Gitterbox-Konzept beliefert. In Szenario 3 werden 7 Prozessmodule mittels Einzel-FTF-Konzept, 25 Montagestationen mittels Riegelkonzept, 10 mittels Warenkorb-Konzept und 8 mittels Gitterbox-Konzept beliefert. Im letzten Szenario, dem Szenario 4, werden 35 Prozessmodule mittels Riegelkonzept und 15 mittels Gitterbox-Konzept beliefert.

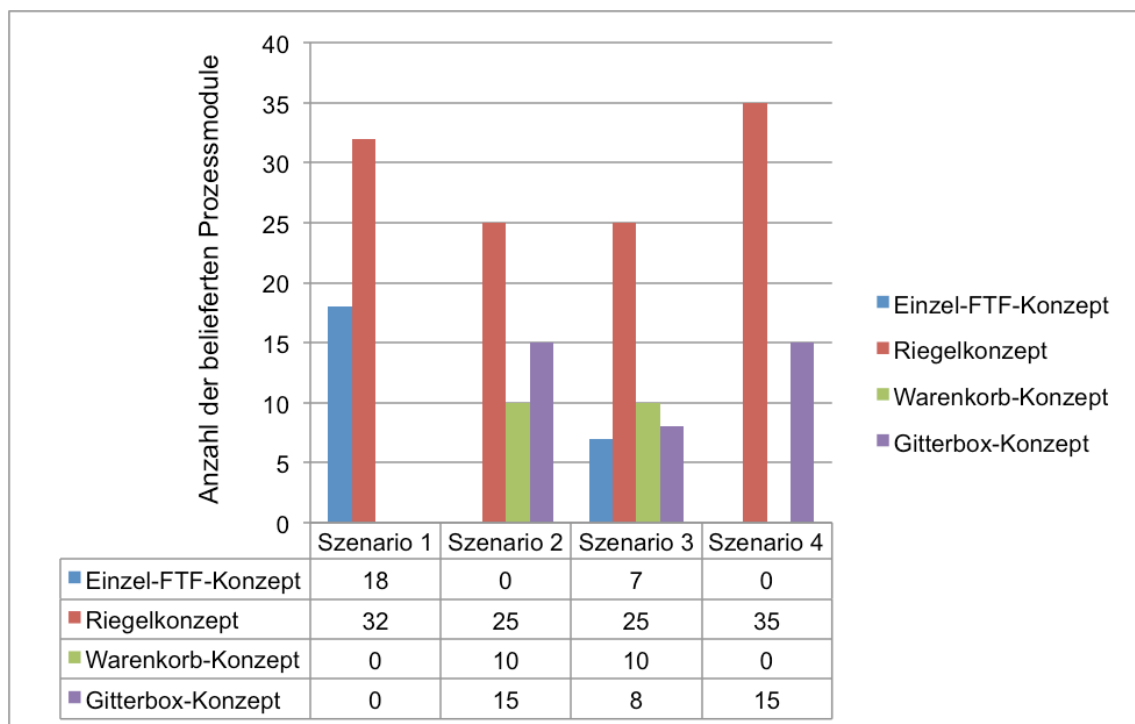


Abbildung 4.30: Belieferte Konzepte je Station bei den Szenarien der Matrixmontage

4.9.7 Ergebnisse und Auswertung

Die Simulationsstudie der Montage in Matrixlayout liefert als Ergebnis für alle 4 Szenarien eine Produktionsmenge von 300 montierten Fahrzeugen pro Schicht, d. h. 600 produzierte Fahrzeuge je Tag, siehe untersten zwei Zeilen in Tabelle 17. Das Erreichen dieser theoretischen Produktionszahl, siehe Tabelle 15, beweist, dass die notwendigen Materialbewegungen stattgefunden haben und die Prozessmodule mit den passenden Bauteilen beliefert wurden. Hierdurch ist die Funktionalität der drei neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept), unter Verwendung des Gitterbox-Konzepts für die Szenarien 2 - 4, deutlich gezeigt worden.

Weiterhin konnten in der Simulationsstudie der Montage in Matrixform die Anzahl der not-

wendigen Betriebsmittel für die Produktionslogistik ermittelt werden, siehe Auflistung in Tabelle 17.⁷¹³ Je nach Szenario werden hierfür wieder unterschiedliche Anzahlen an Betriebsmitteln benötigt. Im Szenario 1 werden 19 Einzel-FTF, 3 Unterfahr-FTF und 62 Riegelgestelle benötigt. Dies sind ca. 5,5 % mehr Einzel-FTF, dreimal so viele Unterfahr-FTF und ca. 8,7 % mehr Riegelgestelle als bei der Simulationsstudie der Endmontage, siehe Tabelle 14. Für den Einsatz des Szenarios 2 müssen 3 Unterfahr-FTF, 46 Riegelgestelle, 2 Gitterbox-Flurförderzeuge, 10 Warenkorb-FTF und 11 Warenkorb-Gestelle vorhanden sein. Dies entspricht dreimal so vielen Unterfahr-FTF, ca. 9,5 % mehr Riegelgestellen, doppelt so vielen Gitterbox-Flurförderzeuge und gleich vielen Warenkorb-FTF sowie Warenkorb-Gestelle, wie bei der Simulation der Endmontage in Linienform. Im Szenario 3 kommen 7 Einzel-FTF, 3 Unterfahr-FTF, 46 Riegelgestelle, 1 Gitterbox-Flurförderzeug, 10 Warenkorb-FTF und 10 Warenkorb-Gestelle zum Einsatz. Im Vergleich zur Endmontage in Linienform sind die Anzahlen der Warenkorb-FTF und Warenkorb-Gestelle wieder gleich geblieben, Anzahl der Einzel-FTF auch aber es werden dreimal so viele Unterfahr-FTF und ca. 9,5 % mehr Riegelgestelle benötigt. Das letzte Szenario, Szenario 4, kann mit drei Unterfahr-FTF, 64 Riegelgestellen und zwei Gitterbox-Flurförderzeugen betrieben werden. Im Gegensatz zur Endmontage in Linienform sind dies dreimal so viele Unterfahr-FTF, ca. 3,2 % mehr Riegelgestelle und doppelt so viele Gitterbox-Flurförderzeuge. Ebenso wie bei der Simulationsstudie der Türenvor- und der Endmontage erfolgt hier der Hinweis, dass Notfallkonzepte für die eingesetzten Betriebsmittel, insbesondere die FTF, vorhanden sein müssen. Nur dann können die gewünschten Verfügbarkeiten der neuartigen Logistikkonzepte, auf Basis der heutigen technischen Möglichkeiten, erreicht werden.

Tabelle 17: Auswertung der benötigten Betriebsmittel für den Materialfluss in der Matrixmontage

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Einzel-FTF	19	-	7	-
Unterfahr-FTF	3	3	3	3
Riegelgestelle	62	46	46	64
Gitterbox-Flurförderzeuge	-	2	1	2
Warenkorb-FTF	-	10	10	-
Warenkorb-Gestelle	-	11	11	-
gefertigte Fahrzeuge je Schicht	300	300	300	300
gefertigte Fahrzeuge je Produktionstag	600	600	600	600

Zusammenfassend ist erkennbar, dass für die ordnungsgemäße Materialbelieferung der Montage in Matrixlayout mehr Betriebsmittel benötigt werden, als in der Simulation der Endmontage in Linienform. Dies ist auf drei Gründe zurückzuführen. Erstens kommen in der Mon-

⁷¹³ Die Ermittlung der benötigten Betriebsmittel hat, wie bei den anderen beiden Simulationsstudien, an den Einspeisepunkten stattgefunden und soll der einfacheren Vergleichbarkeit der Szenarien untereinander dienen.

tage im Matrixlayout sehr flexible Produktionspfade zum Einsatz und während der Produktion überholen sich Fahrzeuge gegenseitig, siehe die Erläuterungen in Kapitel 4.9.1. Zweitens sind aufgrund des Matrixlayouts die angenommenen Hin- und Rückfahrwege zwischen Lager und Prozessmodul länger als zwischen Lager und Montagestation bei der Endmontage in Linienform, siehe Kapitel 4.9.3. Drittens sind beim Riegelkonzept für jede Parallelstationen Riegelgestelle bereitzustellen, was jedoch die Montageflexibilität massiv erhöht, da ein aufzubauendes Fahrzeug entweder an der einen oder an der anderen Station bearbeitet werden kann.⁷¹⁴

4.10 Verifikation und Validierung

Im Rahmen der Ausarbeitung der dargestellten Simulationsstudien der Türenvor-, End- und Matrixmontage wurde parallel jeweils die Verifikation und Validierung durchgeführt. Dabei kamen als Techniken sowohl Begutachtung⁷¹⁵ als auch Schreibtischtest⁷¹⁶ und Grenzwerttest⁷¹⁷ zum Einsatz. Darüber hinaus wurden die erstellten Modelle mit Hilfe der Prüfungsmethode Animation⁷¹⁸ jeweils in Bezug auf die Logik der umgesetzten Vorgänge geprüft. Die Darstellung der aufzubauenden Türen und Fahrzeuge in den Modellen hat die visuelle Kontrolle dabei erleichtert. Während der Modellerstellung sind mithilfe der Techniken zwei Fehler bei der Abbildung der Fahrzeugvarianten und Fahrweglänge identifiziert worden, die anschließend direkt behoben wurden. Das Fazit der Validierung und Verifikation der finalen Simulationsmodelle, die anschließend auch für die Simulationsläufe zum Einsatz kamen, war bei allen durchgeführten Tests positiv.

⁷¹⁴ Die in der Simulation angenommene Montage im Matrixlayout ist nur eine grobe Vorgabe, die tatsächliche Auslastung der Montagemitarbeiter an den einzelnen Prozessmodulen sowie der Einsatz von Montageteams ist Aufgabe von Untersuchungen und Simulationen von Montageexperten. Wie diese Ergebnisse und damit die Anzahl der benötigten Prozessschritte bei einer Montage im Matrixlayout aussehen, kann an dieser Stelle zum heutigen Zeitpunkt nicht hinreichend genau abgeschätzt werden. Deshalb wurde in den Simulationen die Anzahl der Montage- und Logistik-Groß-FTF, die für die Montageaufgaben notwendig sind, auch nicht spezifisch analysiert.

⁷¹⁵ Bei der Methode der Begutachtung analysieren Vertreter der Auftraggeber- und Auftragnehmerseite gemeinsam das erstellte Simulationsmodell. (Vgl. Rabe u. a. (2008), S. 97) Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Anwendung der Begutachtung sowohl von Kollegen am IFT als auch durch Teilnehmer des Logistikarbeitskreises in ARENA2036.

⁷¹⁶ Der Schreibtischtest ist eine Untersuchungsmethode im Rahmen der Verifikation und Validierung bei der das Simulationsmodell in Bezug auf Korrektheit, Vollständigkeit, Konsistenz und Eindeutigkeit untersucht wird. Das Simulationsmodell wird dazu in möglichst kleine Bestandteile aufgeteilt, die anschließend jeweils visuell mit den vorhandenen Abhängigkeiten dargestellt werden. Diese Abhängigkeiten werden individuell überprüft und erst nach erfolgreicher Prüfung aller Abhängigkeiten ist der Schreibtischtest bestanden. (Vgl. Rabe u. a. (2008), S. 102 nach Balci (1998), S. 356).

⁷¹⁷ Beim Grenzwerttest werden extreme Parameter oder Daten im Simulationsmodell verwendet, um zu sehen, wie das Modell reagiert. (Vgl. Rabe u. a. (2008), S. 100 f.) Beispielsweise wurde nur ein Fahrzeug pro Schicht gebaut oder versucht mehrere hundert Bauteile durch ein Logistikkonzept in kurzer Zeit bereitzustellen.

⁷¹⁸ Animation beschreibt die visuelle Darstellung der Abläufe während der Simulation, insbesondere zur Präsentation gegenüber Personengruppen wie Managern, die geringere Fachkenntnisse über die Simulationsmodelle mitbringen. (Vgl. Law und Kelton (1991), S. 241).

4.11 Diskussion der Ergebnisse

Die drei durchgeführten Simulationsstudien mit den zugehörigen Simulationsmodellen einer Türenvor-, End- und Matrixmontage wurden nach bestem Wissen erstellt und unter Einbeziehung von Experten in ARENA2036 sowie die Vorstellung auf unterschiedlichen Veranstaltungen, z. B. Seminaren des IFT und Kongressen, zur Diskussion gestellt. Anmerkungen und Vorschläge wurden aufgegriffen und umgesetzt oder, wenn nicht zielführend oder relevant für den Kontext, zurückgewiesen. Den Ergebnissen der Simulationsstudien wurden entweder reale Produktionsdaten (Türenvor- und Endmontage) oder theoretische Produktionsmengen (Matrixmontage) gegenübergestellt. Der Beweis für eine Umsetzbarkeit der Konzepte ist hiermit erbracht worden, siehe hierzu die Abschnitte Ergebnisse und Auswertung der drei Simulationsstudien. Bevor die vorgestellten Ergebnisse der benötigten Anzahlen von Betriebsmitteln in reale Produktionsumgebungen übertragen werden können, müssen für jede andersartige Produktionsumgebung als die vorgestellte aber auch beim Vorliegen anderer Produktionsmengen neue Simulationsläufe durchgeführt werden, um die Anzahl der notwendigen Betriebsmittel zu bestimmen.

In Bezug auf die Anzahl der benötigten Betriebsmittel der Simulationsstudien der End- und Matrixmontage ist erkennbar, dass im Vergleich zur Endmontage mit hintereinander aufgereihten Montagesationen, die Materialversorgung der Matrixmontage teilweise mehr Betriebsmittel benötigt. Dies ist anhand von drei Gründen (individuelle Produktionspfade, Länge der Fahrwege und doppelte Anlagen für das Riegelkonzept da Parallelstationen) zu erklären, die auch in Kapitel 4.9.7 aufgeführt sind. Besonders die individuellen Produktionspfade und das Vorhandensein von Parallelanlagen sind jedoch wertvolle Eigenschaften der Matrixmontage in Bezug auf Wandlungsfähigkeit und Flexibilität der Automobilproduktion. Aus logistischer Sicht liefert der Aufbau und Betrieb einer Montage in Matrix- oder Schachbrettlayout sowohl Vorteile (kürzere Anfahrestrecken) als auch Nachteile (höherer Steuerungsaufwand, da ein aufzubauendes Fahrzeug nicht von vorne nach hinten durch die Linie fährt). Aus Sicht der Produktion und gerade in Bezug auf heutige Anforderungen hinsichtlich Wandlungsfähigkeit und Flexibilität des Produktionssystems sind jedoch wesentliche Vorteile vorhanden. Denn eine Matrixmontage ermöglicht wirtschaftlichere Montageergebnisse, da Problemstellungen heutiger Montagen wie z. B. Mitarbeiterauslastung, Taktzeitspreizung oder Betriebsmittelauslastung, um nur ein paar Ansatzpunkte zu nennen, berücksichtigt werden können. Insbesondere die Reduktion des Aufwands für die Montageplaner, da nicht mehr alle Fahrzeuge alle Stationen ansteuern und durchlaufen müssen und die Einplanung der Montagearbeiter mit weniger Regeln auskommt, bringt wesentliche Vorteile für die Produktion des Premiumherstellers mit sich.

Grundsätzlich muss der Einsatz von FTF-basierten Konzepten genauer geplant werden als dies bei manuellen Logistikkonzepten der Fall ist. Doch die erhöhte Flexibilität und erreichbare Gleichmäßigkeit der Materialbelieferung steht den Installations- und Planungskosten für die FTS, nach Meinung des Autors dieser Arbeit, schon nach kurzer Zeit deutlich gegenüber.

4.12 Fazit der Simulationsstudien

In diesem Kapitel wurde anhand von drei Simulationsstudien (Türenvor-, End- und Matrixmontage) gezeigt, dass die in dieser Arbeit entwickelten, neuartigen Logistikkonzepte, also Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorb-Konzept, die in Kapitel 3 vorgestellt wurden, unter Verwendung des Gitterbox-Konzepts für großvolumige Bauteile, sowohl für heutige Montagesysteme mit Band bzw. in Linienform als auch für zukünftige Montagesysteme in Matrixlayout mit dem Montage- und Logistik-Groß-FTF zum Transport der Fahrzeuge umsetzbar sind. Der Beweis der Umsetzbarkeit wurde jeweils über eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den Produktionsmengen pro Schicht bzw. pro Tag im Vergleich zur bisherigen Bandmontage erbracht. Während bei der Türenvor- und Endmontage direkte Vergleiche mit den vorhandenen Produktionsdaten gezogen werden konnten, wurde für die Matrixmontage eine theoretische Durchsatzmenge bestimmt, die dann mit den Simulationsergebnissen verglichen wurden. Das Ziel der Validierung der drei neuartigen Logistikkonzepte wurde durch die Simulationen folglich erreicht. Zusätzlich konnte bei der Simulationsstudie der Türenvormontage dargelegt werden, dass die neuartigen Logistikkonzepte, auch bei Störfällen, die Materialbelieferung der Montagestationen mit den korrekten Materialien gewährleisten können.

Zusätzlich wurde in diesem Kapitel die Erfüllung der drei Thesen aus Kapitel 1.4 untersucht. Die These 1, dass die neuartigen Logistikkonzepte flexible Anpassungen der Produktionsreihenfolge ermöglichen, wurde insbesondere durch die Simulation des Störfalls und darauf folgender Türentnahme bei der Simulation der Türenvormontage gezeigt. Der passende Materialfluss zu den Montagestationen konnte mit den neuartigen Logistikkonzepten auch nach dem Ausschleusen einer Tür und dem nachfolgenden Einschleusen einer Ersatztür aufrecht erhalten werden. Die These 2, welche angibt, dass die Logistikkonzepte wandlungsfähig sind in Bezug auf die Anordnung der Montagestationen wird durch zwei Punkte erfüllt. Einerseits kommen die drei neuartigen Logistikkonzepte ohne feste Aufbauten am Materialstreifen⁷¹⁹ aus. Zweitens wurde im Simulationsmodell der Matrixmontage anhand der vier Szenarien gezeigt, dass die Logistikkonzepte jeweils andere Stationen beliefern können. Die neuartigen Konzepte sind also nicht an eine Montagestation und spezifische Materialbedarfe sowie Materialeigenschaften (z. B. Verbauquote oder Varianz) gebunden, sondern lassen sich, insbesondere für Materialtransport und -bereitstellung im KLT, vielseitig einsetzen. Die These 3: Sicherstellung des notwendigen Materialflusses, war der wesentliche Untersuchungspunkt dieses Kapitels. In allen drei Simulationsstudien (Türenvor-, End- und Matrixmontage) konnte, unter Zugrundelegung des Vorhandenseins der notwendigen Betriebsmittel, eine Sicherstellung des Materialflusses erreicht werden. Während bei der Türenvor- und Endmontage reale Produktionsdaten zum Vergleich der Produktionsmenge zur Verfügung standen, wurden bei der Matrixmontage theoretische Ausbringungsmengen mit den Simulationsergebnissen verglichen.

⁷¹⁹ Zur Erläuterung des Materialstreifens siehe 64.

Dabei wurden die in diesem Kapitel vorgestellten Simulationsmodelle nach bestem Wissen und in möglichst großer Übereinstimmung mit der Realität aufgebaut. Zusätzlich wurden die in der Simulation eingesetzten Daten direkt von einem Automobilhersteller bezogen und stellen die Situation einer Vormontagelinie, einer Endmontagelinie und einer gedachten Matrixmontage dar. Die Modellierung der Matrixmontage erfolgte auf Basis von aktuellen Überlegungen aus dem Projekt ARENA2036. Durch den direkten Bezug liegt eine hohe Güte der Daten vor und es kann eine Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf dieses Werk angenommen werden. Für andere Produktionswerke mit den jeweils eigenen, technischen Besonderheiten sollten vor einer Zustimmung der Übertragbarkeit eigene Simulationsläufe mit vorhandenem Datenmaterial durchgeführt werden. Zwar wird in den unterschiedlichen Simulationen ermittelt, welche Betriebsmittel für die Materialzuführung mit den jeweiligen Konzepten notwendig wäre und die Simulationsergebnisse der drei Simulationsstudien wurden zusätzlich in der Logistikarbeitsgruppe in ARENA2036 vorgestellt und diskutiert. Dort war das Resultat der Diskussionen, dass die als Ergebnis erzielten Anzahlen von Betriebsmitteln im Rahmen der heute zum Einsatz kommenden Werte liegen. Ein Vergleich mit den real vorhandenen Betriebsmitteln in einem bestimmten Produktionswerk konnte jedoch nicht stattfinden. Diese Aufgabe ist im Rahmen der vorliegenden Dissertation an einem Universitätsinstitut, insbesondere wegen Geheimhaltungsgründen der Premiumhersteller, nicht umsetzbar gewesen. Diese Aufgabe sieht der Ersteller dieser Arbeit eher im Verantwortlichkeitsgebiet der jeweiligen (Logistik-)Planer in den Werken.

Zusätzlich zu den hier vorgestellten Simulationsstudien der Türenvor-, End- und Matrixmontage wurde jedes der neuartigen Logistikkonzepte (Riegelkonzept, Einzel-FTF- und Warenkorbkonzept) auch jeweils einzeln für sich simuliert. Beispielsweise wurde ein Modell zur Materialbereitstellung ausschließlich per Riegelkonzept erstellt, mit Daten simuliert und bewertet. Ebenso wurde für das Einzel-FTF und das Warenkorb-Konzept ein solches Simulationsmodell aufgebaut, simuliert und analysiert. Da im Rahmen der Projekttreffen in der Logistikarbeitsgruppe in ARENA2036 festgestellt wurde, dass eine Kombination von unterschiedlichen Konzepten für die Materialbereitstellung optimalere Ergebnisse liefert, wurden diese einzelnen Simulationsstudien je Logistikkonzept in dieser Arbeit nicht vorgestellt.

5 Fazit und Ausblick

Zu Beginn dieser Arbeit wurden die fünf Herausforderungen der deutschen Premiumhersteller ausgearbeitet und darauf aufbauend drei Thesen für zukunftsgerichtete Logistikkonzepte aufgestellt. Daran schließt sich eine Beschreibung der heutigen Automobilproduktion inklusive der dazu eingesetzten Logistikkonzepte und zugehörigen Betriebsmittel an. Mit dem Wissen zu aktuellen Konzepten und deren Möglichkeiten sowie Nachteilen begann die Ausarbeitung von neuen Logistikkonzepten in der ARENA2036 Logistikarbeitsgruppe. Für den Kontext einer sich verändernden Automobilproduktion mit den daraus entstehenden Herausforderungen für die deutschen Premiumhersteller konnten zehn neue Logistikkonzepte erarbeitet werden. Anhand von Analysen wurden drei der neuartigen Logistikkonzepte, namentlich das Riegelkonzept, das Einzel-FTF- und das Warenkorb-Konzept als besonders geeignete Ansätze für die Herausforderungen ausgewählt und weiter detailliert. Im Anschluss an die Detaillierung wurden die drei neuartigen Logistikkonzepte anhand von drei Simulationsstudien (Türenvor,- End- und Matrixmontage) in Bezug auf Funktionalität und Umsetzbarkeit untersucht. Dabei wurde bei den Simulationsstudien und den verwendeten vier Szenarien der geforderte Materialfluss erreicht. Bei Szenario 2-4 unter Einbindung des Gitterbox-Konzepts für großvolumige Bauteile. Der Beweis über den Materialfluss konnte bei den Simulationsstudien durch das Erreichen der vorgegebenen Produktionsmenge bewiesen werden. Als Vergleichswerte für den Materialfluss in den Simulationsstudien der Türenvor- und Endmontage standen reale Produktionsdaten zur Verfügung. Da für die Simulationsstudie der Matrixmontage keine realen Produktionsdaten herangezogen werden konnten, wurden stattdessen theoretische Produktionsmengen auf Basis eines theoretischen Produktionsprogramms ermittelt. Das Ergebnis der drei Simulationsstudien lautet, dass die neuartigen Logistikkonzepte, unter Annahme einer gewissen Zahl an Flurförderfahrzeugen, den geforderten Materialfluss erreichen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Materialbereitstellung und insbesondere die Sequenzierung beim Riegelkonzept örtlich und zeitlich direkt am Verbauort stattfinden. Aufgrund der kurzfristigen Auslagerungsmöglichkeit erfolgt die Materialbereitstellung beim Riegelkonzept nicht mehr JIS sondern JIRT. Grund hierfür ist, dass das Riegelkonzept zu jeder Zeit die Flexibilität bietet einen der Ladungsträger mit dem darin befindlichen Material auszulagern und bereitzustellen.

Die zu Beginn der Arbeit in Kapitel 1.4 aufgestellten Thesen⁷²⁰ wurden anhand der Simulationsstudien bewiesen, siehe weiterführende Erklärungen hierzu in Kapitel 4.12. Weiterhin kann abschließend die Aussage formuliert werden, dass die drei neuartigen Logistikkonzepte gezielte Lösungsmöglichkeiten für die fünf Herausforderungen der Premiumhersteller liefern,

⁷²⁰ These 1 beschreibt, dass die neuartigen Logistikkonzepte flexibel auf Änderungen der Produktionsreihenfolge reagieren können. These 2 setzt voraus, dass die neuartigen Logistikkonzepte wandelbar sind und These 3 setzt die Sicherstellung des notwendigen Materialflusses durch die neuartigen Logistikkonzepte voraus.

da die Thesen auf Basis der Herausforderungen formuliert wurden.

Dies wirft jedoch die Frage auf, welches Logistikkonzept aus kostentechnischer Sicht besonders für die Anlieferung eines Montageteils geeignet ist. Deshalb muss in folgenden Forschungsarbeiten das in Kapitel 3.9 grob beschriebene Auswahlwerkzeug zur Bestimmung des optimalen Logistikkonzepts weiter vorangetrieben werden. Die grundsätzliche, methodische Vorgehensweise bei diesem Auswahlwerkzeug wurde im Jahr 2015 als Patent angemeldet.⁷²¹ Erst im Anschluss an den finalen Aufbau der Prototypen der neuartigen förder-, lager- und handhabungstechnischen Geräte (z. B. des Riegelkonzepts oder des Montage- und Logistik-Groß-FTF) können erste Business-Cases mit dem Auswahlwerkzeug gerechnet werden. Wenn im Rahmen der weiteren Forschung das Auswahlwerkzeug weiterentwickelt wird, können Anwendungsszenarien für die neuartigen Logistikkonzepte anhand von Vergleichsrechnungen vorab validiert werden. Aufbauend darauf sind nachvollziehbare Aussagen über die wirtschaftliche Einsetzbarkeit der neuartigen Konzepte möglich, anhand dessen der Weg der Konzepte in die Praxis wesentlich unterstützt wird.

Dem Autor dieser Dissertation ist klar, dass der erfolgreiche Einsatz der drei neuartigen Logistikkonzepte in der Praxis von vielen unterschiedlichen Faktoren abhängen wird. Dementsprechend müssen die in dieser Arbeit beschriebenen Neuerungen für die Automobilproduktionslogistik in ersten Umsetzungen die Akzeptanz der Verantwortlichen erreichen. Beispielsweise müssen beteiligte Mitarbeiter so früh wie möglich in den Einführungsprozess eingebunden werden, um Hürden abzubauen und Zurückweisung der neuen Betriebsmittel zu verhindern. Voraussichtlich werden bestimmte Bausteine oder Konzepte dieser Arbeit in naher Zukunft erst in kleinen Stufen umgesetzt, um die Mitarbeiter in den betreffenden Bereichen mit den neuen Logistikkonzepten vertraut zu machen. Gleichzeitig ist, aufgrund der Analyse der Ist-Situation, deutlich erkennbar, dass ein stures Beibehalten der aktuellen Logistikkonzepte zu immer weiteren Kostensteigerungen in der Automobilproduktionslogistik speziell im Premiumsektor führen wird.⁷²² Insbesondere, wenn der aktuell stattfindende Anstieg an Varianten weiter anhält. Obwohl die jetzigen Logistikkonzepte sehr weit ausgereift sind und beispielsweise für einige Automobilhersteller im „Niedrigpreissegment“ mit kleiner Varianz auch einige Jahre lang vermutlich noch weiter geeignet sind, gilt, gerade für die in Deutschland ansässigen Hersteller von Premiumfahrzeugen mit ihren vielfältigen Ausstattungsvarianten und der immer weiter steigenden Typenvielfalt der Fahrzeuge, die Konzeption und Implementierung von neuartigen Logistikkonzepten als notwendiger Schritt für eine erfolgreiche Unternehmenszukunft. Hierzu sollte auch das in ARENA2036 aufgestellte Produktionskonzept der Matrixmontage mit einbezogen werden, um ein höheres Maß an Flexibilität und Wandelbarkeit zu erreichen. Damit verbunden ist die Möglichkeit, besser auf Absatzschwankungen oder Krisen (wie beispielsweise in den Jahren 2008 - 2009, mit Bestelleinbrüchen von 30-40 %) reagieren zu können, weil die Fertigungsvorgaben für unterschiedliche Fahrzeuge mit nahezu beliebigen Varianten einstellbar, variabel und flexibel

⁷²¹ Aktenzeichen des Patents beim DPMA: DE102015013040A1

⁷²² Vgl. Rinza und Boppert (2007), S. 19.

sind.

Zusammenfassend liefern die neu entwickelten Konzepte erste Ansätze für Veränderungen in der Produktionslogistik für variantenreiche Montagewerke. Dabei ist es wichtig, sich die weitere Entwicklung der Produktvielfalt deutlich zu machen und zu erkennen, dass die bisherigen, häufig Kanban-basierten Logistikkonzepte zeitnah an Grenzen stoßen oder diese schon erreicht haben. Werden weitere Steigerungen für die Variantenzahl der zu fertigenden Produkte, insbesondere in Richtung Stückzahl 1, angenommen, dann müssen hierfür neuartige Logistikkonzepte zum Einsatz kommen.

Abschließend sollen zum Matrixkonzept noch einige Punkte diskutiert werden. Durch die Möglichkeit mit dem Konzept der Matrixmontage in einem neuartigen Montagewerk unterschiedliche Fahrzeugtypen zu produzieren, kann insgesamt eine höhere Auslastung der Montage erreicht werden. Für die Umsetzung dieses neuen Montagekonzepts muss jedoch noch weitere Forschung, insbesondere auf Seiten der Montage, unternommen werden. Hierzu gehören auch Untersuchungen zum Konzept der mitfahrenden Werker auf dem Montage- und Logistik-Groß-FTF stattfinden. Die darauf aufbauende Umgestaltung in der Automobilproduktionslogistik wird, insbesondere in Bezug auf bestehende Produktionswerke, ein arbeitsintensiver Prozess werden. Dabei müssen einige Konzepte nach ausführlicher Untersuchung sicher auch wieder verworfen oder abgeändert werden. Zudem bietet das Konzept der Matrixmontage unter Verwendung der neuartigen Logistikkonzepte und des Montage- und Logistik-Groß-FTF sowie der notwendigen Betriebsmittel Unterfahr-FTF, Mini-RBG und Riegelgestell, Warenkorb-Gestell sowie Einzel-FTF-Gestell, theoretisch die Möglichkeit, die Montage von mehreren Typen von Fahrzeugmodellen in einer Montagefabrik (ohne Band) durchzuführen.

Die Umgestaltung der Produktionslogistik kann dabei für andere Branchen eine wichtige Vorreiterrolle spielen. Ob die Forschungsaktivitäten im Projekt ARENA2036 für die Automobilindustrie in allen Aspekten in die Richtung zielen, wird sich in einigen Jahren zeigen. Innovationen und effiziente Abläufe, die im Projekt entwickelt werden, lassen sich aber sicherlich auch losgelöst auf andere Produktionsumgebungen übertragen und können dort zu erheblichen Optimierungspotentialen führen. Dabei wird eine Anbindung an eine vernetzte Industrie 4.0 für den Erfolg der Umsetzung dieser neuen Konzepte wesentlich sein. Insbesondere die Einführung von selbststeuernden Regelkreisen, die nur in Ausnahmefällen das (nachsteuernde) Eingreifen eines Mitarbeiters benötigen, werden effizientere Prozesse in der Automobilproduktionslogistik ermöglichen, siehe dazu die Erläuterungen in Kapitel 3.9. Zentraler Bestandteil sind selbststeuernde logistische Objekte, die in der Lage sind, ihre Entscheidungsprozesse weitgehend eigenständig, lediglich auf Basis von Kommunikation mit anderen Objekten, durchzuführen.

A Anhang

A.1 Tabellen mit KLT-Maßen

Im folgenden werden die drei wichtigsten KLT-Reihen R-KLT, RL-KLT und F-KLT mit den Abmessungen und Aufnahmedaten beschrieben. R-KLT steht für den Redesign-KLT, der eine Weiterentwicklung des C-KLT darstellt. Beim RL-KLT handelt es sich um einen Redesign-light-KLT, der gegenüber dem R-KLT weniger Eigengewicht aber auch weniger Nutzlast liefert. F-KLT steht für falt-KLT, dies ist ein faltbarer KLT, der zusammengeklappt werden kann und dadurch im leeren Zustand weniger Platz einnimmt.⁷²³

Tabelle 18: VDA R-KLT-System (Quelle: VDA4500)

Kurzbezeichnung	Nennmaße (mm)	Nutzmaße (mm)	Außenvolumen (l)	Innenvolumen (l)	Gewicht (kg)
3215	300 x 200 x 148	243 x 162 x 129,5	8,7	5,3	0,57
4315	400 x 300 x 148	346 x 265 x 109,5	17,0	10,0	1,29
4322	400 x 300 x 214	346 x 265 x 176,1	25,5	16,2	1,61
4329	400 x 300 x 280	346 x 265 x 242,3	33,0	22,0	1,85
6415	600 x 400 x 148	544 x 364 x 109,5	35,0	22,0	2,10
6422	600 x 400 x 214	544 x 364 x 175,8	51,0	34,9	2,60
6429	600 x 400 x 280	544 x 364 x 242,0	65,0	48,0	2,97

Tabelle 19: VDA RL-KLT-System (Quelle: VDA4500)

Kurzbezeichnung	Nennmaße (mm)	Nutzmaße (mm)	Außenvolumen (l)	Innenvolumen (l)	Gewicht (kg)
3147	300 x 200 x 148	243 x 162 x 129,5	8,7	5,3	0,57
4147	400 x 300 x 148	345 x 260 x 129,5	17,0	11,8	1,08
4213	400 x 300 x 214	345 x 260 x 196,1	25,5	17,9	1,42
4280	400 x 300 x 280	345 x 260 x 262,3	33,0	24,1	1,70
6147	600 x 400 x 148	544 x 359 x 129,5	35,0	25,0	1,82
6213	600 x 400 x 214	544 x 359 x 195,8	51,0	38,9	2,27
6280	600 x 400 x 280	544 x 359 x 262,0	65,0	51,9	2,67

Tabelle 20: VDA F-KLT-System (Quelle: VDA4500)

Kurzbezeichnung	Nennmaße (mm)	Nutzmaße (mm)	Außenvolumen (l)	Innenvolumen (l)	Gewicht (kg)
6410	600 x 400 x 280	534 x 357 x 237,4	65,0	46,0	3,40

⁷²³ Vgl. VDA 4500 (2006), S. 5 ff.

A.2 Weitere Ansicht des Riegelsystems



Abbildung A.1: Beladenes Riegelgestell und Unterfahr-FTF (eigene Darstellung)

A.3 Detailbeschreibung Kriterien Nutzwertanalyse

An dieser Stelle werden die Kriterien zur Durchführung der Nutzwertanalyse detailliert beschrieben:

- Montage- und Logistik-Groß-FTF Fahrweg-Länge: Wie lang ist der Fahrweg des Montage- und Logistik-Groß-FTF? (Je länger, desto schlechter ist die Note.)
- Logistik-FTF Fahrweg-Länge: Wie lang ist der oder sind die Fahrwege der Logistik-FTF beim jeweiligen Logistikkonzept? (Je länger, desto schlechter ist die Note.)
- Logistik-FTF Fahrweg-Dimension: Welche Dimensionen müssen die Fahrwege für die Logistik-FTF beim jeweiligen Logistikkonzept aufweisen? (Je größer die notwendigen Fahrwege, desto schlechter ist die Note.)
- Flächenbedarf in der Montagehalle: Wie viel Fläche wird beim jeweiligen Logistikkonzept in der Montagehalle benötigt? (Je mehr Fläche benötigt wird, desto schlechter ist die Note.)
- Anzahl Handlungsschritte/Umschlagsvorgänge: Wie viele Handlungsschritte gibt es beim jeweiligen Logistikkonzept zwischen Werkstor und Montageort. (Je mehr Handlungsschritte, desto schlechter ist die Note.)
- Leichtigkeit Resequenzierung: Wie leicht können schon sequenzierte Materialien beim jeweiligen Logistikkonzept in eine neue Reihenfolge (Sequenz) gebracht also umsortiert werden? (Je höher die Aufwände, desto schlechter die Note.)
- Bestandsmenge im Werk: Wie hoch müssen für das jeweilige Logistikkonzept die Bestände im Werk sein, um eine hohe Versorgungssicherheit (z. B. auf Stundenbasis) der Produktion mit Material sicherzustellen? (Je höher die Bestände, desto schlechter die Note.)
- Bestandsmenge in der Lieferkette: Wie hoch müssen für das jeweilige Logistikkonzept die Bestände in der Lieferkette (z. B. bei Dienstleistern) sein, um eine hohe Versorgungssicherheit (z. B. auf Stundenbasis) der Produktion mit Material sicherzustellen? (Je höher die Bestände, desto schlechter die Note.)
- Brownfield Umsetzbarkeit: Welcher Aufwand ist für die Umsetzbarkeit des jeweiligen Logistikkonzepts für ein Brownfield-Werk nötig? (Je höher die Aufwände, desto schlechter die Note.)
- Planungsaufwand Greenfield: Welcher Aufwand ist für die Einplanung des jeweiligen Logistikkonzepts für ein Greenfield-Werk nötig? (Je höher die Aufwände, desto schlechter die Note.)

- Anzahl benötigter Betriebsmittel: Welche Anzahl von Betriebsmitteln werden für die Realisierung des jeweiligen Logistikkonzepts benötigt? (Je höher die Anzahl, desto schlechter die Note.)
- Anschaffungskosten für Betriebsmittel: Wie hoch sind ca. die Anschaffungskosten für die benötigten Betriebsmittel des jeweiligen Logistikkonzepts? (Je höher die Kosten, desto schlechter die Note.)
- Anschaffungskosten für Lager (Installationskosten): Wie hoch sind ca. die Anschaffungskosten für die benötigten Lager beim jeweiligen Logistikkonzept? (Je höher die Kosten, desto schlechter die Note.)
- Variable Kosten für Lager: Wie hoch sind ca. die variablen Kosten für den Betrieb des Lagers oder der Lager beim jeweiligen Logistikkonzept? (Je höher die Kosten, desto schlechter die Note.)
- Flächenbedarf für Lager im Werk: Wie hoch sind ca. die Flächenbedarfe für die Lager des jeweiligen Logistikkonzepts im Werk? (Je mehr Flächen benötigt werden, desto schlechter die Note.)
- Ausfallwahrscheinlichkeit: Wie hoch ist die Ausfallwahrscheinlichkeit der Betriebsmittel des jeweiligen Logistikkonzepts? (Je höher die Ausfallwahrscheinlichkeit, desto schlechter die Note.)
- Ausfallfolge: Wie hoch sind die Ausfallfolgen des jeweiligen Logistikkonzepts für die Produktion bzw. Montage? (Je höher die Ausfallfolgen, desto schlechter die Note.)
- Wechsel von Automatisierung auf manuellen Betrieb (und zurück) möglich? Ist mit dem jeweiligen Konzept ein kurzfristiger Wechsel von automatisiertem Betrieb auf manuellen Betrieb und zurück möglich? (Je mehr Aufwand für den Wechsel notwendig ist, desto schlechter die Note.)
- Auswirkung Stückzahländerung (Produktionsmenge): Wie groß sind die Auswirkungen von Stückzahländerungen auf das jeweilige Konzept. (Je größer die Auswirkungen, desto schlechter die Note.)
- Verwendung bei hoher Stückzahlvarianz: Wie gut ist das jeweilige Konzept für die Materialbereitstellung bei hoher Stückzahlvarianz geeignet. (Je schlechter die Eignung, desto schlechter die Note.)
- Eignung Änderung Variantenmix: Wie gut ist das jeweilige Konzept für die Materialbereitstellung bei sich änderndem Variantenmix (Beispielhaft die Reduzierung der Produktionsmenge der Variante sport beim Fahrzeugmodell A und Erhöhung der Variante classic) geeignet. (Je schlechter die Eignung, desto schlechter die Note.)

- Eignung Model-Mix: Mit wie viel Aufwand kann beim jeweiligen Logistikkonzept eine hohe Varianz unterschiedlicher ausgestatteter Fahrzeuge an einer Station beliefert werden? Beispielsweise voll ausgestattete Tür gegenüber einer gering ausgestatteten Tür. (Je höher der Aufwand, desto schlechter die Note.)

A.4 Beschreibung der Benutzeroberfläche von Plant Simulation

Die Abbildung A.2 stellt die Benutzeroberfläche von Plant Simulation dar. Dabei handelt es sich um ein sogenanntes multiple document interface (MDI), bei dem mehrere Fenster in einem übergeordneten Fenster angezeigt werden. Folgende fünf Bereiche können dabei unterteilt werden, siehe auch die Nummern in der Abbildung:

1. Angabe von Projektname und aktivem Netzwerk,
2. Bausteine aus der Klassenbibliothek,
3. Klassenbibliothek,
4. Netzwerkfenster und
5. Konsole zur Ausgabe von Methodenabläufen.

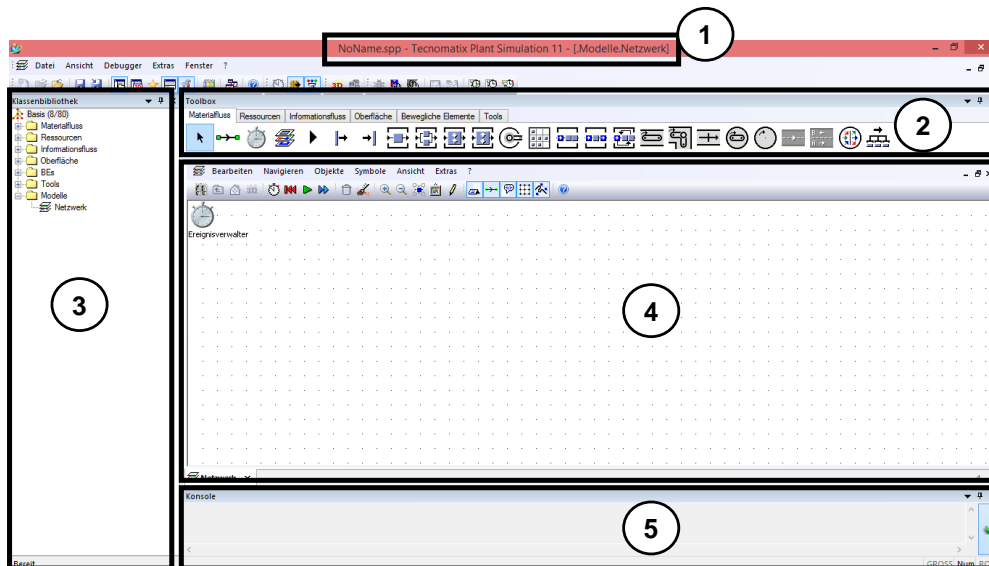


Abbildung A.2: Ansicht der Benutzeroberfläche von Plant Simulation (eigene Darstellung)

A.5 Bereitstellungsnetzwerke der Endmontage

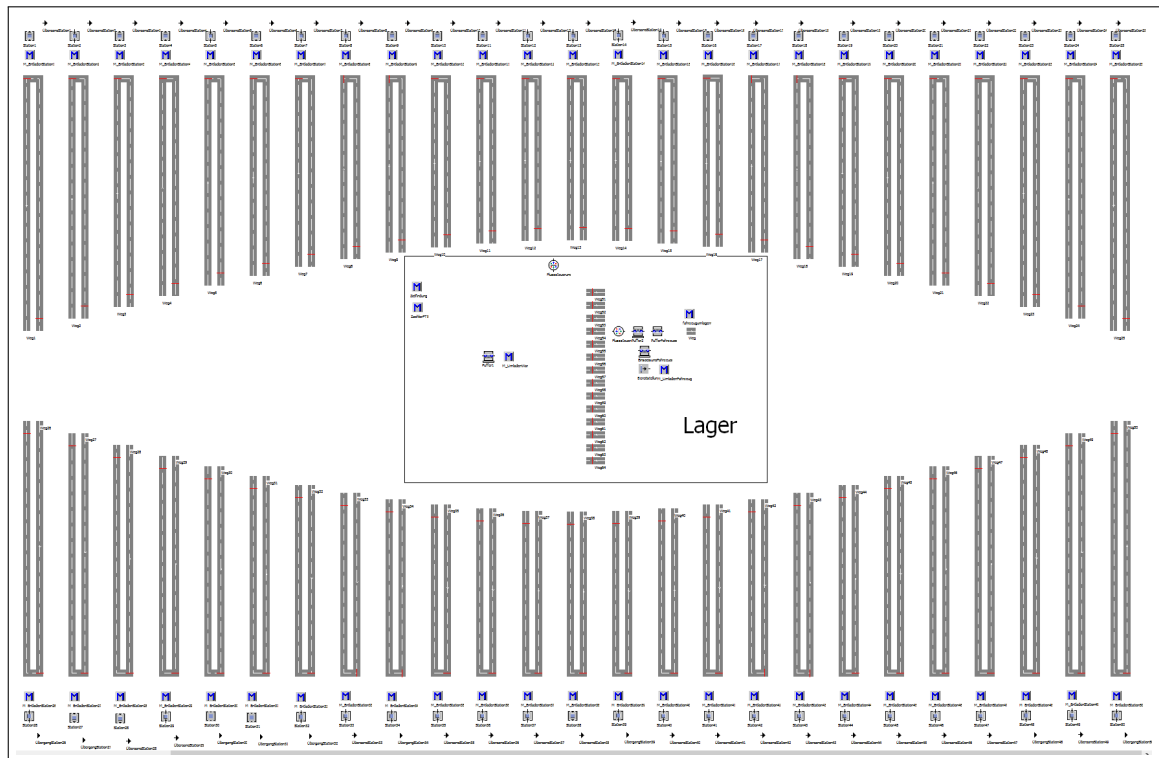


Abbildung A.3: Bereitstellungsnetzwerk des Einzel-FTF-Konzepts im Simulationsmodell der Endmontage

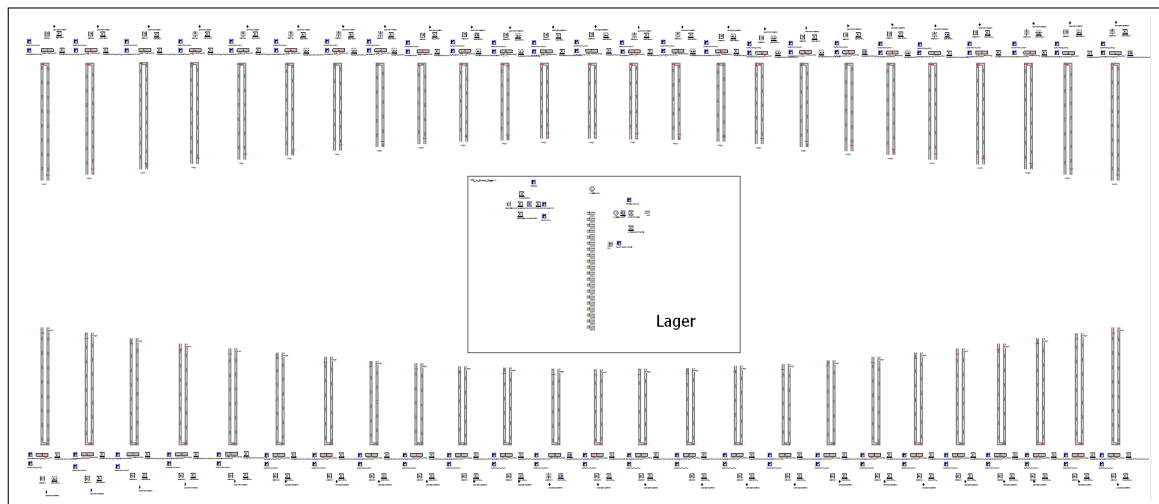


Abbildung A.4: Bereitstellungsnetzwerk des Riegelkonzepts im Simulationsmodell der Endmontage

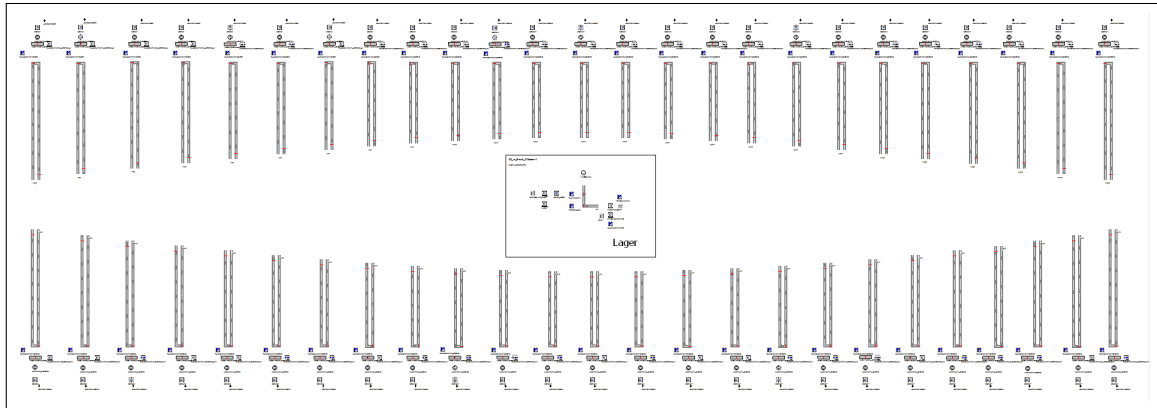


Abbildung A.5: Bereitstellungsnetzwerk des Gitterbox-Konzepts im Simulationsmodell der Endmontage

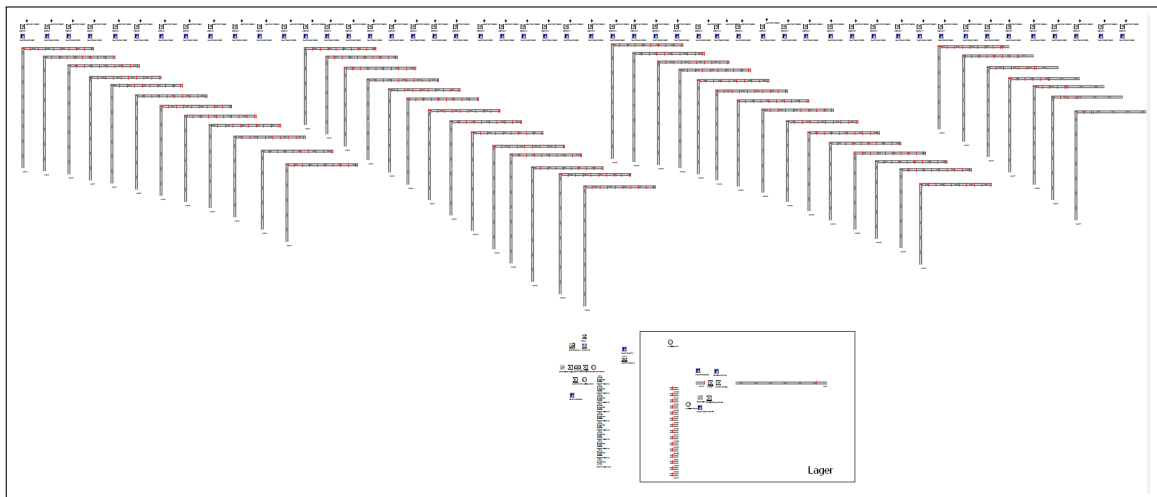


Abbildung A.6: Bereitstellungsnetzwerk des Warenkorbkonzepts im Simulationsmodell der Endmontage

A.6 Konzeptauswahl bei der Simulation der Matrixmontage

Tabelle 21: Ausgewählte Logistikkonzepte für die Simulation der Matrixmontage

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Station 1	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 2	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 3	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 4	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 5	Riegelkonzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 6	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 7	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 8	Riegelkonzept	Warenkorb-Konzept	Warenkorb-Konzept	Riegelkonzept
Station 9	Einzel-FTF-Konzept	Warenkorb-Konzept	Warenkorb-Konzept	Riegelkonzept
Station 10	Einzel-FTF-Konzept	Warenkorb-Konzept	Warenkorb-Konzept	Riegelkonzept
Station 11	Einzel-FTF-Konzept	Warenkorb-Konzept	Warenkorb-Konzept	Riegelkonzept
Station 12	Riegelkonzept	Warenkorb-Konzept	Warenkorb-Konzept	Riegelkonzept
Station 13	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 14	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 15	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 16	Riegelkonzept	Warenkorb-Konzept	Warenkorb-Konzept	Riegelkonzept
Station 17	Einzel-FTF-Konzept	Warenkorb-Konzept	Warenkorb-Konzept	Riegelkonzept
Station 18	Einzel-FTF-Konzept	Warenkorb-Konzept	Warenkorb-Konzept	Riegelkonzept
Station 19	Einzel-FTF-Konzept	Warenkorb-Konzept	Warenkorb-Konzept	Riegelkonzept
Station 20	Riegelkonzept	Warenkorb-Konzept	Warenkorb-Konzept	Riegelkonzept
Station 21	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 22	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 23	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 24	Riegelkonzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 25	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 26	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 27	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 28	Riegelkonzept	Gitterbox-Konzept	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 29	Riegelkonzept	Gitterbox-Konzept	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 30	Riegelkonzept	Gitterbox-Konzept	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 31	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 32	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 33	Einzel-FTF-Konzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 34	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 35	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 36	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 37	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 38	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 39	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 40	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 41	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 42	Einzel-FTF-Konzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 43	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 44	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 45	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 46	Einzel-FTF-Konzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 47	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 48	Riegelkonzept	Gitterbox-Konzept	Einzel-FTF-Konzept	Gitterbox-Konzept
Station 49	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept
Station 50	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept	Riegelkonzept

Literatur

- Abele, E. und G. Reinhart (2011). *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Hanser.
- Abels, H. (2016). *Aufgaben und Funktionen in der Produktionsplanung und -steuerung*. URL: http://www.f08.fh-koeln.de/imperia/md/content/personen/professoren/abels_helmut/downloads/diplom/vorlesung_pps_323_alt_strategien_und_verfahren_zur_fertigungssteuerung.pdf (besucht am 10.09.2016).
- Adam, D. (1996). *Planung und Entscheidung: Modelle - Ziele - Methoden*. Wiesbaden: Gabler.
- Ahsen, A. v. (2006). *Integriertes Qualitäts- und Umweltmanagement: mehrdimensionale Modellierung und Umsetzung in der deutschen Automobilindustrie*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.
- Alford, D., P. Sackett und G. Nelder (2000). "Mass customisation - an automotive perspective". In: *International Journal of Production Economics* 65.1, S. 99–110.
- Althoff, K. (2010). "Das Geheimnis des Flusses". In: *Automotive Agenda* 3.3, S. 80–83.
- Aoki, K., T. Staebelin und T. Tomino (2014). "Monozukuri capability to address product variety: A comparison between Japanese and German automotive makers". In: *International Journal of Production Economics* 147, S. 373–384.
- Arbeitsstudien REFA e. V., V. f. (1974). *Methodenlehre der Planung und Steuerung*. Carl Hanser Verlag.
- ARENA2036 (2015). *ARENA2036*. URL: http://www.arena2036.de/images/info_center/publikationen/Flyer_2015.pdf (besucht am 10.05.2017).
- Arnold, D. (2006a). "Einleitung des Herausgebers". In: *Intralogistik*. Springer, S. 1–4.
- Arnold, D., Hrsg. (2006b). *Intralogistik: Potentiale, Perspektiven, Prognosen*. VDI-Buch. Berlin: Springer.
- Arnold, D. u. a. (2008). *Handbuch Logistik*. Bd. 3. Springer.
- Ashford, J. L. (1989). *The management of quality in construction*. London: E. & F.N. Spon.
- Audi AG (2016). *Modellübersichten Audi*. online. URL: http://www.audi.de/etc/medialib/ngw/product/special_purpose_vehicles.Par.0218.File.pdf/rlf_audi_datenblaetter.pdf (besucht am 02.08.2016).
- Aurich, J., P. Barbian und C. Wagenknecht (2003). "Prozessmodule zur Gestaltung flexibilitätsgerechter Produktionssysteme". In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 98.5, S. 214–218.
- Balci, O. (1998). "Verification, validation, and testing". In: *Handbook of simulation*. Hrsg. von J. Banks. Bd. 10. John Wiley und Sons, S. 335–393.

- Bangsow, S. (2008). *Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk*. Carl Hanser-Verlag, München.
- Bangsow, S. (2011). *Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk*. München: Hanser.
- Banks, J. (1998). *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. New York: Wiley.
- Bartholdi, J. J. und S. T. Hackman (2011). "Warehouse & distribution science". In: *Atlanta, GA, The Supply Chain and Logistics Institute, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology*.
- Barton, P. und C. Pantelides (1994). "Modeling of combined discrete/continuous processes". In: *AIChE journal* 40.6, S. 966–979.
- Battini, D., N. Boysen und S. Emde (2012). "Just-in-Time supermarkets for part supply in the automobile industry". In: *Journal of Management Control* 24.2, S. 209–217.
- Bauer, N. (2008). "Die Fabrik von heute für das Auto von morgen". In: *Das Beste der Logistik*. Springer, S. 257–266.
- Bauernhansl, T. (2014). "Die Vierte Industrielle Revolution - Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma". In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Hrsg. von T. Bauernhansl, M. ten Hompel und B. Vogel-Heuser. Wiesbaden: Springer, S. 5–35.
- Bauernhansl, T. (2017). "Automotive industry without conveyer belt and cycle – research campus ARENA2036". In: *Handbuch Industrie 4.0*. Hrsg. von B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel. Berlin: Springer Vieweg.
- Baum, H. und W. Delfmann (2010). *Strategische Handlungsoptionen der deutschen Automobilindustrie in der Wirtschaftskrise: Sachverständigen-Expertise für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie*. Köln: Kölner Wissenschaftsverlag.
- Baumgarten, H. (2008). *Das Beste der Logistik: Innovationen, Strategien, Umsetzungen*. Berlin: Springer.
- Bayer, J., T. Collisi und S. Wenzel (2003). *Simulation in der Automobilproduktion*. Springer.
- Becker, H. (2006a). *High noon in the automotive industry*. Berlin: Springer.
- Becker, H. (2006b). *Phänomen Toyota: Erfolgsfaktor Ethik*. Berlin: Springer.
- Becker, H. (2007). *Auf Crashkurs: Automobilindustrie im globalen Verdrängungswettbewerb*. Springer.
- Benkenstein, M. (2001). *Entscheidungsorientiertes Marketing: eine Einführung*. Lehrbuch Gabler. Wiesbaden: Gabler.
- Benz, M. (2015). „INTELLIGENTE PRODUKTION“ IM MERCEDES-BENZ WERK LUDWIGSFELDE. online. URL: <http://blog.mercedes-benz-passion.com/2015/06/intelligente-produktion-im-mercedes-benz-werk-ludwigsfelde/> (besucht am 28.08.2016).
- Bichler, K., R. Krohn und P. Philippi (2010). *Gabler Kompaktlexikon Logistik*. Springer.

- Bode, W. und R. Preuß (2004). *Intralogistik in der Praxis - Komplettanbieter der Intralogistik*. Suhl in Thüringen: Wirtschafts Verlag.
- Böhl, J. (2001). "Wissensmanagement im klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung". Diss. München: Technische Universität München.
- Borenich, A. u. a. (2014). "Unterstützung des Angebotsprozesses eines Automobilzulieferers durch ein Produktionsmodell mit mehreren Gewerken". In: *Logistische Modellierung: 2. Wissenschaftlicher Industrielogistik-Dialog in Leoben (WILD)*, S. 57.
- Boysen, N. (2007). "Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung". In: *Operations Research Proceedings 2006*. Springer, S. 11–15.
- Boysen, N., M. Fliedner und A. Scholl (2007). "Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung: Planungshierarchie und Elemente einer hierarchischen Planung". In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 77.7-8, S. 759–793.
- Boysen, N., U. Golle und F. Rothlauf (2011). "The car resequencing problem with pull-off tables". In: *BuR-Business Research* 4.2, S. 276–292.
- Boysen, N. u. a. (2015). "Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda". In: *European Journal of Operational Research* 242.1, S. 107–120.
- Bozer, Y. und L. McGinnis (1992). "Kitting versus line stocking: a conceptual framework and a descriptive model". In: *International Journal of Production Economics* 28.1, S. 1–19.
- Brüggemeier, M. (2007). "Neue Perspektiven und Forschungsbedarf für einen aufgeklärten Gewährleistungsstaat auf der Basis von E-Government". In: *VM Verwaltung & Management* 13.2, S. 79–85.
- Brunner, F. J. (2008). *Japanische Erfolgskonzepte: KAIZEN, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance, Shopfloor Management, Toyota Production Management*. München: Hanser.
- Bruns, R. (2007). "Flurförderzeuge". In: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. Grote und J. Feldhusen. Berlin, Heidelberg: Springer, U43–U50.
- Bruns, R. (2011). "Flurförderzeuge". In: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. Grote und J. Feldhusen. Berlin, Heidelberg: Springer, U44–U51.
- Bruns, R. u. a. (2011). "Stetigförderer". In: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. Grote und J. Feldhusen. Berlin, Heidelberg: Springer, U55–U83.
- Buhse, W., Hrsg. (2008). *Enterprise 2.0 - Die Kunst, loszulassen*. Berlin: Rhombos.
- Bullinger, H.-J. und M. M. Lung (1994). *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*. Wiesbaden: Springer.
- Bullinger, H.-J., D. Rieth und H. P. Euler (1993). *Planung entkoppelter Montagesysteme: Puffer in der Montage*. Stuttgart: Teubner.

- Consulting, M. M. (2004). *Future Automotive Industry Structure (FAST) 2015 - die neue Arbeitsteilung in der Automobilindustrie*. Frankfurt am Main: VDA.
- Conway, R. u. a. (1988). "The role of work-in-process inventory in serial production lines". In: *Operations research* 36.2, S. 229–241.
- Corsten, H., M. Reiß und J. Becker (1999). *Betriebswirtschaftslehre*. Hrsg. von H. Corsten und J. Becker. München: Oldenbourg.
- Daimler (2015). „Intelligente Produktion“: Mercedes-Benz Werk Ludwigsfelde setzt auf neue Technologien und Effizienz in der Transporter-Fertigung. URL: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Intelligente-Produktion-Mercedes-Benz-Werk-Ludwigsfelde-setzt-auf-neue-Technologien-und-Effizienz-in-der-Transporter-Fertigung.xhtml?oid=9914864> (besucht am 11.05.2017).
- Dangelmaier, W. (2003). *Produktion und Information: System und Modell*. Springer-Verlag.
- Dannenberg, J. (2005). "Von der Technik zum Kunden". In: *Markenmanagement in der Automobilindustrie*. Hrsg. von B. Gottschalk. Gabler, S. 33–58.
- Davis, S. M. (1988). *Vorgriff auf die Zukunft*. Freiburg im Breisgau: Haufe.
- De Toni, A. und S. Tonchia (1998). "Manufacturing flexibility: a literature review". In: *International journal of production research* 36.6, S. 1587–1617.
- Deechongkit, S. und R. Srinon (2009). "Three alternatives approaches of material supply in assembly line: A comparative study". In: *Asia Pacific Industrial Engineering & Management System, Kitakyushu, Japan*, S. 2062–2069.
- de Jong, H. und G. Pawellek (1989). "Just-in-time Produktion / Neue Lager- und Pufferfunktionen sind Voraussetzung für marktorientiertes Arbeiten". In: *Handelsblatt* 013, S. 23.
- Dekker, R. u. a. (2013). *Reverse logistics: quantitative models for closed-loop supply chains*. Springer Science & Business Media.
- Deloitte (2014). *Umbruch in der Automobilzulieferindustrie: Standortoptimierung und Sourcing*. online. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/finance/CF-Umbruch-in-der-Automobilzuliefererindustrie-2014.pdf> (besucht am 17.03.2017).
- Dickmann, P. (2009). *Schlanker Materialfluss: mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. VDI. Berlin: Springer.
- Diehlmann, J. und J. Häcker (2010). *Automobilmanagement: die Automobilhersteller im Jahre 2020*. München: Oldenbourg.
- Diez, W. (2005). "Strategiewahl". In: *Markenmanagement in der Automobilindustrie*. Springer, S. 123–142.
- Diez, W., S. Reindl und H. Brachat, Hrsg. (2016). *Grundlagen der Automobilwirtschaft: das Standardwerk der Automobilbranche*. München: Springer.
- DIN 6730 (2011). *Papier und Pappe - Begriffe*. Deutsche Norm. DIN.

- DIN EN 13199-1 (2000). *Verpackung - Kleinladungsträgersysteme - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren*. Deutsche Norm. Normenausschuss Verpackungswesen im DIN.
- DIN EN 13698-1 (2004). *Produktspezifikationen für Paletten*. Deutsche Norm. Normenausschuss Verpackungswesen im DIN.
- DIN EN ISO 9000 (2005). *Qualitätsmanagementsysteme, Grundlagen und Begriffe*. Techn. Ber. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Dörmer, J. (2013). "Produktionsprogrammplanung bei variantenreicher Fließproduktion". Diss. Technische Universität Berlin.
- Dörnhöfer, M. (2016). "Entwicklung eines modularen Kennzahlensystems für die Automobillogistik im Kontext der schlanken Logistik". Diss. Technische Universität München.
- Dörnhöfer, M. und W. Günthner (2015). "Kennzahlensysteme für die schlanke Logistik". In: *ZWF* 11.110.
- Eley, M. (2012). *Simulation in der Logistik: Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*. Springer.
- Elkin, M. (2006). "Peak performance". In: *Automotive Logistics* May/June, S. 24–28.
- ElMaraghy, H. A. (2005). "Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms". In: *International journal of flexible manufacturing systems* 17.4, S. 261–276.
- Elmqvist, H., F. E. Cellier und M. Otter (1993). "Object-Oriented Modeling Of Hybrid Systems". In: *Proc. 1993 European Simulation Symposium*, S. 31–41.
- Emde, S. und N. Boysen (2012). "Optimally locating in-house logistics areas to facilitate JIT-supply of mixed-model assembly lines". In: *International Journal of Production Economics* 135.1, S. 393–402.
- Emde, S., M. Fliedner und N. Boysen (2012). "Optimally loading tow trains for just-in-time supply of mixed-model assembly lines". In: *IIE Transactions* 44.2, S. 121–135.
- Endres, E. und T. Wehner (2006). "Störungen zwischenbetrieblicher Kooperation - Eine Fallstudie zum Grenzstellenmanagement in der Automobilindustrie". In: *Management von Netzwerkorganisationen: Beiträge aus der „Managementforschung“*. Wiesbaden: Gabler, S. 309–353.
- Engeil, S., I. Hoffmann und L. Saponowa (1997). "Chaos in einfachen kontinuierlich diskreten dynamischen Systemen". In: *at-Automatisierungstechnik* 45.9, S. 399–406.
- Esch, F.-R. u. a. (2013). "Die Komplexität managen". In: *Strategie und Technik des Automobilmarketing*. Springer, S. 411–442.
- eurostat (2017). *EU and other major players in world-wide trade in motor cars, 2012 and 2015*. online. URL: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:EU_and_other_major_players_in_world-wide_trade_in_motor_cars,_2012_and_2015_\(EUR_million\).png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:EU_and_other_major_players_in_world-wide_trade_in_motor_cars,_2012_and_2015_(EUR_million).png) (besucht am 05.03.2017).

- Eversheim, W. und I. Abels (2003). "Simulationsgestützte Personaleinsatzplanung in der Pkw-Endmontage". In: *Simulation in der Automobilproduktion*. Springer, S. 61–70.
- Feldhusen, J., G. Pahl und W. Beitz, Hrsg. (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin: Springer Vieweg.
- Fil'o, M. u. a. (2013). "PLM Systems and Tecnomatix Plant Simulation, a Description of the Environment, Control Elements, Creation Simulations and Models". In: *American Journal of Mechanical Engineering* 1.7, S. 165–168.
- Fleischmann, B., S. Ferber und P. Henrich (2006). "Strategic planning of BMW's global production network". In: *Interfaces* 36.3, S. 194–208.
- Foith-Förster, P. und T. Bauernhansl (2015). "Changeable and reconfigurable assembly systems - A structure planning approach in automotive manufacturing". In: *15. Internationales Stuttgarter Symposium*. Springer, S. 1173–1192.
- Freye, D. (1997). "Reihenfolgeplanung in einem variantenreichen Fließfertigungssystem: ein qualitativer Ansatz aus der Automobilindustrie". Diss. Universität Göttingen.
- Friedli, T. und G. Schuh (2012). "Management globaler Produktionsnetzwerke". In: *Wettbewerbsfähigkeit der Produktion an Hochlohnstandorten*. Springer, S. 185–224.
- Fröming, J. (2009). *Ein Konzept zur Simulation wissensintensiver Aktivitäten in Geschäftsprozessen*. GITO mbH Verlag.
- Gairing, F. (2009). "Loslassen". In: *Automotive Agenda* 2.3, S. 74–77.
- Garibotto, G. u. a. (1998). "Industrial exploitation of computer vision in logistic automation: autonomous control of an intelligent forklift truck". In: *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*. Bd. 2. IEEE, S. 1459–1464.
- Gehr, F. und B. Hellingrath (2007). *Logistik in der Automobilindustrie: innovatives Supply Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen*. VDI. Berlin: Springer.
- Gleißner, H. und C. Femerling (2008). *Logistik: Grundlagen - Übungen - Fallbeispiele*. Springer.
- Golz, J. (2014). *Materialbereitstellung bei Variantenfließlinien in der Automobilendmontage*. Wiesbaden: Springer.
- Golz, J. u. a. (2012). "Part feeding at high-variant mixed-model assembly lines". In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 24.2, S. 119–141.
- Göpfert, I. (2016). *Logistik der Zukunft - Logistics for the Future*. Wiesbaden: Springer.
- Göpfert, I., D. Braun und M. Schulz (2013). *Automobillogistik: Stand und Zukunftstrends*. Springer-Verlag.
- Göpfert, I. und M. Schulz (2017). "Strategien des Variantenmanagements als Bestandteil einer logistikgerechten Produktentwicklung - Eine Untersuchung am Beispiel der Automobilindustrie". In: *Automobillogistik*. Springer, S. 391–403.

- Götz, A. (2007). "Zukunftsstandort Deutschland". In: *Automobilproduktion, Ausgabe 2*, S. 16–19.
- Grinninger, J. (2012). "Schlanke Produktionssteuerung zur Stabilisierung von Auftragsfolgen in der Automobilproduktion". Diss. Universität München.
- Große-Heitmeyer, V. (2004). "Logistik". In: *Variantenbeherrschung in der Montage*. Hrsg. von H.-P. Wiendahl. Springer, S. 67–76.
- Grünert, M. (2010). "Die Automobilindustrie im Lichte der Transaktionskostentheorie: eine Analyse der optimalen Ausgestaltung und Verteilung der Produktion, Forschung und Entwicklung sowie Logistik". Diss. Hamburg: Universität Marburg.
- Grunewald, M. (2015). "Planung von Milkruns in der Beschaffungslogistik der Automobilindustrie: ein Ansatz zur Integration von Bestandsmanagement und Tourenplanung". Diss. Wiesbaden: Technische Universität Braunschweig.
- Grünz, L. (2004). "Ein Modell zur Bewertung und Optimierung der Materialbereitstellung". Diss. Universität Dortmund.
- Gudehus, T. (2004). *Logistik: Grundlagen - Strategien - Anwendungen*. Berlin: Springer.
- Gudehus, T. (2006). *Dynamische Disposition: Strategien zur optimalen Auftrags- und Bestandsdisposition*. VDI. Berlin: Springer.
- Günthner, W. (2007). "Neue Wege in der Automobillogistik". In: *Die Vision der Supra-Adaptivität, Berlin ua.*
- Günthner, W. A. (2008). "Ereignisorientierte Logistik - Ein neuer Ansatz zur Steuerung von Logistiksystemen". In: *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Hrsg. von P. Nyhuis. Berlin: Springer.
- Günthner, W. A. (2013). *Schlanke Logistikprozesse: Handbuch für den Planer*. Berlin: Springer Vieweg.
- Günthner, W. und J. Boppert (2013). *Lean Logistics: methodisches Vorgehen und praktische Anwendung in der Automobilindustrie*. Springer-Verlag.
- Günthner, W. und E. Klenk (2012). *Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport*. München: fml Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik.
- Günthner, W. u. a. (2010). *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Springer.
- Günthner, W. u. a. (2011). "Lager- und Systemtechnik". In: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. Grote und J. Feldhusen. Springer.
- Gupta, S. M., Y. A. Al-Turki und R. F. Perry (1999). "Flexible kanban system". In: *International Journal of Operations & Production Management* 19.10, S. 1065–1093.
- Güttner, A. und T. Sommer-Dittrich (2008). "Current issues at OEMs and suppliers". In: *Build To Order*. Hrsg. von G. Parry. Springer, S. 55–73.

- Hartel, D. H. (2015). *Projektmanagement in der Logistik: Praxisleitfaden mit Beispielen aus Industrie, Handel und Dienstleistung*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Haun, M. (2014). *Cognitive Computing: Steigerung des systemischen Intelligenzprofils*. Berlin: Springer Vieweg.
- Hebezeuge Fördermittel (2017). "100 Jahre Gabelstapler". In: *Hebezeuge Fördermittel* 03, S. 14.
- Heinecker, M. (2006). "Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme". Diss. München.
- Herlyn, W. und W. Herlyn (2012). *PPS im Automobilbau*. Carl Hanser Verlag.
- Hernández Morales, R. (2003). "Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung". Diss. Universität Hannover.
- Hesse, S. (1993). *Handhabungsmaschinen: Grundlagen und Prinzipien in Aufbau, Funktion, Baugruppen, Programmierung und Steuerung*. Würzburg: Vogel.
- Hesse, S. (2006). "Automatische Montagemaschinen". In: *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Hrsg. von B. Lotter und H.-P. Wiendahl. Springer, S. 219–308.
- Hesse, S. (2012). "Automatische Montagemaschinen". In: *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Hrsg. von B. Lotter und H.-P. Wiendahl. Springer, S. 195–272.
- Hessenberger, M. und H.-C. Krcal (1997). *Innovative Logistik: Versorgungsstrategien, Standortkonzepte, Steuerungselemente*. Wiesbaden: Gabler.
- Hofmann, E. und H. Bachmann (2006). *Behälter-Management in der Praxis: State-of-the-Art und Entwicklungstendenzen bei der Steuerung von Ladungsträgerkreisläufen; [die St. Galler Behälter-Management-Studie]*. Hamburg: Dt. Verkehrs-Verl.
- Hofmann, E. u. a. (2011). "Handlungsbedarf: Von der Finanz- und Wirtschaftskrise zur „Working Capital-Falle“". In: *Wege aus der Working Capital-Falle*. Springer, S. 1–7.
- Hofmann, M. und K.-H. Wehking (2016). "Montage- und Logistik-FTF für die Automobilmontage der Zukunft". In: *Hebezeuge Fördermittel, Forschungskatalog Flurförderzeuge*.
- Holweg, M. und F. Pil (2004). *The second century: reconnecting customer and value chain through build-to-order; moving beyond mass and lean production in the auto industry*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Holweg, M. und F. Pil (2005). "Flexibility first: keeping the automotive supply chain responsive through build-to-order". In: *Industrial Engineer* 37.6, S. 46–52.
- Holzhauser, L. (2016). *Strategische Kundenanalyse in mittelgroßen Familienunternehmen: eine Analyse in der Automobilzulieferindustrie*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Hrdliczka, V. u. a. (1997). "Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik". In: *ASIM Mitteilungen* 58.

- Hüttenrauch, M. und M. Baum (2008a). "Die Lösung des Konfliktes: Modularisierung". In: *Effiziente Vielfalt: Die dritte Revolution in der Automobilindustrie*. Hrsg. von M. Hüttenrauch und M. Baum. Springer, S. 127–169.
- Hüttenrauch, M. und M. Baum (2008b). *Effiziente Vielfalt: die dritte Revolution in der Automobilindustrie*. Springer-Verlag.
- Hwang, B.-G. u. a. (2009). "Measuring the impact of rework on construction cost performance". In: *Journal of Construction Engineering and Management* 135.3, S. 187–198.
- IFOY (2016). *IFOY AWARD 2016*. online. URL: <http://www.ifoyn.org/en/ifoyn-2016-en/winners-2016> (besucht am 19.09.2016).
- Ihme, J. (2006). *Logistik im Automobilbau: Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau*. Hanser Verlag.
- Jörgl, T. (2017). "Die Bayerischen Intralogistik-Werke". In: *Logistik heute* 1-2, S. 28–33.
- Jünemann, R. (1989). *Materialfluß und Logistik*. Springer Berlin.
- Kadachi, M. (2004). "Kriterien für eine simulationskonforme Abbildung von Materialflusssystemen". Diss. Technische Universität München.
- Kampker, A. (2014). *Elektromobilproduktion*. Berlin: Springer Vieweg.
- Kara, S. und B. Kayis (2004). "Manufacturing flexibility and variability: an overview". In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 15.6, S. 466–478.
- Kildridge, M. und L. Wester (1963). "The assembly line model mix sequencing problem". In: *Proceedings of the 3rd Industrial Conference on Operations Research, Oslo*.
- Kirstein, S. (2009). "Unternehmensreputation: Corporate Social Responsibility als strategische Option für deutsche Automobilhersteller?" Diss. Wiesbaden: Universität Hohenheim.
- Klaus, P. und W. Krieger (2012). *Gabler lexikon logistik: management logistischer netzwerke und flüsse*. Springer-Verlag.
- Kleinhenz, G., S. Hebllich und R. Gold (2006). *Das BMW-Werk Regensburg: wirtschaftliche und soziale Vernetzung in der Region*. Wiss.-Verlag Rothe.
- Klippel, B. (1993). *Raumsysteme der europäischen Automobilindustrie: Bestimmungsfaktoren und Entwicklung der räumlichen Strukturen der europäischen Pkw-Produktion*. München: Huss.
- Klug, F. (2006). "Synchronised automotive logistics: an optimal mix of pull and push principles in automotive supply networks". In: *Logistics Research Network Conference Proceedings, Newcastle*, S. 187–191.
- Klug, F. (2008). "Gestaltungsprinzipien einer schlanken Logistik". In: *ZfAW–Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft* 11.4.
- Klug, F. (2010). *Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. Springer-Verlag.

- Klug, F. (2011). "Aktuelle Trends in der Automobillogistik". In: *Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette der Automobilwirtschaft (ZfAW)* 3, S. 60–68.
- Klug, F. (2014). "Produktivitätssteigerung durch synchronisierte Logistikprozesse". In: *Industrie Management* 30.
- Knauer, M. (2009). "Bilevel-Optimalsteuerung mittels hybrider Lösungsmethoden am Beispiel eines deckengeführten Regalbediengerätes in einem Hochregallager". Diss. Universität Bremen.
- Koch, A., V. Rueckel u. a. (2003). "Potential von Prozessinformationen für frühe Phasen im Produktentstehungsprozess". In: *DFX 2003: Proceedings of the 14th Symposium on Design for X, Neukirchen/Erlangen, Germany, 13.-14.10. 2003*.
- Koch, H. und E. Gericke (1986). "Produktplanung und Produktionsforschung für die Montage von Automobilen". In: *Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung* 81.4, S. 180–184.
- Koether, R. (2012). *Distributionslogistik: effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Köhler, R. (1997). "Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinserienprodukten". Diss. Technische Universität München.
- Košturiak, J. und M. Gregor (1995). *Simulation von Produktionssystemen*. Wien [u.a.]: Springer.
- Köth, C. (2010). "Das neue Premium". In: *Automobil Industrie* 55, S. 22–25.
- Krause, F. (2007). "Stetigförderer". In: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. Grote und J. Feldhusen. Berlin, Heidelberg: Springer, U54–U80.
- Krcal, H.-C. u. a. (2008). "Strategische Implikationen einer geringen Fertigungstiefe für die Automobilindustrie". In: *ZFBF: Schmalenbachs Zeitschrift für Betriebswirtschaftliche Forschung* 60, S. 778.
- Krog, E.-H. und K. Statkevich (2008). "Kundenorientierung und Integrationsfunktion der Logistik in der Supply Chain der Automobilindustrie". In: *Das Beste der Logistik*. Springer, S. 185–195.
- Küber, C. u. a. (2016). "Method for a Cross-architecture Assembly Line Planning in the Automotive Industry with Focus on Modularized, Order Flexible, Economical and Adaptable Assembly Processes". In: *Procedia CIRP* 57, S. 339–344.
- Kuhn, A., Hrsg. (1993). *Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik*. Fortschritte in der Simulationstechnik ; 7. Braunschweig: Vieweg.
- Kuhn, A., Hrsg. (2002). *Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten: Ergebnisbericht der Untersuchung fast ramp-up*. Dortmund: Verl. Praxiswissen.
- Kuhn, A. und B. Hellingrath (2002). *Supply Chain Management: optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette*. Berlin: Springer.

- Kuhn, A. u. a. (2011a). "Modellgestütztes Planen und kollaboratives Experimentieren für robuste Distributionssysteme". In: Hrsg. von D. Spath. GITO mbH Verlag, S. 177–198.
- Kuhn, E., V. Lange und P. Zimmermann (2011b). *Paletten-Management: Leitfaden für die Praxis*. München: Vogel.
- Lackner, E. und H. Zsifkovits (2006). "Die Rolle von Behältern in der Supply Chain". In: *Chargenverfolgung: Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungsgebiete*. Hrsg. von C. Engelhardt-Nowitzki. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.
- Lai, K.-h. (2009). *Just-in-time logistics*. Hrsg. von T. C. E. Cheng. Farnham: Gower.
- Landau, K., Hrsg. (2004). *Montageprozesse gestalten: Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation*. Stuttgart: Ergonomia-Verl.
- Larsson, A. (2002). "The development and regional significance of the automotive industry: supplier parks in Western Europe". In: *International Journal of Urban and Regional Research* 26.4, S. 767–784.
- Law, A. M. und D. Kelton (1991). *Simulation modeling and analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Lawrenz, O. (2001). *Supply Chain Management: Konzepte, Erfahrungsberichte und Strategien auf dem Weg zu digitalen Wertschöpfungsnetzen*. Braunschweig: Vieweg.
- Lehmann, S. (2002). "Globale Produktions- und Logistikkonzepte für die Automobilindustrie: Entwicklung und Analyse unter Berücksichtigung von ökonomischen, technologischen und kulturellen Aspekten". Diss. Universität Paderborn.
- Li, J. (2004). "Throughput analysis in automotive paint shops: a case study". In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 1.1, S. 90–98.
- Liebl, F. (1995). *Simulation: problemorientierte Einführung*. München: Oldenbourg.
- Linn, R. (2017). *Förderketten und Kettenräder: Grundlagen, Weiterentwicklung und Anwendungsbeispiele*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Lochmahr, A., Hrsg. (2016). *Praxishandbuch Grüne Automobillogistik*. Wiesbaden: Springer.
- Lödning, H. (2001). "Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung". Diss. Universität Hannover.
- Lödning, H. (2008). *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. VDI. Berlin: Springer.
- Löffler, C. (2011). "Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung". Diss. Universität Stuttgart.
- Lorenzer, T. (2011). "Wandelbarkeit in der Serienfertigung durch rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen". Diss. Zürich, Eidgen. Techn. Hochschule.
- Lotter, B. und H.-P. Wiendahl (2006). *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Hrsg. von B. Lotter und H.-P. Wiendahl. Springer-Verlag.

- MacDuffie, J. P., K. Sethuraman und M. Fisher (1996). "Product Variety and Manufacturing Performance: Evidence from the International Automotive Assembly Plant Study". In: *Management Science* 42.3, S. 350–369.
- Mangram, M. E. (2012). "The globalization of Tesla Motors: a strategic marketing plan analysis". In: *Journal of Strategic Marketing* 20.4, S. 289–312.
- Martin, H. (2011). *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. Wiesbaden.
- Martin, H. (2014). *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- materialfluss.de (2016). *META und Safelog: Zukunftsfähige Kombi*. online. URL: <http://www.materialfluss.de/forder-und-hebetechnik/regalbediengerate/zukunftsfahige-kombi/> (besucht am 10.05.2016).
- Mathar, H.-J. und J. Scheuring (2012). *Unternehmenslogistik*. Compendio Bildungsmedien AG.
- Mattern, F. und H. Mehl (1989). "Diskrete Simulation - Prinzipien und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung". In: *Informatik Spektrum* 12.4, S. 198–210.
- Meißner, S. (2009). "Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung". Diss. Technische Universität München.
- Meyr, H. (2004). "Supply chain planning in the German automotive industry". In: *OR Spectrum* 26.4, S. 447–470.
- Middendorf, P. u. a. (2016). "ARENA2036 - DigitPro: Development of a virtual process chain". In: *16. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik*. Hrsg. von M. Bargende, H.-C. Reuss und J. Wiedemann. Wiesbaden: Springer, S. 505–516.
- Monden, Y. (2012). *Toyota production system: an integrated approach to just-in-time*. Boca Raton: CRC Press.
- Mosquet, X. u. a. (2011). "Powering autos to 2020: the era of the electric car". In: *Boston Consulting Group*.
- Mößmer, H., M. Schedlbauer und W. Günthner (2007). "Die automobile Welt im Umbruch". In: *Neue Wege in der Automobillogistik*. Hrsg. von W. Günthner. Springer, S. 3–15.
- Motzer, D. (2015). *Strukturalternative für die Aggregateaufrüstung einer automobilen Fertigung: Konzeption und Evaluation eines Montagesystems*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Müller, E. (2014). "Planen und Entscheiden". In: *Qualitätsmanagement für Unternehmer und Führungskräfte*. Springer, S. 5–19.
- Noche, B. (2006). *Simulationsinstrumente in Produktion und Logistik - eine Marktübersicht*. Forum Digitale Logistik LogiMAT 2006. Stuttgart.
- Nof, S. Y. u. a. (2006). "From plant and logistics control to multi-enterprise collaboration". In: *Annual Reviews in Control* 30.1, S. 55–68.

- Nyhuis, P., Hrsg. (2008). *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Berlin: Springer.
- Nyhuis, P., T. Heinen und M. Brieke (2007). "Adequate and economic factory transformability and the effects on logistical performance". In: *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19.3, S. 286–307.
- Nyhuis, P., G. Reinhart und E. Abele (2008). "Wandlungsfähige Produktionssysteme: Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen". In: *Werkstattstechnik online* 98.1-2.
- Nyhuis, P., H.-P. Wiendahl und C. Wagner (2012). "Materialbereitstellung in der Montage". In: *Montage in der industriellen Produktion*. Hrsg. von B. Lotter und H.-P. Wiendahl. Springer, S. 285–313.
- Oertli-Cajacob, P. (1977). *Praktische Wirtschaftskybernetik*. München: Hanser.
- Ohlendorf, M. (2006). "Simulationsgestützte Planung und Bewertung von Demontagesystemen". Diss. Technische Universität Braunschweig.
- Ohno, T. (2009). *Das Toyota-Produktionssystem*. Campus Verlag.
- OICA (1998). *Production Statistics*. URL: <http://www.oica.net/category/production-statistics/1998-statistics/> (besucht am 02. 02. 2017).
- OICA (2010). *Production Statistics*. URL: <http://www.oica.net/category/production-statistics/2010-statistics/> (besucht am 02. 02. 2017).
- OICA (2014). *Production Statistics*. URL: <http://www.oica.net/category/production-statistics/2014-statistics/> (besucht am 02. 02. 2017).
- OICA (2016). *Production Statistics*. URL: <http://www.oica.net/category/production-statistics/> (besucht am 02. 02. 2017).
- Ōno, T. (1988). *Toyota production system: beyond large-scale production*. Cambridge, Mass.: Productivity Press.
- Ostertag, R. (2008). "Supply-Chain-Koordination im Auslauf in der Automobilindustrie: Koordinationsmodell auf Basis von Fortschrittszahlen zur dezentralen Planung bei zentraler Informationsbereitstellung". Diss. Universität Augsburg.
- Overmeyer, L. (2011). "Weitere Unstetigförderer". In: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. Grote und J. Feldhusen. Berlin, Heidelberg: Springer, U51–U51.
- Parry, G., Hrsg. (2008). *Build to order: the road to the 5-day car*. London: Springer.
- Pawellek, G. (2007). *Produktionslogistik: Planung, Steuerung, Controlling*. München: Hanser.
- Pfeiffer, S. (2008). "Flexible Standardisierung und ganzheitliche Produktionssysteme - erfahrungsförderlich". In: *Montage braucht Erfahrung: Erfahrungsbasierte Wissensarbeit in der Montage*. Hrsg. von W. Adami, C. Lang und S. Pfeiffer. Rainer Hampp Verlag, S. 143–167.
- Pfohl, H.-C. (2004). *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. Springer-Verlag.

- Pfohl, H.-C. (2010). *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. Springer-Verlag.
- Pfrang, W. (1990). "Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze". Diss. Berlin: Technische Universität München.
- Pleschak, F. (1988). *Flexible Automatisierung: wirtschaftliche Gestaltung und Einsatzvorbereitung*. Zürich: Verl. Industrielle Organisation.
- Plowman, E. (1964). *Lectures on elements of business logistics, Graduate School of Business*.
- Pohl, S. (2006). "Ein auf unscharfer Wertbaumanalyse basierendes Konzept zur Unterstützung der Verifikation, Validierung und Akkreditierung von Modellen und Simulationen". Diss. Universität der Bundeswehr München.
- Porsche AG (2016). *Die Montage*. online. URL: <https://www.porsche-leipzig.com/produktion/montage/> (besucht am 05.08.2016).
- Proff, H. und H. Proff (2013). "Zunehmende Kompetenzverzerrung im Wettbewerb zwischen Herstellern und Zulieferern — Vorsprung durch Kompetenzentwicklung im vertikalen Wettbewerb". In: *Dynamisches Automobilmanagement: Strategien für international tätige Automobilunternehmen im Übergang in die Elektromobilität*. Hrsg. von H. Proff und H. Proff. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 265–294.
- Pröpster, M. (2016). *Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus*. München: Herbert Utz Verlag.
- Rabe, M., S. Spieckermann und S. Wenzel (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Springer Science & Business Media.
- Rahman, N. A. A., S. M. Sharif und M. M. Esa (2013). "Lean manufacturing case study with Kanban system implementation". In: *Procedia Economics and Finance* 7, S. 174–180.
- Regensburg, B. (2016). *Unser Jubiläum*. URL: <http://www.bmwgroup-werke.com/de/regensburg.html> (besucht am 26.07.2016).
- Rémond-Tiedrez, I. (2009). "Recession in the EU-27: output measures". In: *Eurostat: Statistics in focus* 17.
- Rennemann, T. (2007). "Logistische Lieferantenauswahl in globalen Produktionsnetzwerken : Rahmenbedingungen, Aufbau und Praxisanwendung eines kennzahlenbasierten Entscheidungsmodells am Beispiel der Automobilindustrie". Diss. Wiesbaden: Katholische Universität Eichstätt.
- Richter, M. (2006). "Gestaltung der Montageorganisation". In: *Montage in der industriellen Produktion*. Hrsg. von B. Lotter und H.-P. Wiendahl. Springer, S. 95–125.
- Rinza, T. und J. Boppert (2007). "Logistik im Zeichen zunehmender Entropie". In: *Neue Wege in der Automobillogistik*. Hrsg. von W. Günthner. Springer, S. 17–28.

- Röder, A. und B. Tibken (2006). "A methodology for modeling inter-company supply chains and for evaluating a method of integrated product and process documentation". In: *European Journal of Operational Research* 169.3, S. 1010–1029.
- Röhrig, M. (2002). "Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionsendstufen". Diss. Düsseldorf: Universität Hannover.
- Roos, H. J. und S. Coskun (2011). *Standardisierte RFID Systeme in der Automobilindustrie: Abschlussbericht, Mai 2002*. Berlin: epubli.
- Roscher, J. (2008). "Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie". Diss. Universität Stuttgart.
- Rosenthal, A. (2016). "Ganzheitliche Bewertung modularer Ladungsträgerkonzepte". Diss. Wiesbaden: Otto von Guericke Universität Magdeburg.
- Rothlauf, J. (2010). *Total Quality Management in Theorie und Praxis: zum ganzheitlichen Unternehmensverständnis*. München: Oldenbourg.
- Sanz, F. J. G., K. Semmler und J. Walther (2007). *Die Automobilindustrie auf dem Weg zur globalen Netzwerkkompetenz*. Springer.
- Sauerbier, T. (1999). *Theorie und Praxis von Simulationssystemen: eine Einführung für Ingenieure und Informatiker; mit Programmbeispielen und Projekten aus der Technik*. Studium Technik. Braunschweig: Vieweg.
- Saurwein, R. G. (1996). "Gruppenorientierte Fertigungsstrukturen im Maschinenbau". Diss. Opladen: Universität Bochum.
- Schaack, L. (1973). *VW-Werk Wolfsburg, Presse- und Informationsamt der Bundesregierung - Bildbestand*.
- Schedlbauer, M. J. (2008). "Adaptive Logistikplanung auf Basis eines standardisierten, prozessorientierten Bausteinkonzepts". Diss. Universität München.
- Scheel, B. und A. Chilian (2007). "Schlanke Logistik- und Produktionsmethoden". In: *Die Automobilindustrie auf dem Weg zur globalen Netzwerkkompetenz: Effiziente und flexible Supply Chains erfolgreich gestalten*. Hrsg. von F. J. Garcia Sanz, K. Semmler und J. Walther. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 299–321.
- Schenk, M. und S. Wirth (2004). *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*. Berlin: Springer.
- Schlott, S. (2005). "Wahnsinn mit Methode". In: *Automobil Produktion* 1, S. 38–42.
- Schneeweiß, C. (1992). *Planung*. Bd. 2: Konzepte der Prozess- und Modellgestaltung. Berlin: Springer.
- Scholl, A. (2008). "Grundlagen der modellgestützten Planung". In: *Handbuch Logistik*. Hrsg. von D. Arnold u. a. Springer.
- Scholl, A. (1999). "Balancing and sequencing of assembly lines". Diss. Techn Hochschule Darmstadt.

- Scholtissek, S. (2004). "Die dritte Revolution der Wertschöpfung". In: *Handelsblatt*.
- Scholz-Reiter, B. und S. Sowade (2011). "Wandlungsfähigkeit durch selbststeuernde Produktionssysteme". In: *Industrie Management* 27.
- Schomburg, E. (1980). "Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau". Diss. Technische Hochschule Aachen.
- Schraft, R. u. a. (1999). "Planung von Produktionssystemen". In: Eversheim, Walter und Schuh, Günther, S. 10-36–10-72.
- Schuh, G., Hrsg. (2008). *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen: ein Leitfaden für die Praxis*. VDI. Berlin: Springer.
- Schulte, C. (2013). *Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain*. München: Vahlen.
- Schulte, G. (1996). *Material- und Logistikmanagement*. München: Oldenbourg.
- Schulze, L. und U. Weber (1987). "Die Einbindung konventioneller Flurförderzeuge in ein CIM-Konzept". In: *Der Betriebsleiter* 4, S. 12–18.
- Seidel, K. und A. Gerber (2011). *Nachhaltige Verpackung von Bio-Lebensmitteln: Ein Leitfaden für Unternehmen*. Berlin. Bund Ökologischer Lebensmittelwirtschaft e.V.
- Seidl, K. und R. Baron (2015). "Porsche AG–Projekt Warenausgang Achsen im Werk Zuffenhausen". In: *Projektmanagement in der Logistik*. Springer, S. 181–201.
- Severin, D. u. a. (2007). "Grundlagen". In: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. Grote und J. Feldhusen. Berlin, Heidelberg: Springer, U2–U31.
- Shannon, R. E. (1975). *Systems simulation: the art and science*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Sillekens, T., A. Koberstein und L. Suhl (2011). "Aggregate production planning in the automotive industry with special consideration of workforce flexibility". In: *International Journal of Production Research* 49.17, S. 5055–5078.
- Sinn, H.-W. (2005). *Basar-Ökonomie Deutschland: Exportweltmeister oder Schlusslicht?* München: IFO, Institut für Wirtschaftsforschung.
- Söllner, A. (2008). *Einführung in das Internationale Management: eine institutionenökonomische Perspektive*. Wiesbaden: Gabler.
- Sommer, T. (2015). "Entwicklung und Bewertung von Lagerstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz in automatischen Hochregallagern unter Beachtung des Umschlags". Diss. Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Sorge, N.-V. (2016). *Diese Länder planen Verbot für Diesel und Benziner*. online. URL: <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/abgasskandal-mehrere-laender-planen-verbrenner-verbot-a-1087099.html> (besucht am 05. 11. 2016).
- Spath, D. (2008). *Organisatorische Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen: Unternehmense Erfahrungen, Forschungs-und Transferbedarfe*. Fraunhofer-IRB-Verlag.

- Squire, B. u. a. (2004). "Mass customization: the key to customer value?" In: *Production Planning & Control* 15.4, S. 459–471.
- SSI-Schäfer (2017a). *Regale zur Materialbereitstellung*. URL: <http://www.ssi-schaefer.de/lagertechnik/bereitstellregale.html> (besucht am 10.05.2017).
- SSI-Schäfer (2017b). *Stahlblechkästen und Stahlblechbehälter*. URL: <http://www.ssi-schaefer.de/lagertechnik/kaesten-und-behaelter/unsere-produkte/stahlblechkaesten-und-behaelter.html> (besucht am 04.05.2017).
- SSI-Schäfer (2014). *Explore a world of high efficiency*. URL: http://www.ssi-schaefer.de/news-infocenter/aktuelles/single/article/explore_a_world_of_high_efficiency (besucht am 10.05.2017).
- SSI-Schäfer (2016). *KLT Behälter*. URL: <http://www.ssi-schaefer.de/klt-behaelter.html> (besucht am 09.04.2017).
- Staab, T. u. a. (2016). "Efficiency in in-plant milk-run systems - The influence of routing strategies on system utilization and process stability". In: *Journal of Simulation* 10.2, S. 137–143.
- Staeblein, T. und K. Aoki (2015). "Planning and scheduling in the automotive industry: A comparison of industrial practice at German and Japanese makers". In: *International Journal of Production Economics* 162, S. 258–272.
- Statista (2016a). *Umsätze der wichtigsten Industriebranchen in Deutschland in den Jahren 2013 und 2014*. URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/241480/umfrage/umsaetze-der-wichtigsten-industriebranchen-in-deutschland/> (besucht am 09.12.2012).
- Statista (2016b). *Umsätze der wichtigsten Industriebranchen in Deutschland in den Jahren 2013 und 2014*. URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/3777/umfrage/umsatz-im-deutschen-maschinenbau-seit-1991/> (besucht am 09.12.2016).
- Stegmüller, D. (2014). "Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft". In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer, S. 103–119.
- Steven, M. (2015). *Produktionslogistik*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Stowasser, J. M. u. a. (1980). *Der kleine Stowasser: lateinisch - deutsches Schulwörterbuch*. G. Freytag.
- Straube, F. und H.-C. Pfohl (2008). *Trends und Strategien in der Logistik: globale Netzwerke im Wandel; Umwelt, Sicherheit, Internationalisierung, Menschen*. Hamburg: DVV Media Group, Dt. Verkehrs-Verl.
- Suhl, L. und T. Mellouli (2013). *Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. Berlin: Springer Gabler.
- Sunarjo, M. F. und I. Meinhardt (2007). "Dimensionierung von Entkopplungspuffern in dynamischen Fertigungsprozessen mittels Warteschlangen". In: *Logistics Journal*.

- Taylor, F. W. (1911). *The principles of scientific management*. Harper.
- ten Hompel, M. (2011). *Taschenlexikon Logistik: Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. Hrsg. von V. Heidenblut und M. ten Hompel. Berlin, Heidelberg: Springer.
- ten Hompel, M. und T. Schmidt (2005). *Warehouse management: Automatisierung und Organisation von Lager- und Kommissioniersystemen*. Berlin: Springer.
- ten Hompel, M. und T. Schmidt (2013). *Warehouse Management: Automatisierung und Organisation von Lager- und Kommissioniersystemen*. Springer-Verlag.
- ten Hompel, M., T. Schmidt und L. Nagel (2007). *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik*. Berlin: Springer.
- Tiedtke, J. (2007). *Allgemeine BWL*. Wiesbaden: Gabler.
- Töpfer, A., Hrsg. (2007). *Six Sigma: Konzeption und Erfolgsbeispiele für praktizierte Null-Fehler-Qualität*. Berlin: Springer.
- Ullrich, G. (2014). *Fahrerlose Transportsysteme: eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Unruh, V. (2014). "Abschied von der Linie". In: *Hebezeuge Fördermittel, Jg 54.11-12*, S. 666–668.
- Urban, G. und M. Stirzel (2006). "Bewertung von Netzwerkszenarien für eine Globale Logistik – Eine betriebswirtschaftliche Herausforderung für das weltweite Automobilgeschäft". In: *Die Supply Chain von morgen – Lieferfähigkeit im globalen Unternehmen*. Hrsg. von W. Dangelmaier. Bd. 2006. Paderborn, S. 1–12.
- Vahrenkamp, R. und H. Kotzab (2012). *Logistik: Management und Strategien*. München: Oldenbourg.
- Vahrenkamp, R. und C. Siepermann (2004). *Produktionsmanagement*. München: Oldenbourg.
- Vahs, D. und R. Burmester (2005). *Innovationsmanagement: von der Produktidee zur erfolgreichen Vermarktung*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- VDA (2008). *Jahresbericht 2008*. Hrsg. von V. der Automobilindustrie (VDA). Berlin. URL: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/jahresbericht-2008.html> (besucht am 20. 11. 2016).
- VDA (2010). *Jahresbericht 2010*. Hrsg. von V. der Automobilindustrie (VDA). Berlin. URL: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/jahresbericht-2010.html> (besucht am 20. 11. 2016).
- VDA (2016). *Jahresbericht 2016*. Hrsg. von V. der Automobilindustrie (VDA). Berlin. URL: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/jahresbericht-2016.html> (besucht am 20. 01. 2017).

- VDA 4500 (2006). *Kleinladungsträger (KLT)-System*. Hrsg. von V. der Automobilindustrie (VDA). VDA.
- VDA 4525 (2009). *Standardisierte Einwegverpackung für Seecontainer-Anwendungen*. Hrsg. von V. der Automobilindustrie (VDA). VDA.
- VDA-Empfehlung 5010 (2008). *Standardbelieferungsformen in der Automobilindustrie*. Hrsg. von V. der Automobilindustrie (VDA).
- VDI 2411 (1970). *VDI-Richtlinie: VDI 2411 Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen*. Standard. Verein Deutscher Ingenieure (VDI).
- VDI 2510 (2005). *Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI 3300 (1973). *Materialfluß-Untersuchungen*. Standard. Verein Deutscher Ingenieure (VDI).
- VDI 3590 (1993). *VDI-Richtlinie: 3590 Blatt 1 Kommissioniersysteme - Grundlagen*.
- VDI 3630 (2006). *Automatische Kleinteilelager (AKL)*. Standard. Verein Deutscher Ingenieure (VDI).
- VDI 3633 (2013). *VDI-Richtlinie: VDI 3633. Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen–Begriffsdefinitionen*.
- VDI 3633-1 (2000). *VDI-Richtlinie: VDI 3633-1. Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Grundlagen*.
- VDI 3633-3 (1997). *VDI-Richtlinie: VDI 3633-3. Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Experimentplanung und -auswertung*.
- VDI 3643 (1998). *VDI-Richtlinie: VDI 3643 Elektro-Hängebahn - Obenläufer*.
- VDI 5200 (2009). *VDI-Richtlinie: 5200 Fabrikplanung*.
- VDMA (2004). *Forum Intralogistik*.
- Vogel-Heuser, B., T. Bauernhansl und M. ten Hompel, Hrsg. (2017). *Handbuch Industrie 4.0*. Berlin: Springer Vieweg.
- Volling, T. (2009). "Auftragsbezogene Planung bei variantenreicher Serienproduktion: eine Untersuchung mit Fallstudien aus der Automobilindustrie". Diss. Technische Universität Braunschweig.
- Vorderer, M. u. a. (2016). "CESA 3 R: Highly versatile plug-and-produce assembly system". In: *Automation Science and Engineering (CASE), 2016 IEEE International Conference on*. IEEE, S. 745–750.
- Wagner, B. (2006). *Hub&Spoke-Netzwerke in der Logistik: modellbasierte Lösungsansätze für ihr Design*. Wiesbaden: Deutscher Univ.-Verl.
- Wannenwetsch, H., Hrsg. (2008). *Intensivtraining Produktion, Einkauf, Logistik und Dienstleistung: mit Aufgaben und Lösungen*. Lehrbuch. Wiesbaden: Gabler.
- Warnecke, H.-J., H.-G. Löhrl und W. Kiener (1975). "Montagetechnik". In: *Mainz: Krausskopf*.
- Warnecke, H.-J. (1999). "Die vollintegrierte Fabrik". In: *Logistik heute* 8, S. 41.

- Wehking, K.-H. und J. Popp (2015a). "Automobilproduktionslogistik - heute, morgen und übermorgen -". In: 32. *Deutscher Logistik-Kongress*. Hrsg. von BVL, S. 324–345.
- Wehking, K.-H. und J. Popp (2015b). "Changes in production logistics for automobile manufacturing". In: 15. *Internationales Stuttgarter Symposium*. Springer, S. 1193–1200.
- Wehking, K.-H., M. Weber und M. Schröppel (2012a). "Monofunktionale autonome Transporteinheiten (1/2)-KaTe-einfach, aber effizient". In: *Hebezeuge Fördermittel* 52, S. 1–2.
- Wehking, K.-H. u. a. (2012b). "Monofunktionale autonome Transporteinheiten (2/2)-Doppelkufensystem schafft bis zu 1000 kg". In: *Hebezeuge Fördermittel* 52, S. 80–82.
- Wehking, K.-H. (2011). "Aufzüge und Schachtförderanlagen". In: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. Grote und J. Feldhusen. Berlin, Heidelberg: Springer, U51–U55.
- Weiss, G. und R. Jakob (2005). *Agentenorientierte Softwareentwicklung: Methoden und Tools*. Berlin: Springer.
- Wenzel, S., Hrsg. (2000). *Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik*. Frontiers in simulation ; 5. Delft: Society for Computer Simulation International.
- Westkämper, E. (2001). "Modulare Produkte - Modulare Montage". In: *wt Werkstattstechnik* 91.8, S. 479–482.
- Westkämper, E. u. a. (2000). "Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen." In: *Werkstattstechnik online* 90.1-2.
- Weyer, M. (2002). "Das Produktionssteuerungskonzept Perlenkette und dessen Kennzahlensystem". Diss. Universität Karlsruhe.
- Wiendahl, H.-P. (2002). "Wandlungsfähigkeit - Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik". In: *wt Werkstattstechnik online* 92.4, S. 122–127.
- Wiendahl, H.-P. (2005). "Some remarks on changeability, reconfigurability and flexibility of manufacturing systems. Paradigms of Manufacturing - A Panel Discussion". In: *3rd Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, Michigan, USA*.
- Wiendahl, H.-P. und C. L. Heger (2003). "Justifying Changeability, CIRP 2 International Conference on Reconfigurable Manufacturing". In: *Ann Arbor, MI, USA*.
- Wiendahl, H.-P. und C. Heger (2004). "Justifying changeability: a methodical approach to achieving cost effectiveness". In: *The International Journal For Manufacturing Science & Production* 6.1, S. 2.
- Wiendahl, H.-P. und B. Klepsch (2006). "Komplementäre Produkt- und Fabrikmodularisierung als Ansatz zur Komplexitätsbewältigung". In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 101.6, S. 367–373.
- Wiendahl, H.-P. u. a. (2007). "Changeable manufacturing-classification, design and operation". In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 56.2, S. 783–809.

- Wildemann, H. (2001). *Das Just-in-time-Konzept: Produktion und Zulieferung auf Abruf*. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag.
- Wilke, M. (2006). "Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen". Diss. Universität München.
- Wittek, K. (2013). *Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie*. Springer-Verlag.
- Womack, J., D. Jones und D. Roos (1990). *The machine that changed the world*. Simon und Schuster.
- Wullenkord, A., A. Kiefer und M. Sure (2005). *Business Process Outsourcing: ein Leitfa- den zur Kostensenkung und Effizienzsteigerung im Rechnungs- und Personalwesen*. München: Vahlen.
- Wurch, R. (1982). "Beitrag zur systematischen Materialflussplanung für Kommissioniersysteme". Diss. Technische Universität Berlin.
- Zäpfel, G. (1989). *Taktisches Produktionsmanagement; Berlin/New York*. Walter de Gruyter & Co, Berlin.
- Zauner, M. und A. Schrempf (2008). *Informatik in der Medizintechnik: Grundlagen, Software, computergestützte Systeme*. Wien: Springer.
- Zeile, U. (1995). "Montagestrukturplanung für variantenreiche Serienprodukte". Diss. Universität Stuttgart.