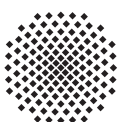


MICHAEL EISELE

---

Ein Verfahren zur Planung von  
verschwendungsarmen getakteten  
Fließmontagen



**STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 83**

**Herausgeber:**

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

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

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

Michael Eisele

**Ein Verfahren zur Planung von  
verschwendungsarmen getakteten  
Fließmontagen**

**FRAUNHOFER VERLAG**

**Kontaktadresse:**

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

**STUTTARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG****Herausgeber:**

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

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

Titelbild:© ibreakstock - stock.adobe.com

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-1376-4

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2018

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

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2018

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

Alle Rechte vorbehalten

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

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

## GELEITWORT DER HERAUSGEBER

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

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

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

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

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

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

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper





# **Ein Verfahren zur Planung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen**

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

Vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Michael Eisele  
aus Geislingen/Steige

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

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath

Tag der mündlichen Prüfung: 29.01.2018

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart  
2018



## **Vorwort des Autors**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter, Projektleiter und Gruppenleiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper, bis 2011 Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA sowie des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF der Universität Stuttgart, für seine Begleitung und wohlwollende Unterstützung der Arbeit sowie für die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswissenschaft und Organisation IAO und des Instituts für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart, danke ich für die Übernahme des Mitberichts.

Danken möchte ich all meinen ehemaligen Kollegen am Fraunhofer IPA für die wertvollen fachlichen Gespräche, im Besonderen danke ich Dr. Jörg Mandel für die vielen inhaltlichen Anregungen und Korrekturen, die entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Meinen Eltern danke ich für die Ermöglichung meiner Ausbildung und die fachliche sowie moralische Unterstützung nicht nur bei der Erstellung dieser Arbeit. Mein größter Dank gilt meiner Frau für ihre Unterstützung und ihre Geduld. Sie hat mir die Motivation und Energie gegeben, dieses Ziel zu verwirklichen. Ihr und meinen Eltern widme ich diese Arbeit.

Stuttgart, im Februar 2018

Michael Eisele

## **Kurzfassung**

Verschiedene Megatrends wie die Globalisierung oder der Wandel vom Anbieter- zum Käufermarkt erzeugen bei Unternehmen extreme Wettbewerbssituationen. Im Bestreben nach maximaler Wirtschaftlichkeit und Effizienz rückt im Besonderen die Montage in den Mittelpunkt der Betrachtungen, da sie einen vergleichsweise hohen Wertschöpfungsanteil durch personal- bzw. investitionsintensive Prozesse aufweist. Das historisch bewährte und heute global etablierte Toyota-Produktionssystem bietet Lösungen zur Kostenreduzierung durch das Erkennen und Beseitigen von Verschwendung. Dessen Ansätze und Methoden sind auf die kontinuierliche Verbesserung real existierender Produktionen ausgerichtet.

Für die vorserielle Planung sind kaum Ansätze zur Reduzierung von Verschwendung und zur Konzentration auf Wertschöpfung vorhanden, weder in den heute existierenden Montageplanungsmethoden noch in den am Markt befindlichen EDV-Tools. Dadurch werden die heute vorhandenen Kostensenkungspotenziale besonders bei den mit hoher Stückzahl betriebenen getakteten Fließmontagen nicht erschlossen.

Deshalb wird in dieser Arbeit ein Verfahren zur Planung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen entwickelt. Es beinhaltet erstmalig Kennzahlen zur Quantifizierung und Algorithmen zur Kostenermittlung aller 7 Verschwendungsarten. Auf diese Weise ermöglicht es bereits während der Planung die Lokalisierung und Reduzierung von Verschwendung. Innerhalb der 8 hierfür entwickelten Planungsphasen wird sukzessive ein Modell erzeugt, das vollständig das Montagesystem beschreibt und modellbasiert dessen Montagestückkosten ausweist. Die Verwendung neu geschaffener Diagramme fördert beim Planer die Entscheidungstransparenz und das Auffinden situationsbedingter Maßnahmen zur Reduzierung von Verschwendung.

## **Short summary**

Different megatrends like Globalization as well as the transition from a seller's to a buyer's market generate extreme competitive situations for companies. While striving for maximal profitability and efficiency, especially assembly systems become the focus of attention, since they present a comparatively high share of added value through personnel and investment intense processes. The historically proven and globally established Toyota production system offers solutions to reduce costs by recognizing and avoiding waste. Its basic approaches and techniques aim for continuous improvement of existing manufacturing.

However, there are barely techniques to reduce waste and also to focus on added value during the planning stage before start of production, neither within existing approaches of assembly planning nor within today's software supporting assembly planning. In particular, synchronized assembly lines with a high quantity imply cost-saving potentials, which remain locked nowadays.

Therefore, the present work develops a procedure for the planning of low waste synchronized moving assemblies. For the first time, it contains key figures for quantification and algorithms to calculate costs of all 7 types of waste. In this way, the procedure enables the localization and reduction of waste already during planning. Within the developed 8 phases of planning, a model is gradually generated, which fully describes the assembly system and which calculates its model-based assembly costs per unit. The use of newly created diagrams provides transparency while making decisions and supports the finding of situational measures to reduce waste.





---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>11</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>14</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>17</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>18</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>23</b>
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung .....	23
1.2 Zielsetzung .....	29
1.3 Forschungsfragen und Vorgehensweise .....	30
<b>2 Grundlagen und Festlegung des Untersuchungsbereichs</b> .....	<b>35</b>
2.1 Das Montagesystem als Teil der Fabrik.....	35
2.2 Verschwendung in getakteten Fließmontagen .....	40
2.3 Die Ablaufstruktur der klassischen Montageplanung.....	50
2.4 Einordnung des Verfahrens in die Gestaltung und Beschreibung von Planungsprozessen .....	64
<b>3 Anforderungen an das zu gestaltende Planungsverfahren</b> .....	<b>67</b>
3.1 Anforderungen aus Sicht der relevanten Planungsschritte .....	67
3.2 Anforderungen an den Verfahrensablauf und analysierende Konstrukte	71
3.3 Anforderungen an beschreibende Konstrukte zur Modellierung.....	72
3.4 Anforderungen an bewertende Konstrukte zur Sicherstellung der Zielerreichung.....	73
3.5 Anforderungen zur Anwendbarkeit des Verfahrens .....	75
<b>4 Stand der Technik</b> .....	<b>76</b>
4.1 Existierende Verfahren der Montageplanung .....	76
4.2 Existierende EDV-Tools zur Planung von Montagesystemen .....	92
4.3 Fazit .....	95
<b>5 Lösungsansatz zur Planung verschwendungsarmer getakteter     Fließmontagen</b> .....	<b>98</b>
5.1 Analyse der Ziel- und Aufgabenstellung.....	98
5.2 Ableitung der Elemente des Lösungsansatzes .....	99
5.2.1 Entwurf der Basismodelle für das Verfahren .....	100
5.2.2 Entwurf des Verfahrensablaufs.....	102

5.3	Synthese der Elemente zum Gesamtkonzept.....	103
<b>6</b>	<b>Basismodelle zur Gestaltung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen.....</b>	<b>105</b>
6.1	Basismodell zur Bewertung von Verschwendung .....	105
6.1.1	Kennzahlen zur Feststellung von Beständen .....	106
6.1.2	Kennzahlen zur Feststellung von Überproduktion.....	110
6.1.3	Kennzahlen zur Feststellung von Wartezeiten.....	113
6.1.4	Kennzahlen zur Feststellung der Verschwendungsart Bewegung ...	116
6.1.5	Kennzahlen zur Feststellung von transportinduzierter Verschwendung.....	119
6.1.6	Kennzahlen zur Feststellung der Verschwendungsart Bearbeitung.	121
6.1.7	Kennzahlen zur Feststellung von Nacharbeit und Ausschuss.....	125
6.1.8	Kennzahlenbezogene Anforderungen an das Verfahren und an das Montagemodell .....	128
6.2	Basismodell „Produkt“ .....	130
6.3	Basismodell „Montageprozess“ .....	131
6.4	Basismodell „physisches Montagesystem“ .....	133
6.5	Modellierung der Beziehungen zwischen den Basismodellen.....	136
6.5.1	Beziehung Produkt zu Prozess.....	136
6.5.2	Beziehung Prozess zu physischem Montagesystem.....	138
6.6	Modellbasierte Bewertung der Montagestückkosten.....	140
6.7	Modellbasierte Kostenbewertung von Verschwendung.....	145
6.7.1	Kostenermittlung für die Verschwendungsart Bestand .....	146
6.7.2	Kostenermittlung für die Verschwendungsart Überproduktion .....	147
6.7.3	Kostenermittlung für die Verschwendungsart Wartezeiten .....	149
6.7.4	Kostenermittlung für die Verschwendungsart Bewegung .....	150
6.7.5	Kostenermittlung für die transportinduzierte Verschwendung.....	150
6.7.6	Kostenermittlung für die Verschwendungsart Bearbeitung .....	151
6.7.7	Kostenermittlung für Verschwendung durch Nacharbeit und Ausschuss .....	153
6.7.8	Ermittlung der Verschwendungsstückkosten des Montagesystems	154

---

<b>7</b>	<b>Verfahrensablauf zur Gestaltung verschwendungsarmer Fließmontagen</b> .....	<b>155</b>
7.1	Planungsbasis ermitteln .....	157
7.2	Ablauf Fügeprozesse .....	158
7.3	Segmentierung durchführen .....	160
7.4	Automatisierungsgrad bestimmen .....	162
7.5	Linie planen .....	170
7.6	Teilebereitstellung planen .....	181
7.7	Montagelayout planen .....	186
7.8	Planungsszenarien bewerten und auswählen .....	189
<b>8</b>	<b>Validierung und Bewertung der neuen Methodik</b> .....	<b>193</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>211</b>
<b>10</b>	<b>Summary</b> .....	<b>214</b>
<b>11</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>216</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>217</b>
	<b>Anhang A: produktspezifische Fügevorgänge Typ A</b> .....	<b>230</b>
	<b>Anhang B: Auszug produktspezifischer Teilrichtungen Typ A</b> .....	<b>231</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produktivitätspotenziale nach der Studie von Czipin (2013).....	27
Abbildung 2: Ursachenanalyse nach der Studie von Czipin (2013).....	27
Abbildung 3: Verschwendungsarme Montageplanung.....	30
Abbildung 4: Gliederung der Arbeit.....	34
Abbildung 5: Arbeitssystem nach REFA (2002).....	36
Abbildung 6: Systemebenen der Produktion (Westkämper 2006, S.56).....	36
Abbildung 7: Funktionen der Montage (Lotter 2012, S.2).....	37
Abbildung 8: logistische Abgrenzung in Anlehnung an Arnold (2008).....	39
Abbildung 9: Verschwendungsausprägungen in Fließmontagen.....	48
Abbildung 10: Fortsetzung Verschwendungsausprägungen in Fließmontagen.....	49
Abbildung 11: Stufen der Aufgabengliederung (i.A.a. Bullinger 1986).....	56
Abbildung 12: Planungsphasen und -schritte (eigene Darstellung nach Bullinger, Zeile, Holle, Konold et al., Slama, Erlach und Hartel).....	63
Abbildung 13: Alternativenbildung der Planung (Pawellek 2014, S.52).....	66
Abbildung 14: Verschwendungsrelevante Planungsphasen und -schritte.....	70
Abbildung 15: Montageplanung in 7 Phasen nach Bullinger (1986, S.51).....	77
Abbildung 16: Montagestrukturplanung nach Zeile (1995, vgl. S.41).....	79
Abbildung 17: Montagestrukturmodell nach Zeile (1995, S.38).....	80
Abbildung 18: Partielle Distanzen nach Trautsch (2012) auf Basis Zeile (1995).....	81
Abbildung 19: Aufbau- und Ablaufstruktur nach Holle (2002).....	84
Abbildung 20: Planungssystematik nach Konold (2003).....	85
Abbildung 21: Leitfaden zur rechnergestützten Planung nach Slama (2004).....	87
Abbildung 22: Planungssystematik nach Hartel auf Basis von Lotter (2012).....	90
Abbildung 23: Kalkulationsschema Montagestückkosten nach Hartel (2012).....	91
Abbildung 24: Vergleich des Stands der Technik mit den Anforderungen.....	96
Abbildung 25: Gesamtkonzept des Lösungsansatzes und deren Elemente.....	104
Abbildung 26: Vorgehensweise zur Entwicklung des Bewertungsmodells.....	106
Abbildung 27: Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Beständen.....	110

---

Abbildung 28: Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Überproduktion	113
Abbildung 29: Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Wartezeiten .....	116
Abbildung 30: Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Bewegung.....	118
Abbildung 31: Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Transporten.....	121
Abbildung 32: Herleitung der Kennzahlen zur Verschwendungsart Bearbeitung	125
Abbildung 33: Herleitung der Kennzahlen für Nacharbeit und Ausschuss.....	128
Abbildung 34: Kennzahlenbezogene Detailanforderungen.....	129
Abbildung 35: Herleitung und Spezifikation des Basismodells „Produkt“ .....	130
Abbildung 36: Basismodell „Montageprozess“ in Anlehnung an Bullinger .....	133
Abbildung 37: Basismodell physisches Montagesystem .....	134
Abbildung 38: Attribute der Objekte des physischen Montagesystems .....	136
Abbildung 39: Beziehungen zwischen Produkt und Prozess .....	138
Abbildung 40: Beziehungen zwischen Prozess und physischem Montagesystem	139
Abbildung 41: Kennzahlenverfügbarkeit und -verwendung je Planungsphase ...	156
Abbildung 42: Verfahrensschritte der Phase „Planungsbasis ermitteln“ .....	158
Abbildung 43: Verfahrensschritte der Phase „Ablauf Fügeprozesse“ .....	160
Abbildung 44: Verfahrensschritte der Phase „Segmentieren“ .....	162
Abbildung 45: Verfahrensschritte der Phase „Automatisierungsgrad bestimmen“ .....	163
Abbildung 46: Vorranggraph mit integriert automatisierbaren Fügevorgangskategorien.....	164
Abbildung 47: Zeitliches Parallelisieren von Fügevorgängen – Möglichkeit 1.....	165
Abbildung 48: Zeitliches Parallelisieren von Fügevorgängen – Möglichkeit 2.....	166
Abbildung 49: Kostenvergleich zur Bestimmung der Automatisierungsstufe.....	167
Abbildung 50: Ermittlung des ungenutzten Automatisierungspotenzials .....	169
Abbildung 51: Taktzeit-Montagesequenz-Diagramm .....	174
Abbildung 52: TMS-Diagramm mit Zuordnung Teilverrichtung zu Arbeitsplatz..	177
Abbildung 53: TMS-Diagramm nach Zuordnung Teilverrichtung zu Mitarbeiter.	178
Abbildung 54: TMS-Diagramm und Kennzahlen zur Verschwendungsquantifizierung.....	180

Abbildung 55: Verfahrensschritte der Phase „Linie planen“ .....	181
Abbildung 56: Kapazitätsanalyse Bereitstellungsflächen .....	184
Abbildung 57: Verfahrensschritte der Phase „Teilebereitstellung“ .....	185
Abbildung 58: Verfahrensschritte der Phase „Montagelayout“ .....	188
Abbildung 59: Gesamtübersicht der Kennzahlen auf Montagesystemebene .....	190
Abbildung 60: Zentrale Visualisierungselemente des Verfahrens.....	191
Abbildung 61: Basismodell Produkt des Praxisbeispiels .....	195
Abbildung 62: schematischer Vorranggraph Fügevorgänge Typ A.....	196
Abbildung 63: Planungsszenarien nach der Segmentierung in Phase 3.....	197
Abbildung 64: Montagesequenzdiagramm Typ A .....	198
Abbildung 65: Kundentakte je Montageteilsystem .....	200
Abbildung 66: Auszug aus TMS-Diagramm Montageteilsystem Typ A .....	203
Abbildung 67: Ausschnitt aus oberer Hälfte des TMS-Diagramms MTS Typ A....	204
Abbildung 68: TMS-Diagramm von MTS Typ A mit Kennzahlen .....	206
Abbildung 69: Bewerteter Zustand des Montagesystems in Planungsszenario 1	207
Abbildung 70: Bewerteter Zustand des Montagesystems in Planungsszenario 2	208

---

## Abkürzungen

BG	Baugruppe
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
i.A.a.	in Anlehnung an
ID	Identifikator
IT	Informationstechnik
MA	Mitarbeiter
MTM	Methods Time Measurement
MTS	Montageteilsystem
TMS	Taktzeit-Montagesequenz (Diagramm)
TV	Teilverrichtung
WIP	Work in Process
WS	Werkstück
WT	Werkstückträger



## Formelzeichen

I1	WIP Bestandwert, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Bestände
SP	Standardisierter Puffer
AT	Anzahl Takte innerhalb eines Montageteilsystems
TWME	Teilewert des Montageerzeugnisses nach Bearbeitung innerhalb eines Montageteilsystems
TWZE	Teilewert des Zwischenerzeugnisses vor Bearbeitung innerhalb eines Montageteilsystems
MEB	Montageerzeugnis-Bestand
I2	WIP-Reichweite, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Bestände
MT	Montagetakt eines Montageteilsystems
I3	Zwischenerzeugnis-Bestandwert, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Bestände
BW(ZE)	Bestandwert eines Zwischenerzeugnisses, das einen Puffer bzw. ein Lager zwischen Montageteilsystemen abbildet
I4	Zwischenerzeugnis-Reichweite, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Bestände
SB(ZE)	Stückbestand eines Zwischenerzeugnisses, das einen Puffer bzw. ein Lager zwischen Montageteilsystemen abbildet
I5	Montagebestandwert, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Bestände
BW(MTL)	Bestandwert eines Montageteils innerhalb eines Montageteilsystems
I6	Montagebestandsreichweite, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Bestände
SB(MTL)	Stückbestand eines Montageteils, das innerhalb eines Montageteilsystems zum Verbau bereitgestellt wird
Ü1	Überproduktionszeit, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Überproduktion
KT	Kundentakt, spezifisch für ein Montageteilsystem
Ü2	Montagetaktabweichung, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Überproduktion
Ü3	Taktverschwendung, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Überproduktion
TVZ	Teilverrichtungssollzeit, Planzeit für die Dauer der Bearbeitung einer Teilverrichtung
Ü4	Zwischenerzeugnis-Bestandwert, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Überproduktion
Ü5	Zwischenerzeugnis-Reichweite, Kennzahl zur Quantifizierung der Verschwendungsart Überproduktion

W1	Abtaktungsverlust
MAA	Mitarbeiterauslastung
W2	MA-Ausfallquote Störungen
AV	Anlagenverfügbarkeit
M1	Anteil Bewegungsverschwendung MA
NWBZ	nicht wertschöpfende Bearbeitungszeit
TV	Teilverrichtung
VGZ	Verfügbare Gesamtzeit
M2	Anteil Bewegungsverschwendung Materialpick
BZ <sub>MP</sub>	Bearbeitungszeit Materialpicks, Sollzeit des Materialbewegungsanteils von Teilverrichtungen
M3	Anteil Bewegungsverschwendung Laufwege
LW	Laufweg
M4	Anteil Bewegungsverschwendung Werkstück
HWS	Handling Werkstück
T1	Anteil Bewegungsverschwendung MA
T2	Anteil Bewegungsverschwendung Materialpick
T3	Anteil Bewegungsverschwendung Laufwege
T4	Anteil Bewegungsverschwendung Werkstück
T5	Verfügbarer Bereitstellplatz
FA	Flächenangebot, bezieht sich auf einen Arbeitsplatz im Montageteilsystem
BBF	Beanspruchte Bereitstellfläche, bezieht sich auf einen Arbeitsplatz im Montageteilsystem
T6	Transportintensität Materialversorgung
B1	Überdimensionierung Betriebsmittel
MMTZ	maximal mögliche Taktzeit, bezieht sich auf einen Automat im Montageteilsystem
B2	ungenutztes Automatisierungspotenzial
TVAP	(manuelle) Teilverrichtung mit Automatisierungspotenzial
K <sub>P</sub>	Personalkostenstundensatz in €/h
B3	technische Nichtverfügbarkeit
TAZ	technische Ausfallzeit, bezieht sich auf einen Automat
VBZ	verfügbare Belegungszeit, bezieht sich auf einen Automat
B4	Ausrichtungswechsel
WAW	Anzahl wechselnde Ausrichtungen des Werkstücks, bezieht sich auf das Werkstück eines Montageteilsystems
B5	Taktverlust Rüsten
RZ	Rüstzeit, Zeit der Produktionsunterbrechung für Rüstvorgänge
NA1	Ausschussquote
EA	erwarteter Ausschuss in Stück, für einen bestimmten Zeitraum definiert
SZ	Stückzahl, für einen bestimmten Zeitraum definiert
NA2	Nacharbeitsaufwand

ENAZ	Arbeitszeit für entstandene Nacharbeit (geplante Zeit)
NA3	Sonderaufwand Prozessbeherrschung
EZAPB	einzelner Zeitaufwand für eine Prozessbeherrschungstätigkeit
$K_{MH}$	Maschinenstundensatz in €/h
$N_L$	Nettoleistung in Stück/h
$K_A$	kalkulatorischer Abschreibung in €/Jahr
$K_E$	Energiekosten in €/Jahr
$K_R$	Raumkosten in €/Jahr
$K_Z$	kalkulatorischen Zinsen in €/Jahr
$K_I$	Instandhaltungskosten in €/Jahr
$T_N$	Nutzungszeit in h/Jahr
$L_K$	Lohnkosten inklusive Lohnnebenkosten in €/h
$MA_{\text{direkt}}$	Anzahl Mitarbeiter in der Montage
$G_K$	Gehaltskosten inklusive Gehaltsnebenkosten in €/h
$MA_{\text{indirekt}}$	Anzahl Vorarbeiter in der Montage
$K_{WB}$	Wiederbeschaffungswert
n	Nutzungsdauer
EV	Jahres-Energieverbrauchswert eines einzelnen Automaten oder Betriebsmittel in kWh
$P_{\text{Energie}}$	Energiepreis in €/kWh
$FB_{\text{MTS}}$	Flächenbedarf eines Montageteilsystems in m <sup>2</sup> /Jahr
$FVS_{\text{Gebäude}}$	Flächenverrechnungssatz in €/m <sup>2</sup>
p	kalkulatorischer Zinssatz
IVS	Instandhaltungs-Verrechnungssatz
$T_{N \text{ MTS}}$	Nutzungszeit eines Montageteilsystems in h/Jahr, entspricht der theoretisch verfügbaren Anzahl Betriebsstunden im Jahr
x	Stunden pro Schicht, Parameter des Schichtmodells
y	Schichten pro Woche, Parameter des Schichtmodells
z	Arbeitswochen/Jahr, Parameter des Schichtmodells
$NF_{\text{MTS}}$	Nutzungsfaktor des Montageteilsystems
$N_{L \text{ MTS}}$	Nettoleistung eines Montageteilsystems in Stück/h
$K_{\text{ST MTS}}$	Montagestückkosten des Montageteilsystems
$K_{\text{ST MS}}$	Montagestückkosten des gesamten Montagesystems
$K_{\text{ST Tr}}$	Kosten für das Transportieren der Zwischenerzeugnisse in Montagesystemen
$VK_{\text{Best MS}}$	durch Bestand verursachte Verschwendungsstückkosten eines Montagesystems
$K_{\text{KB Best}}$	Bestandskapitalbindungskosten eines Montagesystems
$K_{\text{Fl Best}}$	Flächenkosten für Bestände
$FB_{\text{WIP MTS}}$	Flächenbedarf WIP-Bestand für ein Montageteilsystem
$FB_{\text{MB MTS}}$	Flächenbedarf Montagebestand für ein Montageteilsystem
$FB_{\text{ZE}}$	Flächenbedarf des Bestands für Zwischenerzeugnisse

$VK_{\text{Überpr. MS}}$	durch Überproduktion verursachte Verschwendungsstückkosten eines Montagesystems
$Per_{\text{Prod}}$	Produktionsperiodendauer
$K_{\text{KB Überpr.}}$	durch Überproduktion verursachte Kapitalbindungskosten
$K_{\text{Fl Überpr.}}$	durch Überproduktion verursachte Flächenkosten
$K_{\text{A Überpr.}}$	durch Überproduktion verursachte Abschreibungskosten
$K_{\text{WBU T}}$	Wiederbeschaffungswert von Arbeitsmitteln innerhalb unnötiger Takte (z.B. Fördereinrichtungen wie Bänder oder Montagevorrichtungen)
$TW_{\text{WIP MTS}}$	durchschnittlicher Teilewert WIP eines Montageteilsystems
$FB_{\text{uT MTS}}$	Flächenbedarf für unnötige Takte innerhalb eines Montageteilsystems
$FB_{\text{ZE}}$	Flächenbedarf für das Zwischenerzeugnis
$VK_{\text{Überpr. ext.}}$	externe durch Überproduktion verursachte Verschwendungsstückkosten
$TW_{\text{FW}}$	Teilewert der Fertigware des Montagesystems
$FB_{\Delta \text{FW}}$	Flächenbedarfsdelta der Fertigware aufgrund von Überproduktion
$VK_{\text{Wart. MS}}$	durch Wartezeiten verursachte Verschwendungsstückkosten eines Montagesystems
$VK_{\text{Bew. MS}}$	durch Bewegung induzierten Verschwendungsstückkosten
$MA_{\text{Mat. vers.}}$	notwendige Anzahl Mitarbeiter zur Materialversorgung
$VK_{\text{Transp. ext.}}$	externe transportinduzierte Verschwendungsstückkosten des Montagesystems
$L_{\text{K Log.}}$	Personalkostenstundensatz direkter logistischer MA
$VK_{\text{Bearb. MS}}$	durch Bearbeitung induzierte Verschwendungsstückkosten des Montagesystems
$MK_{\text{Besch. Betr.}}$	höherer (unnötiger) Beschaffungswert an Betriebsmittelkomponenten und -teilen, verursacht Verschwendung in der Bearbeitung
$VK_{\text{NA MS}}$	durch Nacharbeit und Ausschuss verursachte Verschwendungsstückkosten
$VK_{\text{MS}}$	Verschwendungsstückkosten des gesamten Montagesystems
$VK_{\text{MS ext.}}$	externe Verschwendungsstückkosten
$K_{\text{bFV}}$	Kosten für betrachtete Fügevorgänge
$I_{\text{BM}}$	Investitionssumme für Betriebsmittel
$PZ_{\text{verf.}}$	verfügbare Produktionszeit bezogen auf einen Zeitraum
$STK_{\text{nachfr.}}$	nachgefragte Stückzahl innerhalb eines Zeitraums
$Anz. MA_{\text{MTS}}$	Anzahl Mitarbeiter eines Montageteilsystems
$TV_{\text{man.}}$	manuelle Teilverrichtung
$K_{\text{ST Nach}}$	Nacharbeitsstückkosten



---

„Es gilt die Zeitspanne zu finden und zu nutzen, welche zwischen dem Erkennen eines Wandels in Wirtschaft und Gesellschaft und seiner vollen Auswirkung liegt – anders ausgedrückt: die Zukunft vorwegzunehmen, die bereits eingetreten ist. Es gilt, der noch ungeborenen Zukunft eine Idee aufzuzwingen, die den zukünftigen Ereignissen und Entwicklungen Richtung weist; man könnte auch sagen: Die Zukunft vorhersehen heißt nichts anderes als: Die Zukunft gestalten.“

*Peter F. Drucker*

## **1 Einleitung**

### **1.1 Ausgangssituation und Problemstellung**

„Die Produktion wird heute als ein komplexes und sich zeitlich veränderndes System verstanden. Ziel der Organisation ist es, dieses System permanent an die Aufgaben anzupassen und eine maximale Wirtschaftlichkeit und Effizienz sicherzustellen“ (Westkämper 2006, S.198). Die Montage versteht sich nach Kratzsch (2000, S.1) als Teilsystem der Produktion, folglich gilt es auch in der Montage bei sich verändernden Bedingungen (vgl. Lotter et al. 2012, S.4) der Forderung maximaler Wirtschaftlichkeit und Effizienz nachzukommen.

Strukturelle Veränderungen in der industriellen Produktion werden durch sogenannte Megatrends ausgelöst (vgl. Westkämper et al. 2013, S.7-8). Für den Teilbereich der Montage wirken nach Lotter im Besonderen die Globalisierung als Auslöser für extreme Wettbewerbssituationen und der Wandel vom Anbieter- zum Käufermarkt. Letzterer Trend führt auch zu einer breiten Produktpalette mit zahlreichen Varianten, die es in der Montage zu beherrschen gilt. Aus den Trends leitet Lotter Entwicklungstendenzen ab und nennt die Verkürzung der Produktlebensdauer, kleinere Losgrößen durch mehr Varianten und die Reduzierung der Herstell- und Montagekosten (vgl. Lotter et al. 2012, S.3-4). Brecher (et al. 2009, S.5) leitet zudem ähnlich wie Lotter aus der fortschreitenden Globalisierung neben

der Erfordernis der Komplexitätsbeherrschung und Effizienzsteigerung die Flexibilitätssteigerung ab.

Die Forderung zur Gestaltung kosteneffizienter und gleichzeitig hochflexibler Montagesysteme wird umso bedeutender, wenn man die Relevanz der Montage im Produktionssystem betrachtet. Nach Picker (2006, S.1) kann der Anteil der Montage am Gesamtarbeitsaufwand je nach Branche und Produkt zwischen 20 und 70 % ausmachen. Im Apparate- und Gerätebau erreichen die Montagekosten einen Fertigungskostenanteil bis 65%, in der Elektro- und Feinwerktechnik bis 70%. Lotter bestätigt die wichtige Bedeutung hinsichtlich der Kosten und bezeichnet die Montage als teuersten Produktionsprozess (Lotter et al. 2012, vgl. S.4).

Ansätze zur Gestaltung flexibler und effizienter Produktion zeigt das Toyota-Produktionssystem<sup>1</sup> auf, das nach Ohno aus der Notwendigkeit entstand, in der Automobilbranche kleine Stückzahlen vieler Modelle fertigen zu können (1993, vgl. S.19). „Das wichtigste Ziel des Toyota-Produktionssystems war die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Produktion durch konsequente und gründliche Beseitigung jeglicher Verschwendung“ (Ohno 1993, S.19). Verschwendung definiert Ohno als den Anteil an Kapazität, der nicht notwendige Arbeit darstellt, er unterscheidet 7 Arten von Verschwendung<sup>2</sup>, deren Vermeidung zur Kostensenkung führt. Die Kostensenkung wird durch reduzierte Bestände, durch Vermeiden unnötiger Produktionsprozesse und durch verbesserte Mitarbeiterproduktivität<sup>3</sup> mit Hilfe der

---

<sup>1</sup> Nach Nyhuis ist ein Produktionssystem ein soziotechnisches System, das Input in wertschöpfenden und assoziierten Prozessen zu Output transformiert (2010, vgl. S.7), Ohno versteht das Toyota-Produktionssystem nicht nur als Fertigungssystem sondern als umfassendes Managementsystem (1993, vgl. S.21), analog beschreibt Erlach es als einen arbeitsorganisatorischer Rahmen handlungsleitend für alle Mitarbeiter (2010, S.283)

<sup>2</sup> Liker erweitert die 7 Arten um eine achte Verschwendungsart in „der Toyota Weg“ (2006)

<sup>3</sup> Produktivität ist im Allgemeinen das Verhältnis von Ausbringungsmenge zu Einsatzmenge. Der Output eines Industrieunternehmens kann durch Einheiten eines Endprodukts erfolgen. Bei der Mitarbeiter-



Vermeidung von nicht wertschöpfenden Tätigkeiten erzielt (vgl. Ohno 1993, S.44-46).

Die Ansätze aus dem Toyota-Produktionssystem wurden kontinuierlich weiterentwickelt.<sup>4</sup> Das Prinzip der Konzentration auf Wertschöpfung<sup>5</sup> nach dem Vorbild von Toyota ist heute in vielen Unternehmen ein wesentliches Element unternehmensindividueller Produktionssysteme. Herlyn bezieht sich in der Automobilindustrie beispielhaft auf die Hersteller Opel, Mercedes-Benz, MAN, Audi und Volkswagen sowie der Zulieferer Bosch (2012, S.46). Wie die Unternehmen aus der Automobilbranche haben auch variantenreiche Serienfertiger anderer Branchen wie Festool und SEW Eurodrive die Philosophie der schlanken Produktion<sup>6</sup> verinnerlicht und richten mit Erfolg ihre Prozesse u.a. auch in ihren Fließmontagen<sup>7</sup> darauf aus (vgl. Soder 2006, Festool 2009 und Eisele et al. 2012).

Die Ansätze zielen jedoch nicht auf die initiale Planung der Montagesysteme, stattdessen basieren sie auf dem Prinzip der Verbesserung bereits real existierender Produktionen. Ein Beispiel ist die Wertstromanalyse, dessen erster Schritt die Beobachtung der Ist-Situation in der Produktion darstellt (vgl. Rother et al., 2000).

---

produktivität ist der Input die Anzahl der Mitarbeiter normiert auf Vollzeitbeschäftigte (vgl. Höhne 2013, S.86)

<sup>4</sup> vgl. hierzu Lean Management in Womack et al. 2004 und Liker 2006; Design von Wertströmen in Rother et al. 2000 und Erlach 2010; vgl. auch Synchronisierung der Produktion auf den Kundentakt nach Takeda 2006.

<sup>5</sup> Nach Duden ist Wertschöpfung die „in den einzelnen Wirtschaftszweigen, den einzelnen Unternehmen erbrachte wirtschaftliche Leistung, Summe der in diesen Wirtschaftsbereichen entstandenen Einkommen“(2014); hier ist der Begriff Wertschöpfung als Teil der Arbeit zu verstehen, der andere Teil ist Verschwendung (vgl. Takeda 2006, S.154)

<sup>6</sup> Die schlanke Produktion ist nach Womack und Jones ein 5-stufiger Prozess: Definition des Kundenwerts, die Definition des Wertstroms, die Gewährleistung fließender Prozesse, das bedarfsgesteuerte Pull-Prinzip sowie das Streben nach Exzellenz (vgl. Womack et al. 2004)

<sup>7</sup> Bei Fließmontagen sind nach Schenk die Arbeitsplätze nach dem Montageablauf angeordnet. Der Arbeitsumfang wird in hohem Detailgrad und in strenger zeitlicher Abstimmung auf die Arbeitsplätze aufgeteilt, was zu einem quasi kontinuierlichen Bewegungsablauf führt und eine Taktung des Montageablaufs ermöglicht (Schenk et al. 2014, S. 374)

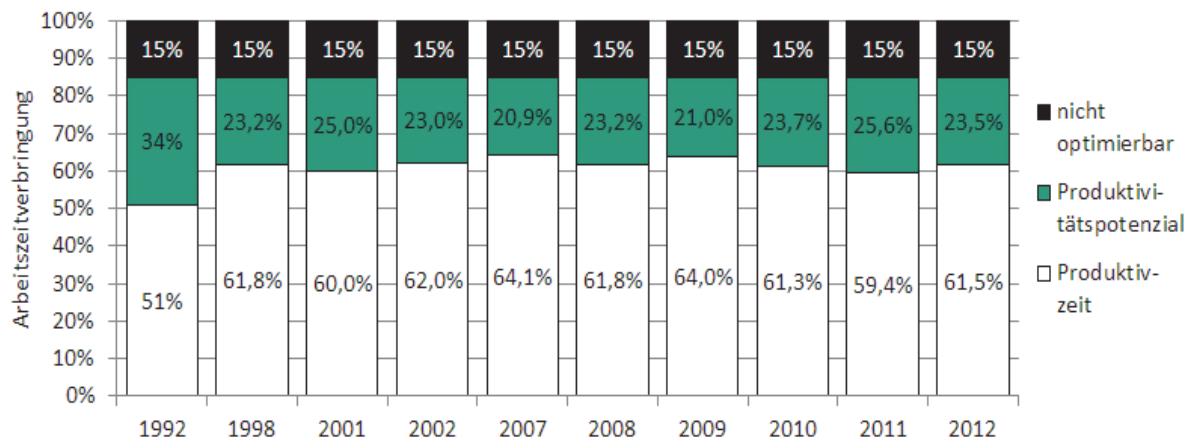
Die Anwendung nach Anlauf der Produktion bedeutet eine sukzessive Steigerung von Produktivität und eine Senkung der Herstellkosten in der Betriebsphase.

Das Konzept der Lernkurve belegt die Feststellung der sukzessiven Kostensenkung in einer empirischen Studie der Boston Consulting Group. Die Studie zeigt, dass ein Zusammenhang zwischen der mit dem Produktionsprozess gemachten Erfahrung, gemessen in der Anzahl Prozesswiederholungen oder äquivalent der kumulierten Ausbringungsmenge und den Stückkosten existiert. Wird die Produktionsmenge jeweils verdoppelt, so senken sich die Stückkosten jeweils um einen konstanten Prozentsatz zwischen 20 und 30% (vgl. Henderson 1984 und Mochty 1996, S. 1074-1082). Vahrenkamp (2008, S.30) nennt neben Rationalisierungspotenzialen, Größendegressionen und technischen Fortschritten die auftretenden Lerneffekte durch fortlaufende Prozessbeherrschung und die gesammelten Erfahrungen der Mitarbeiter als Grund für das vorhandene Kostensenkungspotenzial.

Die Kostensenkungspotenziale während der Serie zeigen, dass in heutigen Montagesystemen zum Zeitpunkt des Anlaufs Verschwendung existiert und unbewusst miteingeplant wird. Holle (2002, vgl. S. 13) geht von 20 bis 40% Rationalisierungspotenzialen aus. Hohe Stückkosten und geringe Produktivität verringern den Gewinn in der markttechnisch günstigen frühen Phase des Produktlebenszyklus. Holles Potenzialabschätzung wird durch die in Österreich fortlaufend durchgeführte Produktivitätsstudie des Beratungsunternehmens Czipin Consulting bestätigt. Die Studie misst die Produktivität in Unternehmen, indem der Anteil an wertschöpfender und nicht wertschöpfender Arbeitszeit quantifiziert wird. Von 1992 bis 2012 wurde in österreichischen Unternehmen<sup>8</sup> ein stetiges Produktivitätspotenzial von über 20% in den Unternehmen nachgewiesen (siehe Abbildung 1).

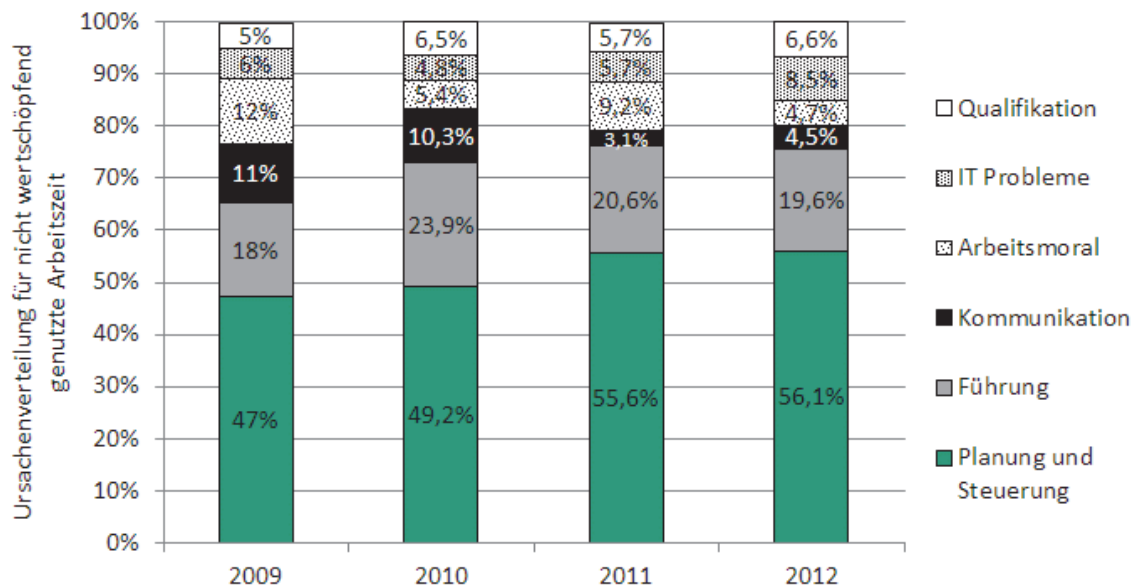
---

<sup>8</sup> Die 2013 veröffentlichte Studie von Czipin Consulting bezieht sich auf insgesamt 427 Einzelstudien in produzierenden Unternehmen, bezogen auf den Zeitraum von 2009 bis 2012.



**Abbildung 1: Produktivitätspotenziale nach der Studie von Czipin (2013)**

Die Studie ermittelte ergänzend die Ursachen für die nicht wertschöpfend genutzte Arbeitszeit. Abbildung 2 zeigt die 6 möglichen Ursachenkategorien und deren Anteile. Die „Planung und Steuerung“ nimmt den größten Anteil ein mit einer seit 2009 steigenden Tendenz.



**Abbildung 2: Ursachenanalyse nach der Studie von Czipin (2013)**

Die geschilderten Sachverhalte zeigen auf, dass einerseits planerisches Produktivitätspotenzial in der Serienphase existiert und andererseits während des Betriebs durch Konzentration auf Wertschöpfung und durch Vermeidung von Verschwen-

derung erfolgreich<sup>9</sup> bekämpft wird. Es stellt sich nun die Frage, ob die nachgewiesenen Potenziale der sukzessiven Verbesserung während der Serie nicht schon in der Planungsphase zum Anlauf erschlossen werden können. Damit werden die heutigen Planungsverfahren der Montage in Frage gestellt. Die im Jahr 2009 durchgeführte Studie „Montagetechnik und –organisation“ unterstreicht die Montageprozessplanung als ein wichtiges Handlungsfeld für die zukünftige Forschung (vgl. Brecher et al. 2009, S.55-56).

Betrachtet man im Bereich der Montageprozessplanung sowohl die heute existierenden Planungsverfahren als auch die auf dem Markt befindlichen digitalen Unterstützungsumgebungen, so lassen sich folgende Defizite feststellen:

- Es existieren kaum vorserielle Ansätze zur Planung von Montagen, die Wertschöpfungsorientierung und die Vermeidung von Verschwendung thematisieren.
- In heutigen Modellen und Bewertungsmethoden von Montagesystemen ist die Wertschöpfungsorientierung unterrepräsentiert.
- Das systematische Messen und Reduzieren von Verschwendung ist vor der Serie kaum erkennbar.

Vor allem bei hoher Stückzahl pro Zeiteinheit existieren aufgrund dieser Defizite große nicht erschlossene Kostensenkungspotenziale, da sich mit zunehmender Prozesswiederholung gemäß dem Ansatz der Lernkurve die Stückkosten umso mehr verringern.

---

<sup>9</sup> vgl. die Ergebnisse der ZEW Studie in Pressemitteilung (ZEW 2002) und vgl. die Produktivitätssteigerung bei der Firma Ringele (Kaymakci 2013)

## 1.2 Zielsetzung

Aufgrund der in der Problemstellung festgestellten großen Kostensenkungspotenziale bei hoher Stückzahl soll diese Arbeit Montagesystemformen fokussieren, die bei hoher Stückzahl angewandt werden. Der geeignete Organisationstyp für variantenreiche Serienfertiger<sup>10</sup> ist die Taktfertigung (vgl. Wiendahl 2014, S.51), in der Montage wird ähnlich der Fertigung die entsprechende Organisationsform als getaktete Fließmontage<sup>11</sup> bezeichnet. Getaktete Fließmontagen enthalten bewegte Montageobjekte und stationäre Arbeitsplätze in der Reihenfolge des Montageablaufs. Die Montageobjekte werden zeitlich synchron an nachfolgende Stationen weitergegeben. Diese spezielle Organisationsform ermöglicht die bei hoher Stückzahl wichtige geringe Durchlaufzeit bei gleichzeitig hohem zeitlichem und technischem Nutzungsgrad der Mittel (vgl. Eversheim 1989, S. 177).

Mit der Fokussierung auf getaktete Fließmontagen und der in Kapitel 1 beschriebenen Problemstellung der unterrepräsentierten Wertschöpfungsorientierung in heutigen Montageplanungsverfahren leitet sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ab. Folgende 2 Hauptziele sollen erfüllt werden:

- die Entwicklung eines Verfahrens zur Planung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen.
- Kern des Verfahrens soll ein Modell zur Gestaltung getakteter Fließmontagen darstellen, das in der Lage ist, Verschwendung in absoluten Zahlen zu messen und darauf aufbauend Verschwendung entweder zu vermeiden oder zu reduzieren.

---

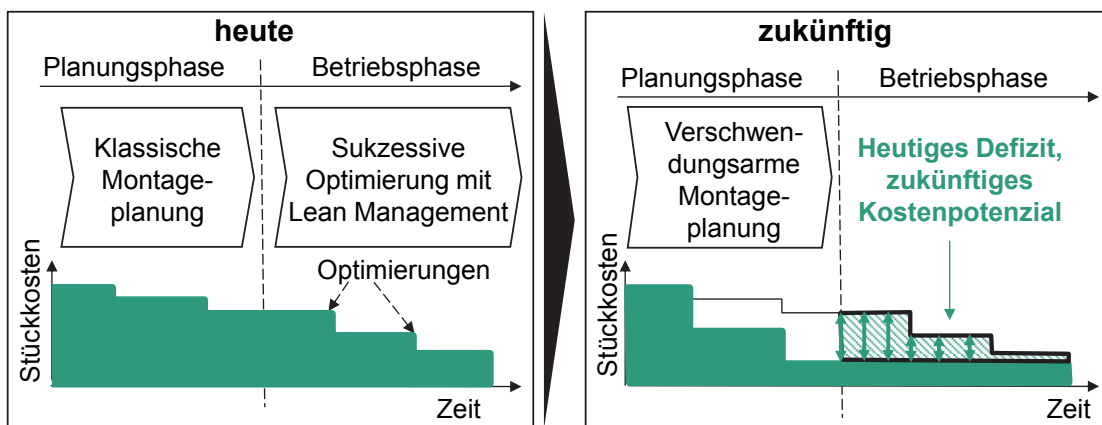
<sup>10</sup> bei Serienproduktionen werden größere, aber begrenzte Stückzahlen nacheinander in Losen oder parallel hergestellt (vgl. Gabler 2016a)

<sup>11</sup> vgl. Schenk et al. 2014, S. 372 und Schuh 2014, S.31. Eversheim (1989, S.177) verwendet synonym den Begriff Taktstraßenmontage

Um die Wirtschaftlichkeit nachweislich zu verbessern, sollen ergänzend folgende 2 Nebenziele erreicht werden:

- Das Verfahren soll durch den gewählten Ansatz die Stückkosten im Vergleich zu den klassischen Planungsverfahren und -methoden weiter reduzieren.
- Das zu entwickelnde Verfahren soll die in Kapitel 1 beschriebenen Kostensenkungspotenziale bereits zum Anlauf heben.

Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang der heutigen Ausgangssituation mit dem angestrebten Zielzustand.



**Abbildung 3: Verschwendungsarme Montageplanung**

Das Verfahren inklusive der Modelle soll aufbauend auf dem Stand der Technik eine wesentliche Erweiterung zur verschwendungsarmen Gestaltung darstellen.

### 1.3 Forschungsfragen und Vorgehensweise

Aus der Zielsetzung der Arbeit leitet sich folgende zentrale Forschungsfrage ab:

Wie können getaktete Fließmontagen verschwendungsarm geplant werden?

In Anlehnung an Ohno's Definition von Verschwendung (vgl. Kapitel 1.1) ist nach Zollondz (2013, S.29) die Verschwendung zu minimieren und nach Möglichkeit zu eliminieren. Verschwendungsarme Gestaltung im Sinne einer Reduzierung von Verschwendung ist zu erreichen, indem Verschwendung messbar gemacht wird. Es leiten sich zwei weitere untergeordnete Forschungsfragen ab:

Wie kann Verschwendung innerhalb des Planungsprozesses von getakteten Fließmontagen messbar gemacht werden?

Welche Montageplanungsschritte sind auszuführen, um Verschwendung zu reduzieren?

Aus den Forschungsfragen leiten sich verschiedene Aufgaben ab, die im Folgenden kurz charakterisiert werden sollen und gleichzeitig einen Überblick über die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit darstellen.

Kapitel 2 fasst die Grundlagen und die Festlegung des Untersuchungsbereichs zusammen. Die getaktete Fließmontage stellt den Betrachtungsraum dar, innerhalb derer die Verschwendung reduziert werden soll. In Kapitel 2.1 soll zunächst eine exakte Abgrenzung vorgenommen werden, um den Betrachtungsrahmen „Montagesystem als Teil der Fabrik“ eindeutig zu definieren. Die Festlegung der Systemgrenzen entscheidet über die zu betrachtenden Systemelemente und den lokalen Bezug der zu betrachtenden Verschwendung.

Weiter soll in Kapitel 2.2 grundlegend ermittelt werden, wie der Begriff Verschwendung definiert ist und welche Arten von Verschwendung existieren, um eine klare Basis für weitere Untersuchungen zu schaffen. Es soll nach der begrifflichen Abgrenzung und der Festlegung des Bezugsrahmens die Verschwendung in getakteten Fließmontagesystemen genauer spezifiziert und deren Ausprägungen innerhalb der Systemgrenzen untersucht werden.

Der Planungsprozess eines Montagesystems erzeugt sukzessive eine konkrete Beschaffenheit der physischen Elemente wie z.B. Automatisierungseinrichtungen, Werkzeuge und Stationen. Dieser Planungsprozess enthält Teilschritte und planerische Teilaufgaben, die unterschiedliche Relevanz in Bezug auf die in dieser Arbeit definierte Zielsetzung haben. Um die zweite untergeordnete Forschungsfrage nach den notwendigen Planungsschritten für die Reduzierung von Verschwendung beantworten zu können, soll in Kapitel 2.3 zunächst eine breite Übersicht der angewandten Planungsphasen und Planungsschritte zur Gestaltung von Montagesystemen gegeben werden. Diese Übersicht soll den Stand der Technik



hinsichtlich der Ablaufstruktur der klassischen Montageplanung darstellen. Später sollen in Kapitel 3 auf dieser Basis die für die Fragestellung der Reduzierung von Verschwendung relevanten Planungsschritte identifiziert werden.

Zur Vorbereitung der Konzeption des Verfahrens soll in Kapitel 2.4 eine Einordnung in die Gestaltung und Beschreibung von Planungsprozessen durchgeführt werden, um verfahrenstechnische Elemente zu identifizieren, die es in der Konzeption zu entwerfen gilt.

Aus den Forschungsfragen leiten sich fortführend Anforderungen an das zu gestaltende Verfahren ab, die in Kapitel 3 beschrieben werden sollen. Kapitel 3.1 soll auf Basis der Ablaufstruktur der klassischen Montageplanung aus Kapitel 2.3 die Anforderungen aus Sicht der relevanten Planungsschritte ermitteln. Kapitel 3.2 soll die Anforderungen an den Verfahrensablauf und der analysierenden Planungskonstrukte<sup>12</sup> (im folgenden Konstrukte genannt) zusammenfassen. Um den Zielzustand eines Montagesystems eindeutig zu beschreiben, sind weitere Anforderungen an beschreibende Konstrukte zur Modellierung notwendig, die in Kapitel 3.3 definiert werden. Kapitel 3.4 widmet sich den Anforderungen an bewertende Konstrukte zur Sicherstellung der Zielerreichung einer absolut messbaren Verschwendung innerhalb von Montagesystemen.

Nach der Spezifizierung von Anforderungen an das zu entwerfende Verfahren in Kapitel 3 soll Kapitel 4 den Stand der Technik im Detail analysieren, indem vorhandene Montageplanungsverfahren in Kapitel 4.1 und existierende EDV-Tools im Anwendungsbereich in Kapitel 4.2 zusammengefasst werden. Das Fazit in Kapitel 4.3 soll die Anforderungen aus Kapitel 3 am Stand der Technik spiegeln und die heute existierenden Defizite verdeutlichen.

---

<sup>12</sup> Planungskonstrukte sind methodengestützte Planungsbausteine mit genau definiertem Leistungsumfang, mit denen über Schnittstellen kommuniziert werden kann, um ihre Dienste zu beanspruchen (Braun 2003, S. 46)

Kapitel 5 beschreibt den Lösungsansatz zur Planung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen. Zunächst analysiert Kapitel 5.1 einleitend die Ziel- und Aufgabenstellung. Darauf aufbauend leitet Kapitel 5.2 den Aufbau der Elemente des Lösungsansatzes ab. Diese Elemente sollen zum einen in Basismodelle unterschieden werden, auf die bei der Planung, also dem Durchschreiten der Phasen des Vorgehens, zurückgegriffen wird. Zum anderen soll der Entwurf des Verfahrens selbst inklusive der sukzessive durchzuführenden Phasen skizziert werden. In Kapitel 5.3 erfolgt die Synthese dieser einzelnen Elemente zum Gesamtkonzept.

Kapitel 6 und 7 beinhalten das Detaillkonzept des Verfahrens zur Gestaltung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen. Die in Kapitel 5 dargestellten Entwürfe werden konkretisiert und im Detail spezifiziert. Dabei konzentriert sich Kapitel 6 auf die Beschreibung der entwickelten Basismodelle. Es werden 6 unterschiedliche Basismodelle unterschieden, denen jeweils ein Unterkapitel zugeordnet ist. Das Basismodell zur Bewertung von Verschwendung besteht aus Kennzahlen, deren Definition und Berechnung in Kapitel 6.1 formuliert werden. Es folgen in Kapitel 6.2 bis 6.4 die Beschreibung der Basismodelle „Produkt“, „Montageprozess“ und „physisches Montagesystem“, während Kapitel 6.5 Beziehungen zwischen diesen Basismodellen formuliert. Kapitel 6.6 definiert Formeln zur modellbasierten Bewertung der Montagestückkosten, während Kapitel 6.7 die Kostenbewertung von Verschwendung beinhaltet, um das Ausmaß der verschiedenen Verschwendungsarten in absoluten Zahlen angeben zu können. Kapitel 7 beschreibt im Detail den in 8 Phasen definierten Verfahrensablauf zur Gestaltung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen.

Das Verfahren wird in Kapitel 8 anhand eines Praxisbeispiels validiert und bewertet. Die Kapitel 9 und 10 fassen die Ergebnisse in Deutsch und Englisch zusammen, während Kapitel 11 die Arbeit mit einem Ausblick abschließt.

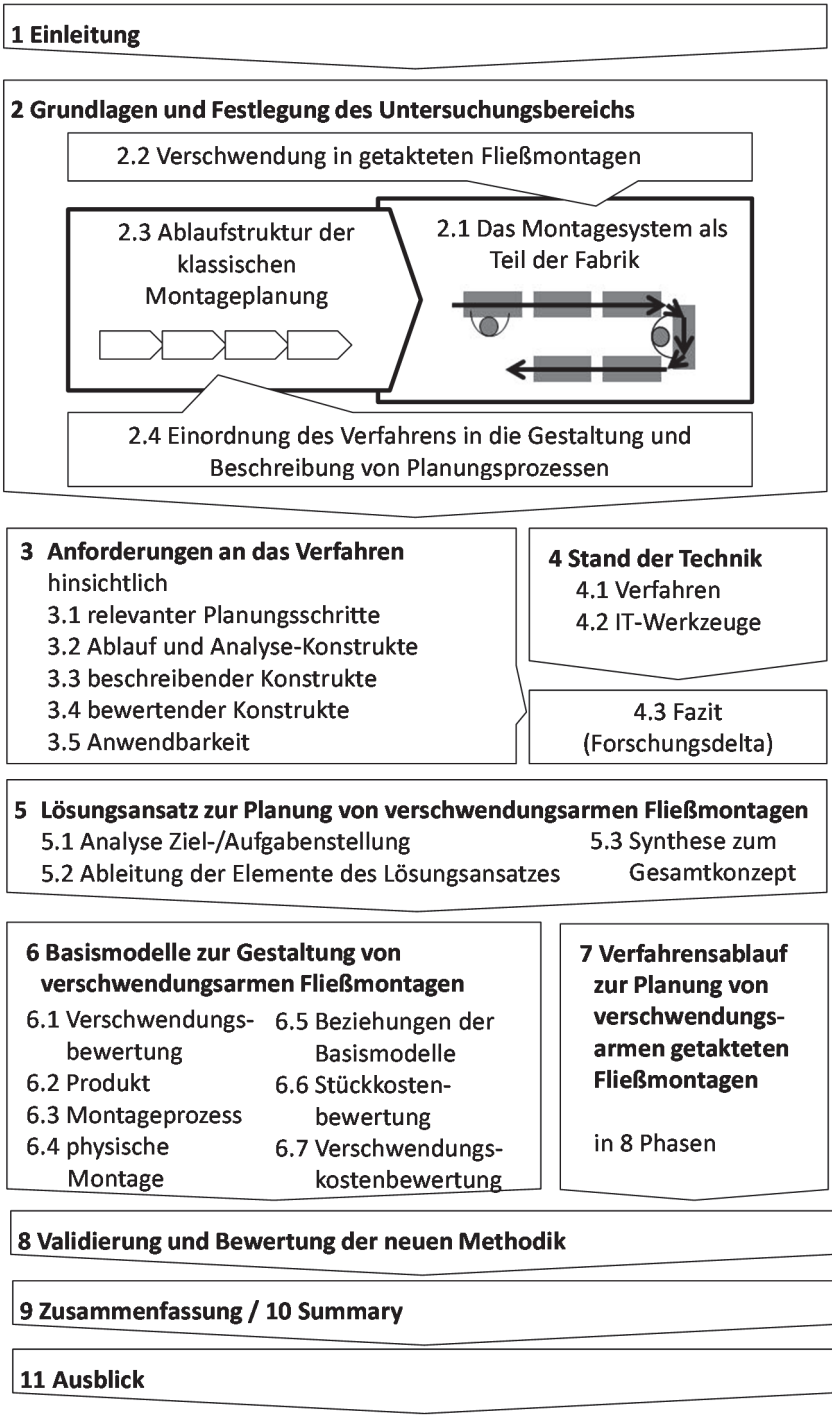


Abbildung 4: Gliederung der Arbeit

---

## **2 Grundlagen und Festlegung des Untersuchungsbereichs**

Kapitel 2 behandelt die Grundlagen im Themenbereich und grenzt den Untersuchungsbereich in Bezug auf die Relevanz hinsichtlich der Forschungsfrage ein, wie verschwendungsarme getaktete Fließmontagen geplant werden können. Kapitel 2.1 behandelt das Montagesystem als Teil der Fabrik, nennt dessen Elemente und legt Systemgrenzen zur Peripherie fest. Kapitel 2.2 definiert den Begriff Verschwendung, klärt das in dieser Arbeit zugrundeliegende Verständnis und formuliert den Bezug der Verschwendung in getakteten Fließmontagen. Kapitel 2.3 thematisiert die Planung von Montagesystemen und nennt deren wichtigste Planungsschritte. Kapitel 2.4 vermittelt die Grundlagen zur allgemeinen Gestaltung und Beschreibung von Planungsprozessen.

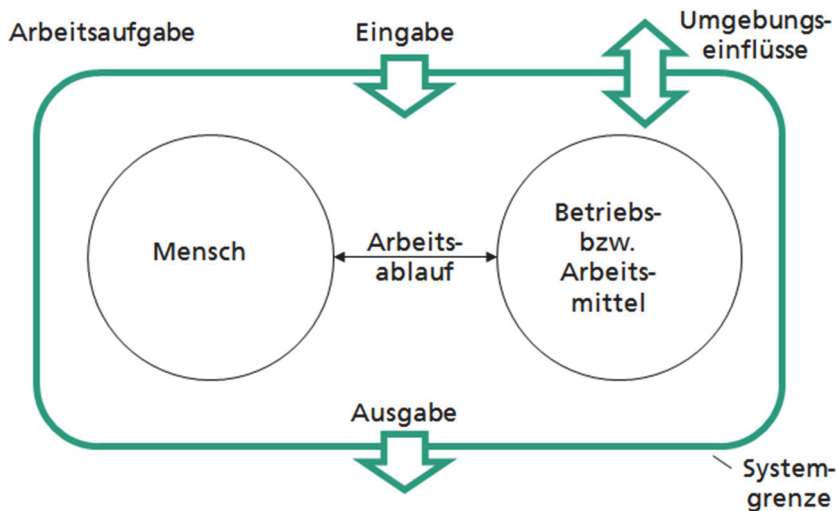
### **2.1 Das Montagesystem als Teil der Fabrik**

Ein System ist definiert als „Menge von geordneten Elementen mit Eigenschaften, die durch Relationen verknüpft sind“ (Gabler 2016b). Fabriken<sup>13</sup> können nach Westkämper als soziale und technische Systeme verstanden werden, deren Aufgabe darin besteht, Werte in Form von Produkten zu erzeugen. Die Fabrik als System benötigt einen Input und erzeugt einen Output bzw. Produkte und Dienstleistungen (vgl. Westkämper 2006, S.33). Westkämper wendet den Systemansatz im Stuttgarter Unternehmensmodell auf Fabriken an und definiert die Elemente dieses Fabriksystems als technische oder organisatorische Prozesse wie beispielsweise Bearbeitungsstationen oder Arbeitsplätze. Die Beziehungen zwischen diesen entstehen durch den Arbeitsablauf und die aus den Fertigungsaufgaben resultierenden Arbeitsfolgen. Der Arbeitssystemansatz nach REFA (2002, S.64 ff.) detailliert die Elemente soziotechnischer Arbeitssysteme, indem 7 verschiedenartige

---

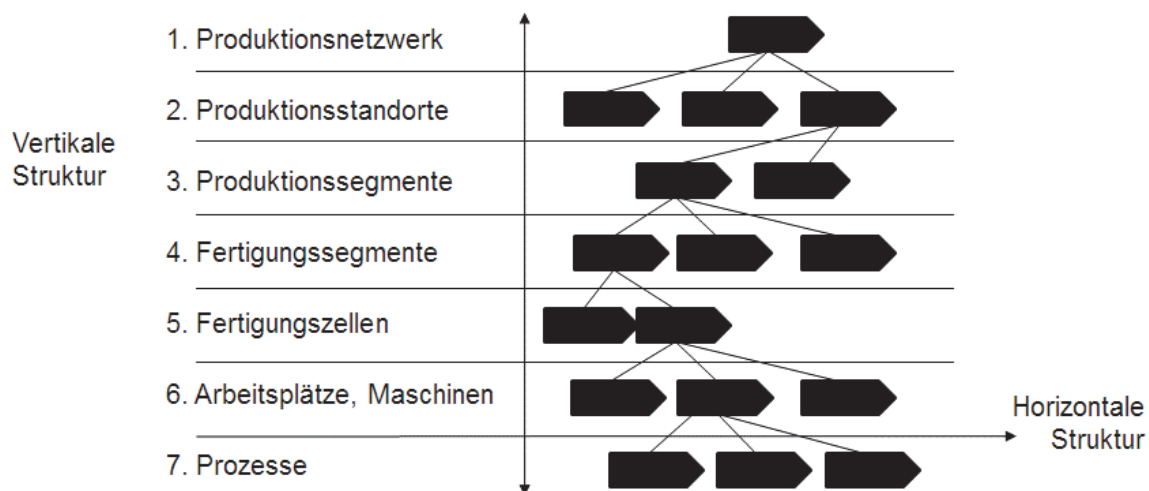
<sup>13</sup> Westkämper verwendet die Begriffe produzierende Unternehmen und Fabriken synonym, (vgl. Westkämper 2006, S. 39-40)

Systemelemente definiert werden: Arbeitsaufgabe, Arbeitsablauf, Eingabe, Ausgabe, Mensch, Arbeits- und Betriebsmittel und Umwelteinflüsse. Diese 7 Systemelemente bilden zusammen das Arbeitssystem.



**Abbildung 5: Arbeitssystem nach REFA (2002)**

Nach dem Stuttgarter Unternehmensmodell ist die Struktur des Fabriksystems hierarchisch aufgebaut, d.h. die Fabrik enthält Subsysteme wie z.B. Fertigungssysteme oder Maschinen. Westkämper unterteilt die Systemebenen einer Produktion vertikal in 7 Ebenen, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.

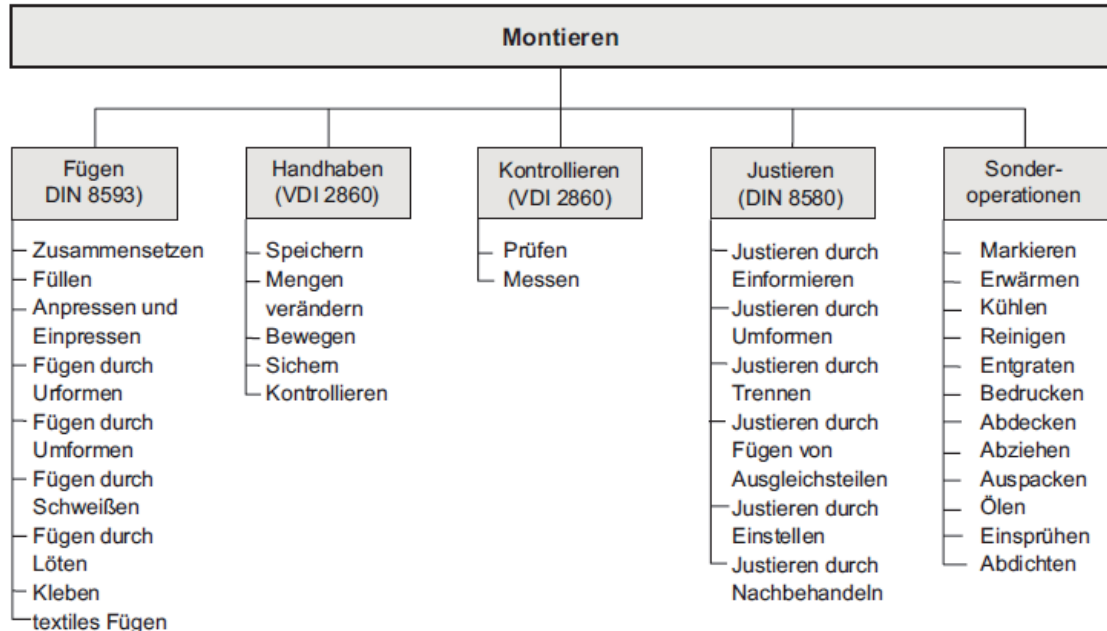


**Abbildung 6: Systemebenen der Produktion (Westkämper 2006, S.56)**

Sowohl Westkämper wie auch Pawellek stellen fest, dass die Festlegung der jeweiligen Systemgrenzen durch Strukturierung nach organisatorischen Gesichts-

punkten wie z.B. vergleichbarer Arbeitsinhalte erfolgt. Pawellek bezieht sich zur Strukturierung u.a. auf Wirksysteme, d.h. diejenigen Subsysteme bzw. Teilsysteme einer Fabrik, die in ihrem integrativen Zusammenwirken den Herstellungsprozess charakterisieren (vgl. Pawellek 2014, S.30).

Der Bereich der Montage lässt sich als ein solches Teilsystem definieren, da die Tätigkeit des Montierens eindeutig von anderen Fertigungsprozessen abgegrenzt werden kann, wie die Definition nach VDI-Richtlinie 2860 zeigt: „Montieren ist die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen“. Ein Montagesystem ist nach Schmidt (1992, S. 10) ein System, in dem solche Verbindungen verrichtet werden. Lotter fasst die verschiedenen Montagetätigkeiten zusammen: „Montagen bestehen im Kern aus Vorgängen des Fügens, wie in DIN 8593 (2003) spezifiziert, und Funktionen der Werkstück-handhabung nach der VDI-Richtlinie 2860. Die Funktionen der Montage umfassen zusätzlich Tätigkeiten des Justierens und Kontrollierens sowie Sonderoperationen [...]“ (Lotter et al. 2012, S.2).



**Abbildung 7: Funktionen der Montage (Lotter 2012, S.2)**

Westkämper wendet sein hierarchisches Modell der 7 Systemebenen auf die Montage an, indem er die End- und Baugruppenmontage als Beispiel für ein

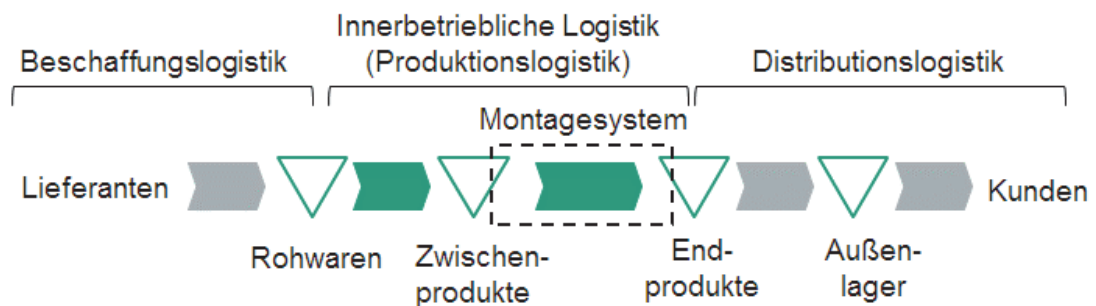
Produktionssegment nennt, weiter gibt er als Fertigungssystem das Montagesystem und als Fertigungszelle die Montagezelle an. Führt man die Konkretisierung des hierarchischen Modells auf den Bereich der Montage weiter aus, stellt fortführend eine Montagestation den Arbeitsplatz dar und die in Abbildung 7 dargestellten Montagetätigkeiten entsprechen der am meisten granularen Systemebene der Prozesse.

Betrachtet man das Arbeitssystem als Montagesystem und zieht die Definition nach REFA heran, so lassen sich die **Elemente eines Montagesystems** auf den gewählten Anwendungsbereich konkretisieren:

- **Arbeitsaufgabe:** Ausführen einer Montageaufgabe (vgl. Loferer 2002, S. 15), Montieren eines Produkts aus Bauteilen (vgl. Petersen 2005, S. 17)
- **Arbeitsablauf:** Prinzipien zur Gestaltung des räumlich-zeitlichen Zusammenwirkens von Arbeitskraft, Betriebsmittel und Arbeitsobjekt (vgl. Petersen 2005, S.21)
- **Eingabe:** Material (Einzelteile, Baugruppen, Hilfsstoffe, Betriebsmittel, Hilfszeuge), Information (Aufträge, Zeichnungen, Montageanweisungen, Programme) und Energie (vgl. Picker 2006, S. 9)
- **Ausgabe:** Material (Baugruppen, Produkte, Hilfsstoffreste, Betriebsmittel, Hilfszeuge), Information (Auftragsstatus, Montagefortschritt, Prüfdaten, Abweichungen) und Energie (vgl. Picker 2006, S. 9)
- **Mensch:** Montagearbeiter, Logistiker, Vorarbeiter
- **Arbeits- und Betriebsmittel:** Arbeitsplätze, Speicher- Ordnungs- und Zuführeinrichtungen, Handhabungsgeräte, Fügeeinrichtungen, Transferkomponenten und Verkettungsmittel, Steuerungseinheiten und Sicherungseinrichtungen (vgl. Loferer 2002, S.15)
- **Umwelteinflüsse:** physikalische, chemische, biologische, organisatorische und soziale Parameter, die das Verhalten des Systems und die Eigenschaften seiner Elemente beeinflussen (vgl. REFA 2002)

Mit der Aufgabenstellung der Gestaltung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen als Teilmenge von Montagesystemen<sup>14</sup> sind im Besonderen die logistischen Tätigkeiten zu betrachten, inwiefern diese innerhalb oder außerhalb der hier gewählten Systemgrenze liegen. Dies ist insofern von Bedeutung, da eine Quantifizierung von Verschwendung und die Bestimmung der im System verursachten Kosten von den zu betrachtenden logistischen Prozessen abhängig sind.

Auf operativer Ebene werden Prozesse der qualitativen Gütertransformation der Produktion zugeordnet. Dagegen sind Prozesse wie Fördern, Umschlagen oder Lagern logistische Prozesse, sie werden der Produktionslogistik als Teil des Logistiksystems zugeordnet (vgl. Springer 2013, S.114). Arnold bezeichnet die Produktionslogistik auch als innerbetriebliche Logistik und grenzt diese von der Beschaffungs- und Distributionslogistik ab, indem der Materialfluss vom Rohwaren- bis zum Endproduktlager zugeordnet wird (Arnold et al. 2008, S.5).



**Abbildung 8: logistische Abgrenzung in Anlehnung an Arnold (2008)**

Pfohl legt die Systemgrenze zwischen Produktionslogistik und Produktion an den Bereitstellpunkt, indem er der Produktionslogistik die Aufgabe zuteilt, der

---

<sup>14</sup> Schenk (et al. 2014, S. 372) und Schuh (2014, S.31) bezeichnen die Fließmontage als Ablaufart und synonym als Organisationsform der Montage



Produktion das für die Produktionsprozesse nötige Material bereitzustellen<sup>15</sup> (vgl. Pfohl 1996, S.186).

Dieser Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit übernommen, sodass die aus Materialflusssicht vorgelagerten logistischen Prozesse vor der initialen Bereitstellung im Montagesystem nicht betrachtet werden. Damit sind innerbetriebliche Logistikprozesse wie beispielsweise das Annehmen und Verteilen im Wareneingang oder der innerbetriebliche Transportprozess vom Wareneingang zur Montage nicht im Betrachtungsbereich. Aufgrund der Fokussierung auf Montagesysteme werden nachgelagerte Produktions- und Logistikprozesse ebenso nicht betrachtet. Deshalb wird der Bereitstellpunkt zur Übergabe des Montageerzeugnisses an nachgelagerte Prozesse als zweite Systemgrenze definiert.

Der Ansatz folgt dem von Pfohl 1994 beschriebenen Line-Back-Prinzip. Die Planung beginnt nach diesem Prinzip zunächst mit der Analyse des Arbeitsplatzes und erst in einem zweiten Schritt erfolgt die Planung der logistischen Prozesskette entgegen der Materialflussrichtung (vgl. Pfohl et al. 1994, S. 92).

### **2.2 Verschwendung in getakteten Fließmontagen**

Im Bereich der Produktionstechnik wird der deutsche Begriff der Verschwendung als Synonym für das japanische Wort „Muda“ verwendet, dessen wörtliche Bedeutung „Abfall“ (englisch „waste“) ist. Ohno definiert die Verschwendung als die Differenz aus der gegenwärtigen Kapazität und der notwendigen Arbeit. Dieser Grundgedanke entstand während der 50er-Jahre aus der Situation japanischer Unternehmen, Produktionssteigerungen ohne Erhöhung der Anzahl Arbeitskräfte zu erzielen. Idee war es, die Effizienz zu erhöhen, indem nicht wertschöpfende Arbeit eliminiert wird (Ohno 1993, S. 45). Eine weitere sich an die Definition von Ohno anlehende, jedoch auf die Ressource Mensch einschränkende Definition gibt Womack und bezeichnet Verschwendung als jede menschliche Aktivität, die Ressourcen

---

<sup>15</sup> vgl. hierzu die Spezifikation der Eingaben in ein Arbeitssystem

verbraucht, aber keinen Wert erzeugt (Womack et al. 2004, S. 23). Womack's Definition unterscheidet sich von der Ohno's, indem alle Tätigkeiten, die keinen Wert erzeugen, als Verschwendung deklariert werden. Bei Ohno ist relevant, ob diese nicht wertschöpfende Arbeit notwendig ist oder nicht. Wegen der unterschiedlichen Interpretationsformen wird festgelegt, dass in dieser Arbeit die Verschwendung ungeachtet der Notwendigkeit als Aktivität zu deuten ist, die keinen Wert erzeugt. Verschwendung ist hier ohne die Reduzierung auf menschliche Arbeit zu sehen, es wird daher die maschinelle Arbeit miteinbezogen.

Diesem begrifflichen Verständnis folgen die verschiedenen Formen der Klassifizierung von Verschwendung in der Literatur. Nach Ohno treten 7 verschiedene Arten von Verschwendung auf: Überproduktion, Wartezeiten, Transport, Verschwendung bei der Bearbeitung, Lager, überflüssige Bewegungen und defekte Produkte. Takeda ergänzt die Gliederung nach Ohno, indem er 3 Verschwendungsebenen nennt. Die erste Ebene wird als „katakana muda“ bezeichnet und vereinigt alles, was für die Arbeitsabläufe nicht notwendig ist wie beispielsweise das Warten oder Suchen. Die zweite Ebene ist die „hiragana muda“, sie bezeichnet die Arbeitsabläufe, die als solche Verschwendung darstellen, doch ohne tiefgreifende Umgestaltung der Produktion durchgeführt werden müssen. Beispiele sind das Drücken von Schaltern oder das Zurückholen von Teilen in die Ausgangsposition. Die dritte Ebene ist die „kanji muda“ und fasst Verschwendung zusammen, die auf Anlagen und Maschinen zurückzuführen sind (Takeda 2006, S. 154), erweitert also den nach Womack eingeschränkten Fokus auf Bewegungen des Mitarbeiters durch Mitbetrachtung der automatisierten Prozesse.

Mit dem Ziel der Reduzierung von Verschwendung sind innerhalb des hier vorliegenden Untersuchungsbereichs der Fließmontage die verschiedenen Ausprägungen von Verschwendung näher zu spezifizieren. Eine Ausprägung von Verschwendung ist dabei ein Sachverhalt, der auf Ineffizienz oder einen nicht wertschöpfenden Prozess hinweist. Die Fachliteratur im Bereich der schlanken Produktion (englisch: Lean production) konkretisiert diese Ausprägungen von

Verschwendung, indem Beispiele für die 7 Verschwendungsarten und die Ursache des Entstehens genannt werden (vgl. Ohno 1993, Teufel 2009, Takeda 2006, Erlach 2010, Deuse 2012, Meran et al. 2013):

Nach Teufel bedeutet Verschwendung durch Überproduktion, dass die produzierte Menge die Nachfrage der internen und externen Kunden übersteigt (Teufel 2009, S. 682). In diesem Zusammenhang ist der Takt-Begriff von Bedeutung. Rother (et al. 2004, S.40) verwendet für den Kundentakt synonym den Begriff „Taktzeit“ und definiert ihn als verfügbare Betriebszeit pro Schicht dividiert durch die vom Kunden benötigte Produktionsmenge pro Schicht (vgl. Zollondz 2013, S.274 und Erlach 2010, S. 48). Anders dagegen unterscheidet REFA (1985a, S. 282) die „Taktzeit“ gleich dem „Arbeitstakt“ oder „Takt“ als Zeit, in der jeweils eine Mengeneinheit fertiggestellt wird, damit das Fließsystem die Soll-Mengenleistung erbringt.

Verschwendung durch Überproduktion liegt vor, wenn entweder zu viel oder zu früh oder zu schnell produziert wird. Ist der Ist-Montagetakt der Fließmontage kleiner als der Kundentakt, wird zu viel produziert. Hierfür kann es unterschiedliche Ursachen geben. Eine Ursache hierfür ist der Einsatz zu vieler Mitarbeiter innerhalb einer flexiblen Fließmontage. Eine weitere Ursache besteht darin, dass der geplante Montagetakt bewusst unter dem Kundentakt gewählt wurde, damit Ausbringungsverluste durch mögliche Standzeiten von Anlagen oder andere Prozessunsicherheiten ausgeglichen werden können. Eine dritte mögliche Ursache ist die Überproduktion durch beschleunigtes Abarbeiten der Prozesse und Unterschreiten des Kundentakts, z.B. als Folge stückzahlabhängiger Akkord-Löhne. Eine weitere Ausprägung von Verschwendung durch Überproduktion stellen definierte Losgrößen bei entkoppelten Systemen dar, beispielsweise bei zeitlich und örtlich getrennten Vor- und Endmontagen mit Bedarfssteuerung und einem Zwischenlager. Die Montageprozesse erfolgen in diesem Fall früher als notwendig.

Das Vorarbeiten einzelner Mitarbeiter in der Linie stellt eine weitere Ursache von Verschwendung dar. Dadurch wird der standardisierte Puffer<sup>16</sup> nicht mehr eingehalten. Nach Ohno ist die Überproduktion die schlimmste Art der Verschwendung, da sie gewöhnlich alle anderen Arten vervielfacht. Es erhöht die Ausschuss- und Nacharbeitsquote, die Bestände, die Durchlauf- und Wartezeiten, sowie unnötige Bewegungen und Transporte (Ohno 1993).

Verschwendung durch Lagerung bindet Kapital und macht weitere logistische Arbeitsschritte notwendig, es werden zusätzlicher Flächenbedarf und weitere logistische Ressourcen benötigt (vgl. Teufel 2009, S. 682). Hohe Umlaufbestände sind nach Teufel eine Folge der Verschwendungsart Überproduktion. Daher sind die oben beschriebenen Ursachen von Überproduktion auch auf zu hohe Bestände zu beziehen: in einem Montagesystem können unnötige Bestände zwischen entkoppelten, zeitlich nicht synchronen Montageteilsystemen auftreten; oder es können zu hohe Umlaufbestände entstehen, wenn innerhalb der Linie partiell vorgearbeitet wird, das Material wartet dann auf die Weiterbearbeitung (vgl. Meran et al. 2013, S.196). Neben diesen beiden Ausprägungen, die sich auf den WIP-Bestand<sup>17</sup> beziehen, ist eine weitere Ausprägung zu hoher Bestände die Bereitstellung des zu montierenden Materials in hoher Stückzahl. Ursache hierfür können z.B. lange interne oder externe Wiederbeschaffungszeiten sein.

Je höher der Bestandswert, desto höher ist die Kapitalbindung und damit auch die Verschwendung.<sup>18</sup> Der Bestandswert ist das Produkt aus der Menge mal dem Einstandspreis (vgl. Nieß 1996, S.63). Die Dimension eines Bestands wird alternativ

---

<sup>16</sup> Der standardisierte Puffer bezeichnet den Mindestbestand an der Linie, der für den Einzelstückfluss notwendig ist. Er wird u.a. zur Vermeidung von Wartezeiten bei der Übergabe des Werkstücks an den nachfolgenden Montagemitarbeiter verwendet (vgl. Takeda 2008, S.196).

<sup>17</sup> WIP bedeutet „work in process“, übersetzt „Ware in Arbeit“, auch Halbfertigware genannt, bezeichnet Artikel zwischen Verarbeitungsschritten (Tautrim 2015, S.195). Herrmann (2009, S.230) bezeichnet auch nicht eingelagerte Fertigware als WIP-Bestand.

<sup>18</sup> folgt aus der Formel für die Kapitalbindung, die Kapitalbindungskosten berechnen sich aus dem Bestandswert multipliziert mit Lagerzeit und Zinssatz (vgl. Preißler 2008, S. 187)

zum Bestandwert auch in der Bestandsreichweite ausgedrückt. Die Lagerdauer bzw. Lagerreichweite gibt an, wie lange die Produktion aus dem Lagerbestand aufrechterhalten werden kann (Preißler 2008, S. 183).

Verschwendung durch Wartezeiten entsteht durch Verzögerungen im Arbeitsablauf (Meran et al. 2013, S. 196). Eine Verzögerung im Arbeitsablauf entsteht entweder durch Warten auf das Werkstück, das Warten auf Material oder durch das Eintreten von Störungen (vgl. Deuse 2012 in Anlehnung an REFA).

Das Warten auf das Werkstück kann zum einen durch unzureichende Planung der auszuführenden Montagetätigkeiten eines MA entstehen. Der MA wartet auf das Werkstück, das sich entweder noch beim vorgelagerten Montagearbeiter befindet oder er wartet auf die Fertigstellung automatisierter Prozesse durch eine Maschine. Die planerische ungleiche Verteilung der Montagetätigkeiten auf die Ressourcen bezeichnet Erlach (2010, S.99) als Abtaktungsverlust (vgl. Teufel 2006, S. 682). Zum anderen können in der Praxis Wartezeiten durch Abweichungen vom Plan entstehen. Das Warten auf das Werkstück wird u.a. durch heterogene Montageleistungen der MA verursacht, z.B. ausgelöst durch unterschiedliche Qualifikationsgrade der MA. Schwankende Ist-Zeiten der Bearbeitungsschritte führen zu Taktzeitverlust, da die Übergabe des Werkstücks in diesem Fall zeitlich nicht synchron erfolgen kann. Deshalb führt ein erhöhter Personaleinsatz in flexiblen Fließmontagen zu erhöhtem Taktzeitverlust und Wartezeiten, die Produktivität pro Kopf sinkt.

Wartezeiten entstehen auch durch das Warten auf zu montierendes Material, das entweder noch nicht bereitgestellt wurde oder in schlechter Qualität vorliegt und nachgeschoben werden muss.

Eine weitere Ausprägung von Verschwendung durch Warten sind Störungen wie beispielsweise der Ausfall einer Maschine, der bewirkt, dass die Montagearbeitskräfte durch die verketteten Prozesse im Montagesystem nicht mehr ihre manuellen Montagetätigkeiten ausführen können. Auch andere Ursachen wie instabile Prozesse und Qualitätsprobleme können das Anhalten der Linie verursachen. Setzt

man die Produktivzeit eines Mitarbeiters ins Verhältnis zur verfügbaren Zeit, so ergibt sich die Auslastung als Indikator für Verschwendung durch Wartezeiten.<sup>19</sup>

Ohno's Miteinbeziehung der Verschwendungsart Transporte verdeutlicht, dass die reine Veränderung des Ortes nicht als wertschöpfende Arbeit zu bezeichnen ist (1993, S. 46). Transporte innerhalb eines Montagesystems sind Bewegungen des Systemelements Material. Takeda zählt für den Montagearbeiter das Heranschaffen von Teilen zu der Art von Verschwendung, die sofort zu eliminieren ist (katakana muda, s. das Ebenenmodell von Takeda 2006, S.154). Er trennt Haupt- und Nebentätigkeiten, hier also Montagetätigkeiten von logistischen Tätigkeiten wie Teile bzw. Vor- wie Fertigmaterial an- und abtransportieren (Takeda 2006, S. 62). Freibichler greift diesen Ansatz auf und bilanziert, dass durch Trennung von Montage- und Logistiktätigkeiten diese Form der Verschwendung so gering wie möglich zu halten ist (Freibichler et al. 2013, S. 33). Ausprägungen in der Montage sind weite Wege zwischen Lager- und Bereitstellort, die Mehrfachhandhabung von Material sowie ein ungünstiges Montagelayout und das damit ungünstige Logistikkonzept. Ursachen einer unzureichenden logistischen Versorgung von Montagelinien können die Anwendung falscher Bevorratungsstrategien sein oder auch die Anwendung unpassender Behältergrößen je bereitzustellendes Material.

Verschwendung durch Bewegung stellen unnötige Bewegungsabläufe der MA dar. Meran (et al. 2013, S.196) bezeichnet diese Verschwendungsart als Überschuss an Bewegung oder als schlechte Ergonomie. Die Ausprägungen in Fließmontagen können anhand der zu verrichtenden Bewegungen und deren Zweck eingeteilt werden. Beim manuellen Montageprozess greift der Werker nach dem zu fügenden Material. Ist dieses zu weit vom Fügepunkt entfernt oder müssen die Teile aufwendig vereinzelt, abgezählt oder schwer gehoben werden, spricht man von Verschwendung durch Bewegung. Weitere Ausprägungen von Verschwendung

---

<sup>19</sup> Matevska definiert die Auslastung als Prozentanteil der aktiven Zeiten von der Gesamtlaufzeit einer Ressource (2010, S.46).

durch Bewegung liegen vor, wenn das zu fügende Material vor dem Fügen ausgerichtet werden oder aufwendig zum Fügepunkt transportiert werden muss. Häufig werden auch nicht beide Hände zur Verrichtung der Montagetätigkeiten genutzt. Manuell zu verrichtende Bewegungen des Werkstücks wie Vorschub und Ausrichtungsveränderungen sind weitere Ausprägungen von Verschwendung durch Bewegung. Alle nicht ergonomischen sowie unnötigen Bewegungen wie Körperdrehungen, das Bücken oder das in die Hocke gehen stellen Verschwendung dar und erzeugen zusätzliche physische Belastungen für den Mitarbeiter.

„Die Verschwendung innerhalb der Bearbeitung betrifft unmittelbar die technologische Güte der Produktionsprozesse“ (Erlach 2010, S.110). Abweichend zu Erlach, der sowohl die Prozesse des Werkers als auch die automatisierten Prozesse miteinbezieht, bezieht sich Teufel ausschließlich auf die technische Ausstattung der Maschinen (vgl. Teufel 2009, S. 682). Yagyu definiert die Verschwendung bei der Bearbeitung als eine Bearbeitung am Produkt, die aus Kundensicht keinen Mehrwert leistet (Yagyu et al. 2013). Meran verwendet die englische Übersetzung „Over-processing“: Verschwendung liegt dann vor, wenn mehr Wertschöpfung geleistet wird als der Kunde bereit ist, zu zahlen (Meran et al. 2013, S. 196).

Ausprägungen dieser Verschwendungsart lassen sich gemäß den Definitionen zusammenfassend in die maschinelle und manuelle Bearbeitung im Zusammenhang mit den Betriebsmitteln einteilen. Als Verschwendung innerhalb der Bearbeitung bezeichnet man überdimensionierte Maschinen, die ein Mehrfaches an Produkten während des Kundentakts bearbeiten können. Der falsche Automatisierungsgrad<sup>20</sup> im Sinne von nicht genutztem Automatisierungspotenzial verschwendet Ressourcen (s. Schlenkhoff 2012, S.25), bei zu geringer Automatisierung werden Rationalisierungspotenziale nicht genutzt, bei zu hohem Automatisierungsgrad entsteht eine hohe Kapitalbindung und die Gefahr negativer

---

<sup>20</sup> Der Anteil, den die automatisierten Funktionen an der Gesamtfunktion eines Produktionssystems haben, wird als Automatisierungsgrad bezeichnet (DIN 19233)

Deckungsbeiträge durch hohe Abschreibungen. Betrachtet man die technische Auslegung von Maschinen, sind leere Vorschub- und Rückwege Ausprägungen von Verschwendung sowie die geringe technische Verfügbarkeit<sup>21</sup> von Maschinen, bedingt durch lange Rüst- und Vorbereitungszeiten oder Prozessinstabilitäten. Zieht man die manuellen Prozesse im Umgang mit den technischen Betriebsmitteln in Betracht, sind fehlende oder ungeeignete Vorrichtungen oder das Fehlen von definierten Aufbewahrungsorten von Werkzeugen weitere Ausprägungen. Fehlende oder ungeeignete Werkstückträger zählen ebenso zur Verschwendung, verursacht durch Ausrichtungswechsel, aufwendiges Umgreifen oder das Fixieren von Hand.

Verschwendung durch defekte Produkte (Nacharbeit und Ausschuss) bezeichnet Erlach (2010, S.110) als kritischste Tätigkeit, da die gesamte Wertschöpfung vernichtet wird, wenn Schlechteile produziert werden. Werden defekte Produkte als solche nicht bemerkt, wird weitere Wertschöpfung bei der Ausführung von Folgeprozessen vernichtet. Ausprägungen dieser Art der Verschwendung sind nicht beherrschte Montageprozesse, verursacht durch z.B. Mitarbeiterüberlastung, unzureichend definierte Arbeitsinhalte oder durch falsche Einstellung von Vorrichtungen und Maschinen. Ansätze zur Stabilisierung von Prozessbeherrschung sind Poka Yoke<sup>22</sup> oder Six Sigma.<sup>23</sup> Werden diese Ansätze bei kritischen Montageprozessen wie beispielsweise dem Stecken von Kabelverbindungen oder beim Picken ähnlicher Teile nicht angewandt, so ist das Auftreten von defekten Produkten die Folge.

---

<sup>21</sup> vgl. hierzu die VDI-Richtlinie 3423

<sup>22</sup> physische Vorkehrungen zur Verhinderung von Flüchtigkeitsfehlern (vgl. Yagyu 2011, S.75)

<sup>23</sup> Knowles (2011, S.13) definiert Six Sigma u.a. als „A Measure: A statistical definition of how far a process deviates from perfection. A Target: 3.4 defects per million opportunities. [...]“



Zusammenfassend zeigen Abbildung 9 und 10 die Verschwendungsausprägungen und deren Ursache-Wirkungs-Beziehungen in getakteten Fließmontagen.

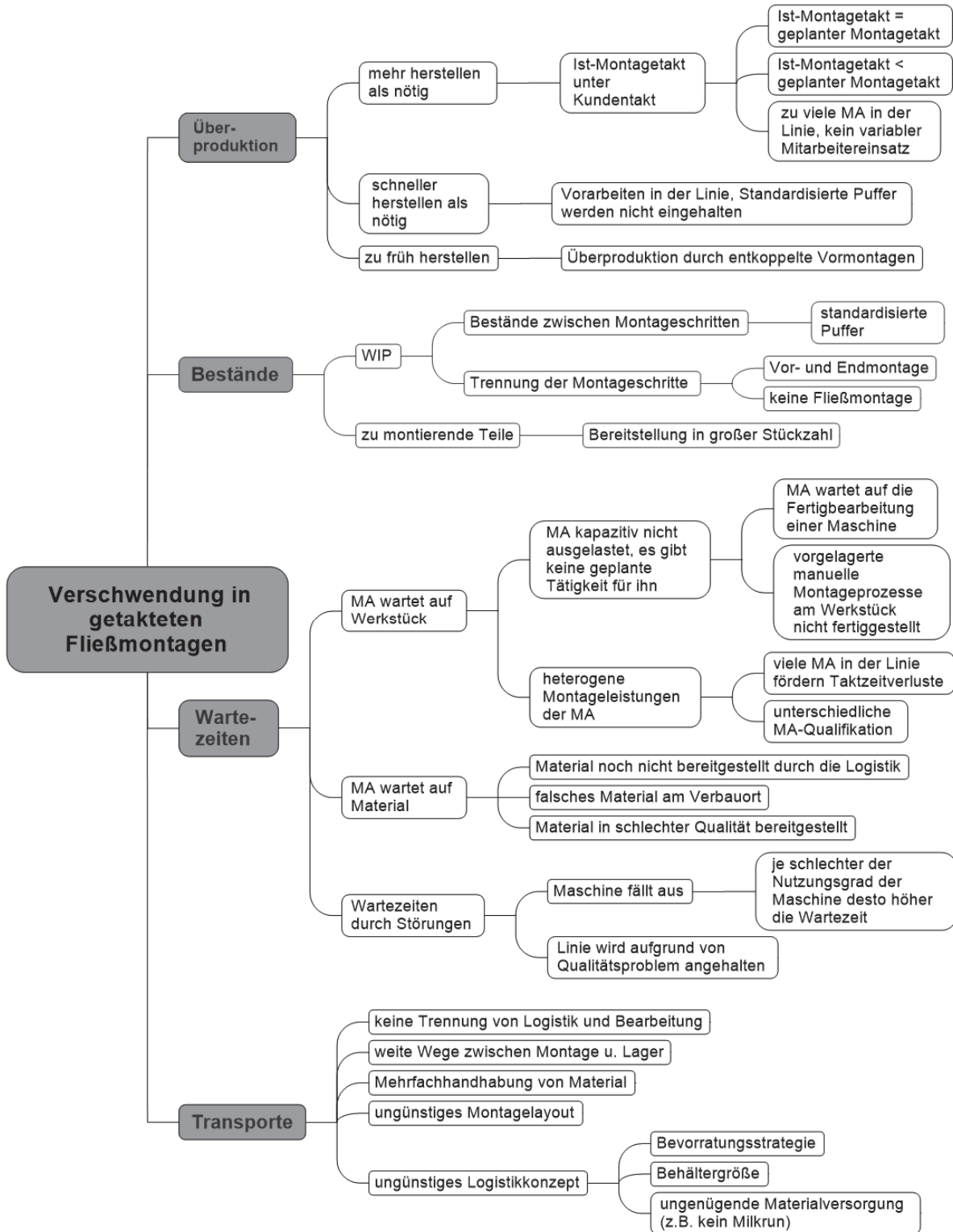


Abbildung 9: Verschwendungsausprägungen in Fließmontagen

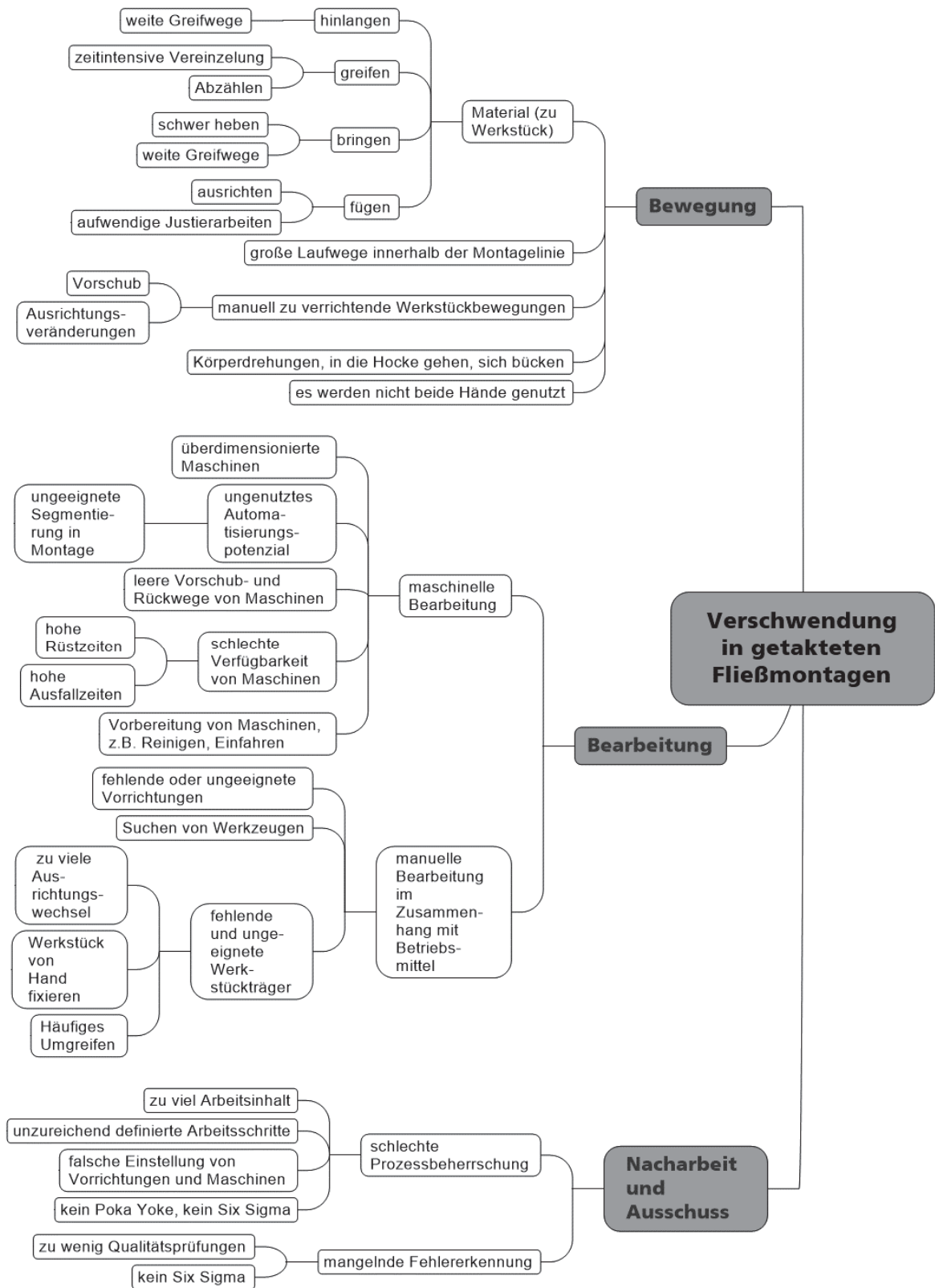


Abbildung 10: Fortsetzung Verschwendungsausprägungen in Fließmontagen

Nach Definition und Charakterisierung des Begriffs Verschwendung in Bezug auf Montagesysteme ist in diesem Kontext die Kategorisierung wertschöpfender und nicht wertschöpfender Montageprozesse zu betrachten, da ein wesentlicher Bestandteil der Verschwendungsreduzierung die Eliminierung nicht wertschöpfender Montageprozesse ist. Picker bezeichnet die Primärzeit als den Zeitanteil für alle beabsichtigten Veränderungen am Produkt und definiert die dazugehörigen Abläufe als wertschöpfende Tätigkeiten (Picker 2006, S. 52). Zeitdaten für nicht wertschöpfende Tätigkeiten werden als Sekundärzeit bezeichnet. Analog der Bezeichnung von Primär- und Sekundärzeit unterteilt Jonas die in Abbildung 7 dargestellten Funktionen der Montage in primäre und sekundäre Montagefunktionen, indem das Fügen als primäre – also wertschöpfende – Funktion und das Handhaben, Kontrollieren, Justieren sowie die Sonderfunktionen als sekundäre – und damit nicht wertschöpfende – Montagefunktionen bezeichnet werden (vgl. Jonas 2000, S.7). Es existieren unterschiedliche Ansätze bezüglich einer Teilebewegung zum Fügepunkt. Nach Jonas liegt hier ein nicht wertschöpfender Prozess vor, Lotter definiert dagegen einen solchen Handhabungsprozess als wertschöpfend, wenn eine minimale Bewegungslänge eingehalten wird. Das Überschreiten dieses Werts erzeugt nach Lotter (et al. 2002, S. 36) Sekundäraufwand. Es sollen in dieser Arbeit ausschließlich Fügeprozesse als wertschöpfend bezeichnet werden, damit nicht wertschöpfende Prozesse als solche erkannt bleiben. Ein gemäß der Betrachtungen Lotters wegeoptimiertes Bringen des Montageteils an den Fügeort wird demnach analog Jonas als nicht wertschöpfend bezeichnet. Im Fall des wegeoptimierten Bringens wird der Vorgang als verschwendungsminimal bezeichnet.

### **2.3 Die Ablaufstruktur der klassischen Montageplanung**

Planung ist nach REFA die gedankliche Vorwegnahme einer zielgerichteten aktiven Zukunftsgestaltung. Sie beinhaltet das systematische Suchen und Festlegen von Zielen sowie Aufgaben und Mitteln zum Erreichen der Ziele (REFA 1985b). Nach

Grunwald (2002, S.11) hat die Montageplanung die Aufgabe, Montageanlagen und –abläufe zu entwerfen, mit denen der Zusammenbau von Teilen oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen möglich ist. Pawellek (2014, S.237-338) unterscheidet innerhalb der Fabrikplanung die Phasen Strategie-, Struktur-, System- und Ausführungsplanung, wobei er die Montageplanung der Systemplanung zuordnet. Aufgabe der Systemplanung ist die wirtschaftliche Gestaltung von Funktionssystemen. Die Montageplanung ist als komplexer und mehrstufiger Vorgang zu betrachten, der aus funktionaler Sicht ein Teilgebiet der Arbeitsvorbereitung ist (Eversheim 2002, S.57; vgl. Westkämper 2006, S. 153-155 und Motzer 2015, S.10).

Der Begriff der Montageplanung wird in dieser Arbeit synonym zum Begriff Montageplanungsverfahren verwendet. Ein Verfahren ist nach der DIN-Norm 19226 das Zusammenwirken von Methoden zu einem durchgängigen Algorithmus.<sup>24</sup> Pawellek (2014, vgl. S.66) verwendet in diesem Zusammenhang den Begriff der Planungssystematik und bezeichnet den Planungsablauf mit seinen hierarchischen Elementen Planungsphase, -schritt und –teilschritt sowie –baustein als eine geeignete Darstellungsform der Systematik.

Es existieren in der Literatur mehrere, in der Folge als „klassisch“ bezeichnete Verfahren zur Planung von Montagesystemen, die sich sowohl inhaltlich hinsichtlich des Vorgehens und des Detailgrads als auch hinsichtlich der Begrifflichkeiten und der Aggregation von Planungsschritten unterscheiden. Im Folgenden wird eine Auswahl von Quellen mit der Zielsetzung getroffen, eine breite Übersicht über die wichtigsten Planungsphasen und Planungsschritte zu geben, um später den Betrachtungsbereich auf die Aufgabenstellung der Planung verschwundungsarmer getakteter Fließmontagen eingrenzen zu können. Dabei werden bewusst auch Verfahren untersucht, die sich nicht auf die Planung der in dieser Arbeit im Fokus stehenden getakteten Fließmontagen beschränken. Die Analyse der Ablaufstruktur

---

<sup>24</sup> „Ein Algorithmus ist ein Verfahren mit einer präzisen [...] endlichen Beschreibung unter Verwendung effektiver [...] Verarbeitungsschritte“ (Broy 1998, S.31)

erfolgt auf Basis der Verfahren nach Bullinger, Holle, Konold und Hartel (vgl. Bullinger 1986, Holle 2002, Konold et al. 2003 und Hartel 2012) mit punktueller Ergänzung weiterer Quellen.

### **Phase 1: Anforderungsanalyse**

Die Initialphase der Planung nennt Konold „Aufgabenstellung“, Hartel bezeichnet sie als Anforderungsliste und Bullinger eröffnet mit den beiden Phasen „Projektorganisation und „Konzeption“. Es lässt sich erkennen, dass bei unterschiedlicher verwendeter Terminologie die Verfahren inhaltlich mit der Analyse der Anforderungen beginnen (vgl. auch Petzelt 2010, S.28). Unterteilt man die Phase der Anforderungsanalyse weiter, sind 3 wesentliche Planungsschritte zu unterscheiden: die Analyse der Anforderungen beinhaltet die genaue Spezifikation der Aufgabenstellung, die Ermittlung verfügbarer Plandaten und die Schaffung eines Zielsystems.

Die Planungsaufgabe umfasst die Beschreibung der durch das zu entwerfende Montagesystem erfüllenden Aufgabe und enthält Informationen der zu montierenden Produktgruppen, der Termine und der Stückzahlen sowie das verfügbare Investitionsvolumen (vgl. Hartel 2012, Petzelt 2010, Konold et al. 2003). Die hierfür relevanten Daten der Planung werden im zweiten Planungsschritt zusammengetragen. Es sind produkt-, produktions- und personalspezifische Daten zu unterscheiden. Erstere umfassen Zeichnungen, Stücklisten oder Musterteile der Produkte sowie Informationen zur Gliederung der Erzeugnisse sowie der Typen- und Variantenbildung. Die Produktion betreffende Informationen umfassen u.a. die aktuelle Ist-Situation mit Beschreibung der verfügbaren Maschinen und Betriebsmittel, je nach Neu-, Um- oder Änderungsplanung. Stückzahlentwicklungen sowie Qualitätsdaten wie Ausschuss und Nacharbeit oder Fehlerarten und -häufigkeiten sind von Relevanz. Zu den produktionsrelevanten Daten gehört auch die Abgrenzung gegenüber anderen Produktionseinrichtungen oder den logistischen Versorgungsprozessen, um den Betrachtungsrahmen exakt definiert zu haben. Weitere wichtige Planungsgrößen stellen die zur Verfügung stehende Fläche

dar und die Vorgabezeiten<sup>25</sup> des Gesamtsystems. Das Personal betreffende Daten sind verfügbare Mitarbeiter, deren Qualifikation und Kosten sowie die Arbeitszeitregelungen und die vorhandenen Schichtmodelle (vgl. Hartel 2012, Bullinger 1986, Konold et al. 2003).

Auf Basis der ersten beiden Planungsschritte erfolgt die Definition eines Zielsystems, damit ein Messen der Planungsergebnisse und ein Bewerten hinsichtlich der Zielerreichung ermöglicht wird (vgl. Bullinger 1986, S. 62). Es sind sach- und personenbezogene Zielkriterien auszuwählen, die entweder qualitativ oder quantitativ bewertet werden können. Eine Gewichtung kann entweder nach Unterscheidung von Muss-, Soll- oder Wunschkriterien erfolgen oder sie kann weiter detailliert werden durch das Gewichten unterschiedlicher Ziele, je nachdem, ob komplementäre, konkurrierende oder indifferente Ziele existieren (vgl. Slama 2004, S. 174).

### **Phase 2: Montagegerechte Produktgestaltung**

Nach Dubbel standardisiert die montagegerechte Produktgestaltung weitgehend das Fügeverhalten, Handhabungskinetiken, Bereitstellungsarten, Bauteile und Baugruppen sowie Fügereihenfolgen (vgl. Dubbel 2014, S. 122). Es werden die 3 Planungsschritte der Gestaltung des Einzelteils, die Gestaltung der Verbindungen und weitere Ansätze zur Optimierung des Montageablaufs unterschieden (vgl. Konold et al. 2003, Bullinger 1986 und Holle 2002).

Die Form der Einzelteile sollte so gestaltet sein, dass ein Verhaken ineinander bei der Bereitstellung verhindert wird. Generell sollten Einzelteile wenn möglich zusammengefasst werden, um Montageaufwand zu sparen. Das Zusammensetzen von Komponenten kann durch konstruktive Maßnahmen wie z.B. die Integration von Zentrierabsätzen unterstützt werden (vgl. Konold et al. 2003, S. 17).

---

<sup>25</sup> Die Vorgabezeit ist die Sollzeit für die Dauer von Arbeitsabläufen, die von Menschen oder Betriebsmitteln ausgeführt werden (vgl. Meinberg et al., S.481)

Baugruppen sollten so gestaltet werden, dass keine zusätzlichen Verbindungsteile verwendet werden und die Anzahl der Fügeflächen so gering wie möglich ist. Die Mehrfachverwendbarkeit bei der Gestaltung von prüfbar Baugruppen ist bei der Montage von Vorteil, um Skaleneffekte nutzen zu können (vgl. Konold et al. 2003, S. 17 und Bullinger 1986, S. 92).

Weitere Optimierungen hinsichtlich des Montageablaufs sind die Gestaltung einheitlicher Fügerichtungen, die Verwendung von Standards in Form von Gleichteilen und ähnlichen Fügeprozessen oder auch die Möglichkeit der späten Variantenbildung in der Montage (vgl. Holle 2002).

In Phase 2 sind somit alle Tätigkeiten zusammengefasst, die eine veränderte Gestaltung des Erzeugnisses zum Zweck der Optimierung des Montageprozesses analysiert.

### **Phase 3: Montageablaufplanung**

Innerhalb der Montageablaufplanung wird festgelegt, wann welche Arbeitsvorgänge mit welchem Einzelteil oder welcher Baugruppe ausgeführt werden (vgl. Görz et al. 2003). Der Montageablauf versteht sich als die Gesamtheit einzelner Montagevorgänge zur Erfüllung der Montageaufgabe. Montagevorgänge können hierbei Füge- und Handhabungsvorgänge, Hilfs- und Kontrollvorgänge sein (vgl. Grunwald 2002, S.11). Abweichend zur Definition Bullingers, der innerhalb der Ablaufplanung die Aufgabe der Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Arbeitsplätzen integriert, konzentriert sich hier der Begriff auf die zeitliche Aufeinanderfolge von Teilaufgaben der Montage, die zur Erfüllung der Gesamtaufgabe notwendig sind (vgl. Bullinger 1986, S. 88). Bullinger bezeichnet die Fokussierung auf die zeitliche Aufeinanderfolge stattdessen als Montageablaufstruktur (Bullinger 1986, S. 94). Damit konzentriert sich die Planungsphase 3 in der gewählten Darstellung auf den Zusammenhang Montageprodukt zu Montageprozess. Die Betrachtung des physischen Montagesystems erfolgt zu einem späteren Planungszeitpunkt.

Mit Fokussierung auf den Zusammenhang Montageprodukt zu Montageprozess bleiben nach Bullinger (1986, s. Kapitel 3.2 und 3.3) 3 Planungsschritte, die die

Montageablaufplanung umfassen: die Strukturierung des Erzeugnisses, die Strukturierung des Montageablaufs und der Ermittlung der Montagezeiten.

Die Erzeugnisstruktur beschreibt die Zusammensetzung eines Erzeugnisses aus Baugruppen, Einzelteilen und eventuell Rohstoffen. Eine Baugruppe ist in diesem Zusammenhang ein in sich geschlossener, aus 2 oder mehreren Bauteilen bestehender Gegenstand (DIN 6789). Ziel der Strukturierung der Erzeugnisse ist nach Bullinger (1986, S. 89) die Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Ähnlichkeitsbildung von Baugruppen. Die Strukturierung der Erzeugnisse kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen, z.B. Mehrfachverwendbarkeit oder Automatisierbarkeit der Baugruppenfertigung (Bullinger 1986, S. 92-93). Ergebnis der Erzeugnisstrukturierung sind produktspezifische Strukturbäume, die in mehreren Montageebenen je nach Komplexität die Zuordnung von Einzelteilen zu Unterbau- bzw. Baugruppen und deren Zuordnung zu Enderzeugnissen darstellt (Westkämper 2006, S.162).

Die Montageablaufstruktur bezieht sich auf ein zu montierendes Erzeugnis und veranschaulicht die Reihenfolge von Teilaufgaben der Montage. Sie basiert auf der Konstruktion des Erzeugnisses. Eine Möglichkeit der Beschreibung produktspezifischer Montageablaufstrukturen ist der Vorranggraph, der die logisch-zeitliche Struktur visualisiert. Die netzplanähnliche Darstellung besteht aus Knoten, die Montageteilaufgaben repräsentieren, und Kanten, die die zeitlichen Bedingungen darstellen, welche Montageaufgabe vor der anderen durchgeführt werden muss. Ein Vorranggraph enthält neben den einschränkenden Reihenfolgebedingungen auch die Freiheitsgrade, in welcher Reihenfolge das Produkt montiert werden kann (vgl. Bullinger 1986, S. 93-94 und Westkämper 2006, S. 163).

Die Ermittlung der Montagezeiten kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Bestehen Erfahrungswerte aus der Montage bereits durchgeführter ähnlicher Baugruppen, können die entsprechenden Vorgabezeiten übernommen bzw. errechnet werden. Bestehen keine Erfahrungswerte, kann die Vorgabezeit geschätzt werden oder bei manuellen Vorgängen durch Systeme vorbestimmter Zeiten wie



REFA oder MTM ermittelt werden. Systeme vorbestimmter Zeiten sind Methoden, mit denen Sollzeiten für das Ausführen von Arbeitsvorgängen bestimmt werden können. Grundlage hierfür ist die Unterteilung der Arbeit in Bewegungselemente, für die vorbestimmte Zeiten verfügbar sind (s. Bullinger 1986, S. 106-112). Durch fundierte Zeitermittlung und systematische Analyse der Prozesse trägt MTM zur Verbesserung der Produktivität und Reduzierung von Verschwendung bei (s. Britzke 2010). Erfahrungsgemäß eignet sich das MTM-UAS-System, das die in der Praxis häufig vorkommenden kombinierten 5 Grundbewegungen Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen zu Grundvorgängen verdichtet. Diese Verdichtung vereinfacht und beschleunigt die Anwendung im Vergleich zu anderen Verfahren (vgl. Lotter et al. 2012, S. 54 ff. und Schlick 2012, S.29).

Die Planung des Montageablaufs kann auf unterschiedlichen Detaillierungsstufen durchgeführt werden. Bullinger führt eine Gliederung der Montageaufgabe in 7 hierarchischen Stufen aus (s. Abbildung 11) und empfiehlt die Planung des Montageablaufs auf Teilverrichtungsebene. Er stellt die Bedingung auf, dass nach einer Teilverrichtung ein definierter Zwischenzustand des Erzeugnisses existiert (vgl. Bullinger 1986, S. 98-100). Konold definiert konform zu Bullinger eine Teilverrichtung als eine Tätigkeit, die sinnvoll nicht weiter unterteilbar ist (Konold et al. 2003, S. 40).

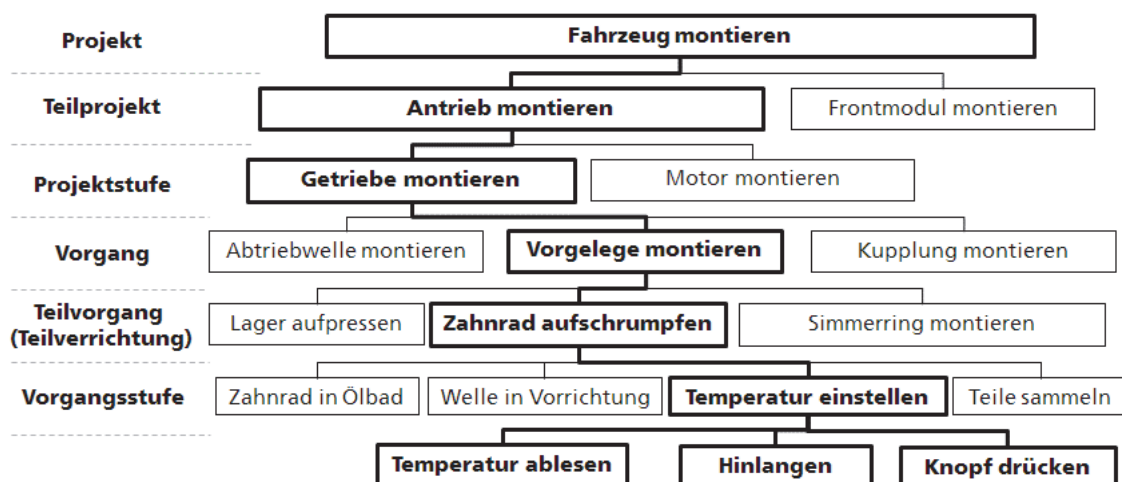


Abbildung 11: Stufen der Aufgabengliederung (i.A.a. Bullinger 1986)

### **Phase 4: Grobplanung des Montagesystems**

Westkämper betont, dass die Grobplanungsphase entscheidenden Einfluss auf die Montagestruktur hat. Kapazitive Betrachtungen sind die Grundlage für diese Phase, es werden Arbeitsabläufe festgelegt, Systemalternativen entwickelt und bewertet (Westkämper et al. 2009, S. 131). Im Folgenden werden die einzelnen Planungsschritte der Grobplanungsphase erläutert.

Im ersten Planungsschritt der Grobplanung wird die Montagestruktur auf der Ebene Gesamtsystem und deren Teilsysteme analog des 7-Stufen-Modells von Westkämper in Anlehnung an das Stuttgarter Unternehmensmodell (vgl. Kapitel 2.1) entworfen. Die Montagestruktur gibt den inneren Aufbau des Montagesystems wieder und besteht aus einer Aufbau- und Verkettungsstruktur. Dabei beschreibt die Aufbaustruktur die Zuordnung von Teilverrichtungen zu den einzelnen Montagestationen sowie die Zusammenfassung von Montagestationen zu übergeordneten Einheiten im Sinne von Teil- und Gesamtsystem. Die Verkettungsstruktur beschreibt die notwendige materialflusstechnische Verknüpfung der Montagestationen (Zeile 1995, S. 20). Konold (et al. 2003, S. 40) bezeichnet die Definition der Montagestruktur als die Bildung von Montageabschnitten. Auf Konold's Aussage bezüglich der Montagestruktur wird hier zurückgegriffen, der erste Planungsschritt enthält die Arbeitsteilung auf Ebene Gesamt- zu Teilsystem, während die Fortführung der Arbeitsteilung auf Ebene Montageabschnitte zu Arbeitsplätze bzw. -stationen im späteren Planungsschritt 4 erfolgt.

Bezüglich der Vorgehensweise zur Bildung der Montagestruktur referenzieren Bullinger und Konold auf die Analyse der Erzeugnisstruktur, indem aus den verschiedenen Vorranggraphen ähnliche Baugruppen bzw. automatisierbare Prozesse identifiziert werden, die zu einer Teilsystemeinheit wie beispielsweise Vor- und Endmontagen zusammengefasst werden können. Die beiden Autoren verweisen hier auf die Kapazitätsteilung und deren Kapazitätsteilungsarten Arbeits-, Mengen- und Baugruppen-/Variantenteilung. Die Planung der Kapazitätsteilung bedeutet die Aufteilung des Kapazitätsbedarfs in Kapazitätsbedarfsteile, sodass jeder Kapazitätsbedarfsteil durch das Kapazitätsangebot eines Arbeitsplatzes bzw.

eines Mitarbeiters gedeckt werden kann (Bullinger 1986, S. 126). Arbeitsteilung bedeutet die Zuteilung eines geringen Arbeitsinhalts pro Arbeitsplatz, dafür eine hohe Bearbeitungsmenge und Wiederholhäufigkeit. Bei einer Mengenteilung werden 2 oder mehrere Montagesysteme parallel angelegt, z.B. wird ein hochautomatisiertes System für die Produktion großer Stückzahlen und ein geringer automatisiertes System für die Produktion der Kleinserien realisiert. Bei der Baugruppen/Variantenteilung werden gemeinsame Produktbaugruppen in einer gemeinsamen Vormontage gefertigt und die Bildung diverser Varianten erfolgt durch Verzweigung in mehrere variantenspezifische Endmontagen (vgl. Konold et al. 2003, S. 40-41). Die Arbeit von Zeile (1995) konkretisiert den Ansatz der Arbeitsteilung durch Anwendung und Berechnung von Distanzen ähnlicher Produkte und Baugruppen, die eine systematische Strukturierung<sup>26</sup> und Zuordnung zu Teilsystemen der Montage ermöglichen.

Der zweite Planungsschritt der Grobplanung ist die Kalkulation der Taktzeiten der einzelnen Teilsysteme der Montage. Die Taktzeitberechnung erfolgt nach der Ermittlung von Teilsystemen, da der jeweilige Takt von der Zusammenfassung verschiedener Produkte und deren Stückzahlen abhängig ist<sup>27</sup>. Es wird zwischen Kunden- und Montagetakts unterschieden. Der Kundentakt gibt an, in welcher Zeit ein Erzeugnis produziert werden muss, damit der Kundenbedarf gedeckt ist (Vollmer 2009, S. 149). Er berechnet sich aus dem Quotienten der zur Verfügung stehenden Fertigungszeit und der Kundennachfrage (vgl. Kapitel 2.2). Der Montagetakts ist die Taktzeit<sup>28</sup>, die technisch innerhalb eines Montagesystems umgesetzt wird, sie ist definiert als die Zeit, in der jeweils eine Mengeneinheit fertiggestellt wird, damit das Fließsystem die Soll-Mengenleistung erbringt (vgl. Kapitel 2.2).

---

<sup>26</sup> Zeile bezeichnet die systematische Strukturierung als Clusteranalyse (1995, S. 41)

<sup>27</sup> vgl. Erlachs Ausführungen zur Bildung von Produktfamilien im Zusammenhang mit der Berechnung des Kundentakts (2010, S.45-48)

<sup>28</sup> auch Arbeitstakt oder Takt genannt

Der Montagetakts ist planerisch so auszulegen, dass er möglichst nahe am Kundentakt ist.<sup>29</sup> Auf Basis der Festlegung des Montagetakts können nach Definition der Montageinhalte und deren Montagesollzeiten die Anzahl Takte aus dem Quotienten der Summe der Sollzeiten aller Teilverrichtungen und dem Montagetakts berechnet werden (vgl. Papendieck 2011, S.83).

Der dritte Planungsschritt der Grobplanung beinhaltet die Festlegung des Automatisierungsgrads. Der Automatisierungsgrad beschreibt den Anteil, den die automatisierten Funktionen eines Montagesystems an der Gesamtfunktion haben (Bullinger 1986, S. 273). Lotter ordnet die Automatisierung als Gestaltungsaspekt der technischen Rationalisierung ein (Lotter et al. 2012, S.5).<sup>30</sup>

Planungsschritt 4 umfasst die Festlegung der Montagestruktur auf Arbeitsplatzebene. Innerhalb dieses Schritts erfolgt die Zuordnung der einzelnen Teilverrichtungen zu Arbeitsplätzen bzw. -stationen. Planungsschritt 4 stellt die Fortführung der Arbeitsteilung auf Ebene Gesamt- zu Teilsystem in Planungsschritt 1 dar (vgl. Zeile 1995 und Konold et al. 2003).

Im fünften Planungsschritt der Grobplanung des Montagesystems werden die Verkettungen der einzelnen Arbeitsstationen geplant, z.B. die Verkettung durch automatischen Werkstückträgertransport. Ebenso enthält dieser Planungsschritt die Auswahl der prinzipiellen Anordnung der einzelnen Montagestationen zueinander bzw. das Groblayout. Nach Pawellek wird bei der Planung des Layouts<sup>31</sup> das in der Materialflussanalyse ermittelte ideale Anordnungssystem der einzelnen Bereiche zueinander zusammen mit den Ergebnissen der Soll-Flächenermittlung in ein optimiertes reales Bezugsschema umgesetzt (Pawellek 2014, S. 182).

---

<sup>29</sup> Erlach relativiert die weit verbreitete Forderung des Produzierens im Kundentakt (vgl. Vollmer 2009, Takeda 2006, Liker 2006, Tautrim 2015), indem er auf Kundenbedarfsschwankungen eingeht.

<sup>30</sup> Rationalisierung bedeutet wörtlich „vernünftig gestalten“ (Luczak et al. 2004, S.1)

<sup>31</sup> Pawellek verwendet in diesem Kontext den Begriff „Layout im Vorentwurf“, verwendet aber fortführend den Begriff „Groblayout“ in weiteren Ausführungen synonym.

Der sechste Planungsschritt umfasst die Bildung der Arbeitsinhalte. Der Arbeitsinhalt eines Mitarbeiters setzt sich aus den Arbeitsaufgaben bzw. Teilverrichtungen zusammen, die aus der Kapazitätsteilung entstehen und den sogenannten Umfeldaufgaben, die auf Basis von bestimmten Ausführungsbedingungen entstehen (Bullinger 1986, S. 135). Bullinger (1986, S. 137) und Lotter (et al. 2012, S. 49) unterscheiden folgende Tätigkeitsarten als Teil des Arbeitsinhalts:<sup>32</sup>

- direkt produktive Tätigkeiten, Haupttätigkeiten, also Tätigkeiten direkt am Produkt, auch als Primärvorgänge bezeichnet, wertschöpfende Prozesse (z.B. Greifen, Einlegen oder Schrauben von Teilen)
- indirekt produktive Tätigkeiten, Nebentätigkeiten oder Sekundärvorgänge, Prozesse ohne Wertschöpfungsanteil (z.B. Weitertransportieren, Wenden, Ablegen von Teilen)

Die wertschöpfenden Tätigkeiten sind der Kapazitätsteilung zugeordnet. Die nicht wertschöpfenden Tätigkeiten resultieren unter anderem auch aus der Gestaltung des Umfelds wie beispielsweise der prinzipiellen Anordnung von Arbeitsstationen bzw. Arbeitsplätze in Planungsschritt 5 (vgl. Bullinger 1986, S.137). Bullinger koppelt im Planungsablauf deshalb die Kapazitätsteilung eng an die Entwicklung von Montageabschnitten und Prinzipianordnungen, was hier den Schritten 4, 5 und 6 entspricht (vgl. Bullinger 1986, S.130).

Zur gleichmäßigen Verteilung der Teilverrichtungen auf Takte bzw. Arbeitsstationen oder Mitarbeiter eignet sich das Taktzeitdiagramm (engl. Operator-balance-chart bzw. -board). Diese Form der Darstellung ermöglicht ein Angleichen der Arbeitsinhalte an die durch den Takt bestimmten einzelnen Ressourcen wie Stationen oder Mitarbeiter. Diese Art der Arbeitsteilung wird als Abtaktung<sup>33</sup> (engl. Line Balancing) bezeichnet. Sie findet ihre Anwendung auch in der Methodik des

---

<sup>32</sup> vgl. hierzu die Ausführungen von Primär- und Sekundärzeit sowie primären und sekundären Montagefunktionen in Kapitel 2.2

<sup>33</sup> vgl. Dombrowski et al. 2015, S.316

Wertstromdesigns (vgl. Tautrim 2015, S. 190; Kletti et al. 2015, S.84 ff.; Duggan 2012, S. 81 ff.).

Die Bereitstellungsplanung ist der siebte und letzte der Grobplanung des Montagesystems zugeteilte Planungsschritt. Ziel der Materialbereitstellungsplanung ist es, den Materialfluss für Montageteile optimal zu gestalten. Zu erarbeitende Planungsergebnisse sind nach Bullinger (1986, S. 174 und S. 185):

- der Materialbereitstellungsablauf (z.B. An- und Ablieferorte, Anlieferfrequenz oder Bereitstellmenge)
- Bereitstelllager (z.B. Materialanordnung im Lager, Flächenbedarf oder Entnahmeprinzip)
- Bereitstellhilfsmittel (z.B. Transportmittel, Behälter, Hebehilfen oder Werkstückträger)

Mit der in Kapitel 2.1 definierten Abgrenzung des Betrachtungsrahmens eines Montagesystems konzentriert sich die Planung der Bereitstellung auf den Bereitstellungspunkt und damit auf den Verpackungszustand der Montageteile nach Anlieferung an die Montage. Es sind folglich die Anlieferbehälter, deren Bereitstellungsmengen und deren Reichweiten je Montageteil relevant. Die Reichweite definiert sich als Quotient aus momentanem Bestand eines Artikels und dem momentanen Verbrauch (Heidenblut et al. 2006, S.191). Es werden nach Röhrig und Lotter 6 Bereitstellungsstrategien unterschieden, die den Anlieferungszustand an die Montage charakterisieren:

- artikelweise: direkte Bereitstellung des Anliefergebundes in der Montage (z.B. auf Europalette)
- auftragsweise: Kommissionieren der Montageteile zum Auftrag
- Kanban: Bereitstellung in sortenreinen Behältern
- Set-weise: Montageteile je Station werden innerhalb eines Behälters bereitgestellt

- Handlager: verbrauchsgesteuerte auftragsneutrale Bereitstellung in Standardmengen und Standardbehältern, der Mitarbeiter holt sich die Montageteile aus dem Lager (vgl. Röhrig 2002 und Lotter et al. 2012, S. 296).

### **Phase 5: Feinplanung**

Die Feinplanung ist nach Westkämper die detaillierte Ausarbeitung der Groblayouts (Westkämper et al. 2009, S. 131), Konold (et al. 2003, S. 64) versteht unter anderem die detaillierte Ausarbeitung des Gesamtsystems sowie deren Teilsysteme darunter. Die Feinplanung lässt sich in 2 Planungsschritte einteilen: die ergonomische Gestaltung manueller Arbeitsstationen und die technische Gestaltung automatischer Stationen.<sup>34</sup>

Bei der Gestaltung manueller Arbeitsstationen ist eine möglichst gleichmäßige Auslastung aller Arbeitsstationen anzustreben, um Taktverluste zu vermeiden (vgl. die Verschwendungsarten in Kapitel 2.2; Konold et al. 2003, S. 64). Die ergonomische Gestaltung der Arbeitsstationen fördert das methodisch richtige und ermüdungsarme Arbeiten, deshalb sollten Arbeitshöhe, Sitzhöhe sowie der Greif- und Sehbereich nach den entsprechenden wissenschaftlichen Erkenntnissen an die Körpermaße des Mitarbeiters angepasst sein (Konold et al. 2003, S. 122). Bullinger gliedert die Gestaltung von manuellen Arbeitsplätzen in 3 wesentliche Schritte: die detaillierte Gestaltung des organisatorischen Ablaufs, darauf folgend die technische Gestaltung der für die Teilverrichtungen notwendigen Betriebsmittel und abschließend deren Anordnung im Raum oder im Layout.

Die technische Gestaltung automatischer Arbeitsstationen kann unter Beachtung einiger Spezifika nach den Methoden der Konstruktionssystematik erfolgen. Bullinger nennt 5 Teilschritte zur systematischen Konzipierung technischer Lösungen für die automatisierte Montage: nach der Formulierung der Montageaufgabe (Teilschritt 1) erfolgt die Analyse hinsichtlich Verbau-Reihenfolge und Funktionsstruktur, d.h. der zu automatisierende Montageprozess wird in einzelne Montagefunktionen

---

<sup>34</sup> Lotter (et al. 2012, S. 366) definiert die Feinplanung als detaillierte Planung der Subsysteme aus technischer und ergonomischer Sicht.

nach Abbildung 7 aufgeteilt (Teilschritt 2). In einem weiteren Schritt (Teilschritt 3) werden prinzipielle Lösungen für die einzelnen Montagefunktionen erarbeitet. Es werden auf Basis der Prinziplösungen Gesamtlösungen entworfen (Teilschritt 4), bewertet (Teilschritt 5) und ausgewählt (vgl. Bullinger 1986, S. 268-271).

**Phase 6: Realisierung**

Die Planungsschritte dieser Phase zielen auf die Ausführung und Umsetzung des in den Planungsphasen konzipierten Montagesystems. Im Einzelnen bedeutet das nach Bullinger (1986, S. 309 und 331) die Beschaffung der Betriebsmittel, die Durchführung der Personaleinsatzplanung, den physischen Aufbau inklusive Anlauf des Montagesystems und letztendlich den Betrieb.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Planungsphasen und –schritte als Ablaufstruktur der klassischen Planung von getakteten Fließmontagen:

Phase	1. Anforderungsanalyse	2. Montagegerechte Produktgestaltung	3. Montageablaufplanung	4. Grobplanung des Montagesystems	5. Feinplanung des Montagesystems	6. Realisierung
Planungsschritte	1. Planungsaufgabe definieren 2. Planungsdaten ermitteln 3. Zielsystem schaffen	1. Formgebung Einzelteile 2. Verbindungsarten 3. Optimierung Montageablauf	1. Erzeugnisse strukturieren 2. Ermittlung Montageablaufstruktur 3. Montagezeitmittlung	1. Montagestruktur auf Ebene Gesam-/Teilsystem definieren 2. Taktzeit berechnen 3. Automatisierungsgrad festlegen 4. Montagestruktur auf Ebene Arbeitsplätze definieren 5. Arbeitsplätze anordnen und verketteten 6. Arbeitsinhalte bilden 7. Bereitstellung	1. Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung manueller Arbeitsstationen 2. Technische Gestaltung automatischer Arbeitsstationen	1. Bereitstellung Betriebsmittel 2. Personaleinsatzplanung 3. Aufbau und Anlauf 4. Betrieb

**Abbildung 12: Planungsphasen und -schritte (eigene Darstellung nach Bullinger, Zeile, Holle, Konold et al., Slama, Erlach und Hartel)**

Die reale sequenzielle Abarbeitung der einzelnen Planungsphasen und –schritte kann sich je nach Anforderung vom dargestellten Ablauf unterscheiden. Sowohl



Konold wie auch Bullinger weisen auf Prüfmechanismen hin, die während der Planung die Zielerreichung bewerten. Deshalb ist es möglich, dass verschiedene Phasen und Schritte mehrmals durchlaufen werden, um verbesserte Planungsergebnisse zu erzeugen. Besonders innerhalb der Montageablaufplanung und der Grobplanung des Montagesystems (Phase 3 und 4) werden Teilergebnisse erzielt, die voneinander abhängen. Deshalb sind die einzelnen Phasen und Schritte nicht durchgängig als stringente Sequenz zu verstehen, jedoch als logische Abfolge bei Betrachtung der jeweiligen Teilergebnisse und der sukzessiven Entstehung des Gesamtergebnisses.

### **2.4 Einordnung des Verfahrens in die Gestaltung und Beschreibung von Planungsprozessen**

Mit der Zielsetzung der Verschwendungsreduzierung sind Fließmontagen entsprechend des gesamten Zielsystems und den Rahmenbedingungen in einer konkreten Art und Weise zu gestalten. Da es eine Vielzahl von Lösungen gibt, sowohl in der Gestaltung einzelner Elemente als auch im gesamtheitlichen Zusammenwirken der Elemente als Gesamtsystem, ist eine triviale Lösung auszuschließen. Das Verfahren ist so zu konzipieren, dass der Zielzustand des Montagesystems eindeutig definiert ist, es sind deshalb beschreibende Konstrukte<sup>35</sup> zu implementieren. Analog den in Kapitel 2.1 dargestellten Elementen des Montagesystems sind sowohl die Produkte inklusive der einzelnen Teile, die als Teilverrichtungen definierten Montageprozesse und das Montagesystem mit den verschiedenen Teilsystemen, deren Mitarbeiter, Betriebsmittel und Arbeitsplätze zu beschreiben. Ein Modellierungsansatz zur Beschreibung des Montagesystems ist erfahrungsgemäß die geeignete Methodik.

Bei einer Modellierung wird eine vereinfachte Abbildung eines geplanten oder realen Systems (vgl. VDI 3633-1) erstellt. Damit das System gedanklich vollständig

---

<sup>35</sup> siehe die Definition von Braun in Kapitel 1.3

erfassbar gemacht wird, werden die wesentlichen Parameter und Wechselwirkungen eines Systems im Modellierungsprozess berücksichtigt (Westkämper et al. 2013, S. 114). Durch beschreibende Konstrukte innerhalb eines Modells lässt sich der große Lösungsraum in die Gestaltung von Teilelementen des Systems zergliedern. Diese Teilelemente können beispielsweise durch die Auswahl von vordefinierten Systemelementen und deren anschließende Konfiguration dargestellt und zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt werden.

Aus der in Kapitel 1.3 formulierten Forschungsfrage, welche Planungsschritte auszuführen sind, um Verschwendung zu reduzieren, leitet sich eine weitere Charakterisierung des Planungsverfahrens ab. Das Verfahren soll Mechanismen enthalten, die die in Kapitel 2.2 beschriebenen 7 Verschwendungsarten reduziert. Diese Mechanismen sind analysierende Konstrukte hinsichtlich der zu erreichenden Zielsetzung. Die analysierenden Konstrukte haben während der Planungsphasen die Aufgabe, kausale Zusammenhänge von der Verschwendungsursache bis zu deren Auswirkung in Montagesystemen zu erkennen und zu verarbeiten.

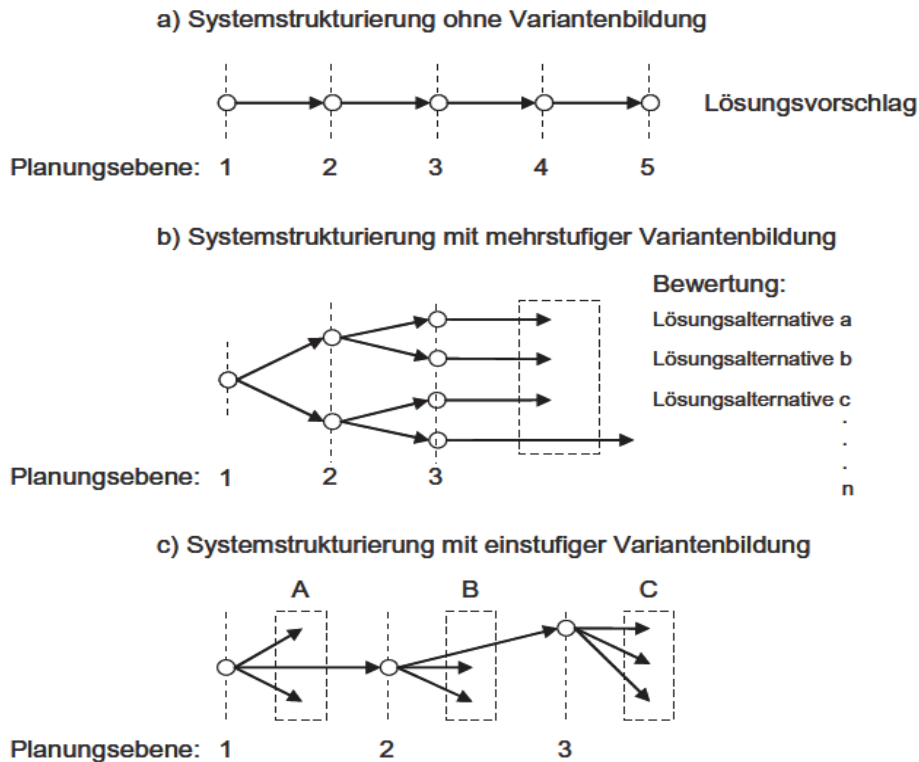
Die Forderung der Messbarkeit von Verschwendung in absoluten Zahlen enthält einen weiteren Aspekt des zu entwerfenden neuen Planungsverfahrens. Bewertende Konstrukte als Bestandteil des Planungsverfahrens ermöglichen den Vergleich verschiedener Gestaltungsmöglichkeiten eines Montagesystems. Dadurch wird es möglich, unterschiedliche Planungsszenarien<sup>36</sup> in Betracht zu ziehen und je Szenario dieselben Bewertungen in Form von Kennzahlen zur Überprüfung hinsichtlich der Zielerreichung auszuführen.

Besitzt das neue Planungsverfahren beschreibende Konstrukte innerhalb eines Modells, analysierende und bewertende Konstrukte zur Optimierung und Feststellung der Zielerreichung, so ist es möglich, hinsichtlich des Zielsystems sinnvolle alternative Planungsszenarien des Montagesystems zu erzeugen und zu

---

<sup>36</sup> Eversheim bezeichnet ein Planungsszenario als eine Kombination von Prozessen (vgl. Eversheim 2005, S.250)

vergleichen. Nach Pawellek (2014, S.52) erfordert die Planung die Bildung von geeigneten Alternativen, deren Bewertung und Auswahl der wirtschaftlich besten Lösung. Abbildung 13 zeigt 3 prinzipielle Strukturoptionen.



**Abbildung 13: Alternativenbildung der Planung (Pawellek 2014, S.52)**

Bei der Systemstrukturierung mit mehrstufiger Variantenbildung erfolgt die vergleichende Bewertung am Ende des Durchschreitens der Planungsebenen, bei der einstufigen Variantenbildung kann eine Bewertung in jeder einzelnen Planungsebene erfolgen. Zur Klärung der eindeutigen Begrifflichkeit wird im Folgenden in Anlehnung an Eversheim (2005) die Kombination aus Prozessen als „Planungsszenario“ bezeichnet. Es wird hier bewusst auf den Begriff der „(Planungs-)Varianten“ verzichtet, um eine klare Abgrenzung zu Varianten bezogen auf das Produkt zu schaffen.

---

### 3 Anforderungen an das zu gestaltende Planungsverfahren

Es existieren unterschiedliche Aspekte bei der Betrachtung der Anforderungen an das zu gestaltende Planungsverfahren, die im Folgenden erläutert werden.

Das klassische Planungsverfahren aus Kapitel 2.3 soll um die Dimension der Verschwendungsreduzierung erweitert werden. Daher ist zunächst zu analysieren, welche Planungsphasen und –schritte im Hinblick auf die Fragestellung besonders relevant sind.<sup>37</sup> Es ist weiterführend zu klären, welche Planungsteilprozesse im neuen Verfahren abzubilden und genauer zu betrachten sind und andererseits sollen die Teilprozesse ermittelt werden, die nicht weiter in Betracht gezogen werden.

In Kapitel 2.4 wurden bereits weitere Aspekte zu den Verfahrensanforderungen formuliert. Das Verfahren ist so zu konzipieren, dass der Zielzustand des Montagesystems eindeutig definiert ist, weshalb beschreibende Konstrukte zu implementieren sind. Weiter soll das Verfahren Mechanismen enthalten, die Verschwendung reduzieren, weshalb analysierende Konstrukte erforderlich sind. Aus der Forderung der Messbarkeit von Verschwendung<sup>38</sup> folgt die Notwendigkeit bewertender Konstrukte zum Nachweis der Zielerreichung.

Erfahrungsgemäß sind bei der Entwicklung komplexer Planungsverfahren ergänzende Anforderungen hinsichtlich der Anwendbarkeit und des Verfahrensablaufs zu betrachten.

#### 3.1 Anforderungen aus Sicht der relevanten Planungsschritte

Im Folgenden sind die einzelnen Planungsphasen und –schritte des klassischen Verfahrens (vgl. Kapitel 2.3, Abbildung 12) zu untersuchen, ob ein kausaler

---

<sup>37</sup> vgl. hierzu die zweite untergeordnete Forschungsfrage in Kapitel 1.3

<sup>38</sup> vgl. hierzu die erste untergeordnete Forschungsfrage aus Kapitel 1.3

Zusammenhang zwischen dem Planungsteilprozess und der durch Planung induzierten Verschwendung innerhalb von Montagesystemen existiert.

Holle (2002) formuliert die Montageplanung als Zuordnungsproblem: es sind in der Montageplanung Elemente verschiedener Sachverhalte miteinander zu verbinden, im Wesentlichen beziehen sich diese Elemente und Teile davon auf 3 zuordenbare Elementgruppen: das Montageprodukt (Enderzeugnis, Baugruppen, Einzelteile), den Montageprozess (Arbeitsvorgänge, Teilverrichtungen, Arbeitsinhalt) und das Montagesystem (Anlagen, Vorrichtungen, Arbeitsplätze, Stationen).<sup>39</sup> Dabei sind die Zuordnungen sowohl innerhalb einer Elementgruppe wie auch zwischen den Gruppen zu vollziehen. Untersucht man die einzelnen Planungsphasen hinsichtlich des Schwerpunkts der zu gestaltenden Elementgruppen, so wird deutlich, dass das physische Montagesystem erst ab der Grobplanungsphase 4 bis zur Realisierungsphase 5 geplant wird.

Die Anforderungsanalyse behandelt sowohl das Produkt, den Prozess und das Montagesystem gleichermaßen und sammelt relevante Eingangsinformationen. Daher ist diese erste Initialphase auch für die Gestaltung verschwendungsarmer Montagesysteme relevant. Im Besonderen muss das Zielsystem an die Aufgabenstellung angepasst werden.

Die zweite Phase der montagegerechten Produktgestaltung fokussiert die Optimierung der Prozessabläufe durch Änderungen am Produkt, sie zielt nicht direkt auf die Gestaltung des Montagesystems. Deshalb wird die Produktgestaltung nicht als Anforderung an das neue Verfahren definiert, da in dieser Arbeit die Gestaltung des Montagesystems im Mittelpunkt stehen soll. Es sind zwar Potenziale hinsichtlich einer Reduzierung von Verschwendung durch montagegerechte Produktgestaltung vorhanden, doch sind diese im Vergleich zu den anderen Phasen als gering einzustufen. Eine Ursache hierfür sind weitere Anforderungen an die Produktgestaltung außerhalb des Betrachtungsbereichs Montage, die bei der Konstruktion

---

<sup>39</sup> vgl. hierzu die Elemente eines Montagesystems in Kapitel 2.1

von großer Relevanz sind, wie beispielsweise Kundenwünsche an die Funktion, Qualitätsansprüche oder preisliche Rahmenbedingungen.

Die Planung des Montageablaufs fokussiert den Prozess als Elementgruppe, gestaltet daher nicht direkt das physische Montagesystem, jedoch liefert diese Planungsphase mit den prinzipiell möglichen Bearbeitungssequenzen und den benötigten einzelnen Montagezeiten Ergebnisse, die von hohem Einfluss auf die Struktur des physischen Montagesystems sind. Da die Planung des Montageablaufs sehr eng mit der Gestaltung der physischen Betriebsmittel verflochten ist, soll diese Phase als Anforderung definiert werden und ist in einem Verfahren zur verschwendungsarmen Gestaltung von Montagesystemen zu berücksichtigen.

Die Grobplanungsphase enthält die für die Gestaltung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen bedeutsamsten Planungsschritte. Sind mehrere Produkte in unterschiedlichen Stückzahlen zu fertigen, so steigt die Komplexität mit der Aufgabe der Bildung von Montagesubsystemen. Die durchzuführende Kapazitätsteilung (vgl. Kapitel 2.3) bestimmt sowohl auf Gesamt-/Teilsystemebene wie auch auf Teilsystem-/Arbeitsplatzebene im Wesentlichen die Verwendung von Produktionsressourcen und deren Auslastung, damit beeinflusst sie in hohem Maß die Verschwendung in Montagesystemen wie beispielsweise durch Wartezeiten. Auch der Grad der Automatisierung ist von der Zusammenführung von Produkten zu Montagegruppen abhängig, es kann Verschwendung durch Über- bzw. Unterautomatisierung entstehen (vgl. hierzu „kanji muda“ im Ebenenmodell von Takeda in Kapitel 2.2). Das Groblayout ist das Ergebnis der Arbeitsplatzanordnung und -verkettung, damit gestaltet es die Arbeitsumgebung des Montagearbeiters und bestimmt vor allem die nicht wertschöpfenden Prozesse wie das Transportieren von Werkstücken oder die Lauf- und Drehbewegungen zum Greifen des Fügmaterials. Auch die Wahl der Bereitstellungsstrategie und der Bereitstellungsbehälter hat Einfluss auf die Bewegungen des Mitarbeiters, daher ist die Bereitstellung für die Betrachtung der Verschwendung in getakteten Fließmontagen relevant.

Die Feinplanungsphase hat im Vergleich zur Grobplanungsphase relativ geringe Auswirkung auf Verschwendungsausprägungen, da die wesentlichen Parametergrößen für nicht wertschöpfende Arbeit wie Lauf- und Greifwege, Wartezeiten oder zu geringe Taktzeiten bereits in der Grobplanung festgelegt werden.

Die Phase der Realisierung setzt das Geplante in die Realität um und hat daher ausführenden Charakter. Deshalb werden die beiden letzten Phasen nicht als Anforderung für die verschwendungsarme Gestaltung von Montagesystemen definiert.

Zusammenfassend sind in Abbildung 14 die für ein Verfahren zur Gestaltung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen relevanten Planungsphasen und -schritte dargestellt.<sup>40</sup>

Phase	Anforderungsanalyse	Montagegerechte Produktgestaltung	Montageablaufplanung	Grobplanung des Montagesystems	Feinplanung des Montagesystems	Realisierung
Planungsschritte	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Planungsaufgabe definieren</li> <li>2. Planungsdaten ermitteln</li> <li>3. Zielsystem schaffen</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Formgebung Einzelteile</li> <li>2. Verbindungsarten</li> <li>3. Optimierung Montageablauf</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Erzeugnisse strukturieren</li> <li>2. Ermittlung Montageablaufstruktur</li> <li>3. Montagezeitermittlung</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Montagestruktur auf Ebene Gesamt-/Teilsystem definieren</li> <li>2. Taktzeit berechnen</li> <li>3. Automatisierungsgrad festlegen</li> <li>4. Montagestruktur auf Ebene Arbeitsplätze definieren</li> <li>5. Arbeitsplätze anordnen und verketteten</li> <li>6. Arbeitsinhalte bilden</li> <li>7. Bereitstellung</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung manueller Arbeitsstationen</li> <li>2. Technische Gestaltung automatischer Arbeitsstationen</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bereitstellung Betriebsmittel</li> <li>2. Personaleinsatzplanung</li> <li>3. Aufbau und Anlauf</li> <li>4. Betrieb</li> </ol>

**Abbildung 14: Verschwendungsrelevante Planungsphasen und -schritte**

<sup>40</sup> vgl. hierzu die Phasen und Schritte der klassischen Montageplanung in Abbildung 12

### **3.2 Anforderungen an den Verfahrensablauf und analysierende Konstrukte**

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, erfordert die Aufgabenstellung der Reduzierung von Verschwendung analysierende Konstrukte in Form von Mechanismen, die die in Kapitel 2.2 beschriebenen 7 Verschwendungsarten verringern.

Hinsichtlich des Ablaufs ist das Verfahren so zu gestalten, dass der Planer bei Durchschreiten der verschiedenen Planungsphasen in seinem Handeln optimal unterstützt wird. Da viele Entscheidungen hinsichtlich der Prozess- und Montagesystemgestaltung zu treffen sind und während des sukzessiven Zusammensetzens der Elemente des Montagesystems komplexe Zusammenhänge auch in Richtung Zielerreichung nicht immer sofort erkennbar sind, werden Algorithmen<sup>41</sup> in Form von konkreten Berechnungen und Formeln zur Entscheidungshilfe notwendig. Die Algorithmen sollen auf Basis beschreibender Konstrukte des zu gestaltenden Montagesystems - also seines Modells - implementiert werden, damit der Planer während der Modellierung permanent Transparenz über die Zielerreichung erhält. Generell helfen Algorithmen in Verfahren, standardisierte Vorgehensweisen zu verfolgen und damit eine gewisse Planungsqualität sicherzustellen, zudem beschleunigen sie bei rechnerunterstützter Planung den Prozess, indem Routineoperationen automatisiert abgearbeitet werden können.

Das Grundlagenkapitel 2.4 zitiert unterschiedliche Systemstrukturen hinsichtlich der Bildung von Planungsalternativen. Sowohl im Falle der ein- als auch mehrstufigen Variantenbildung (vgl. Abbildung 13) soll dem Planer eine Entscheidungsunterstützung zur Verfügung gestellt werden, um eine sinnvolle Auswahl bei mehreren Planungsszenarien treffen zu können.

---

<sup>41</sup> Nach Dobler (2008, S.33) ist ein Algorithmus eine vollständige, präzise abgefasste, endliche Beschreibung eines schrittweisen Problemlösungsverfahrens. Nach Duden (2016) ist ein Algorithmus ein Rechenvorgang nach einem bestimmten Schema.



Hinsichtlich Verfahrensablauf und analysierender Konstrukte werden zusammenfassend folgende 3 Anforderungen an das Planungsverfahren definiert:

- Verschwendung reduzierende Mechanismen
- Beinhaltung von Algorithmen auf Modellbasis
- Entscheidungsunterstützung bei mehreren Planungsszenarien

### **3.3 Anforderungen an beschreibende Konstrukte zur Modellierung**

Ein Modell ist die vereinfachte Darstellung eines Objekts, die der Analyse, dem Entwurf und der Realisierung dient (vgl. Schmigalla 1995). Für den Planer ist damit ein Modell nicht nur das Abbild eines Objekts, sondern auch Arbeitsmittel und -gegenstand im Planungsprozess (vgl. Schenk et al. 2014, S. 220).

Wegen der hohen Komplexität von getakteten Fließmontagen eignet sich die Anwendung eines spezifischen Modells als beschreibendes Konstrukt des zu planenden Montagesystems und dessen Elemente. Das Verfahren soll daher ein Modell beinhalten, das in der Lage ist, unterschiedliche Montagesystemstrukturen abzubilden. Es existieren eine Vielzahl von technischen, organisatorischen und arbeitswissenschaftlichen Gestaltungsaspekten und Freiheitsgraden wie z.B. das Strukturieren in Teilsysteme, Pufferauslegungen, die Leistungsabstimmung der Stationen, die Arbeitsteilung und der Arbeitsinhalt, die Arbeitsplatzgestaltung sowie die Automatisierung (vgl. Lotter et al. 2012, S. 5). Die verschiedenen Ausprägungsformen des Montagesystems sollen im Modell darstellbar sein (vgl. Kapitel 2.4).

Im Zuge der Entwicklungen und Megatrends einer steigenden Variantenvielfalt und der immer stärker werdenden Diversifizierung von Kundenanforderungen ist die steigende Produktvielfalt eine der wesentlichen Herausforderungen in heutigen Montagesystemen (vgl. Lotter et al. 2012, S. 3, und Westkämper et al. 2013, S. 8 ff.). Das hier verwendete Modell muss deshalb in der Lage sein, sowohl mehrere Endprodukte wie auch deren verschiedene Varianten abbilden zu können.

Ein Modell ist ein Abbild des realen Systems, es vereinfacht und reduziert auf handhabbare Zusammenhänge. Deshalb sind Überprüfungsmechanismen not-

wendig, ob die Modelle auch real umsetzbar sind, die Machbarkeit muss nachgewiesen werden.<sup>42</sup>

Hinsichtlich beschreibender Konstrukte sind zusammenfassend folgende 3 Anforderungen zu erfüllen:

- Modellierung unterschiedlicher Montagesystemstrukturen
- Abbildung mehrerer Produkte und Varianten
- Überprüfungsmechanismen zur Machbarkeit

### **3.4 Anforderungen an bewertende Konstrukte zur Sicherstellung der Zielerreichung**

Bewertende Konstrukte innerhalb eines Planungsverfahrens sind Grundvoraussetzung für die Überprüfung der Zielerreichung während des Planungsprozesses. Mit der Zielstellung einer nachweislich verschwendungsreduzierten Auslegung der Montage (vgl. Kapitel 1.2) resultiert die Anforderung der Quantifizierung von Verschwendung bzw. die Messbarkeit von nicht wertschöpfenden Tätigkeiten.

Neben der Verschwendungsreduzierung als neues Zielkriterium sind die in den klassischen Verfahren beschriebenen allgemeinen Zielkriterien auch hier zu betrachten. Die Forderung der nachhaltigen Sicherung von Wirtschaftlichkeit führt nach Feldmann (2004, vgl. S. 178) zu dem Bestreben, das Montagesystem möglichst flexibel hinsichtlich Stückzahlschwankungen und Variantenänderungen zu gestalten. Westkämper (et al. 2001, S. 5) unterstreicht die beiden Ziele Wirtschaftlichkeit und Flexibilität, er sieht zum einen eine kostengünstige Montage auf hohem Qualitätsniveau als Grundvoraussetzung für ein marktfähiges Produkt. Zum anderen

---

<sup>42</sup> Die Validierung von Modellen ist nach Rabe (et al. 2008, vgl. S. 15) das Überprüfen, ob das zur Zielerreichung wichtige Verhalten des Modells mit dem des abgebildeten Modells übereinstimmt.

stellt er fest, dass echte Alleinstellungsmerkmale erst durch logistische Leistungen wie der Flexibilität des Montagesystems gewonnen werden können.

Nach Töpfer (2005, S.63) und Warnecke (1990, S.15) ist die Wirtschaftlichkeit der Quotient aus Leistung bzw. Erlös und Kosten. Nach Friedl (2010, S. 30) kann zum Zweck der Wirtschaftlichkeitskontrolle die Annahme von Festpreisen im Zeitablauf als konstant angenommen werden. Angewandt auf ein Montagesystem folgt daraus, dass ein konstanter Produkterlös des Montageerzeugnisses durch angenommene Festpreise und eine Minimierung der Montagekosten zur Maximierung der Wirtschaftlichkeit führt. Bullinger (1986) empfiehlt, Kostenvergleiche auf Basis von Stückkosten eines zuvor definierten Kostenträgers zu machen, da 2 zu vergleichende Arbeitssysteme in der Regel ein unterschiedliches Ausbringungsverhalten aufweisen.

Zusammenfassend werden folgende 3 Anforderungen hinsichtlich bewertender Konstrukte des Verfahrens definiert:

- Quantifizierung von Verschwendung/Wertschöpfung
- Quantifizierung der Stückkosten
- Berücksichtigung von Flexibilitätsgrößen

Bei einer Vermeidung von Verschwendung ist nicht zwangsläufig eine Reduzierung der Montagestückkosten zu erreichen. Es können Fälle auftreten, bei denen Verschwendung wie z.B. Wartezeiten des Mitarbeiters, verursacht durch automatisierte Prozesse, in Summe wirtschaftlicher sind als bei den entsprechenden manuellen Vorgängen und maximaler Mitarbeiterauslastung. Eine Nichtberücksichtigung der Stückkosten würde zur Folge haben, dass der Nachweis der Wirtschaftlichkeit nicht erbracht werden kann.

### 3.5 Anforderungen zur Anwendbarkeit des Verfahrens

Es existieren aus Anwendersicht weitere Anforderungen an das Verfahren. Mit der in Kapitel 1.2 beschriebenen Fokussierung auf getaktete Fließmontagen sollen variantenreiche Serienfertiger als Anwender dieser Organisationsform das Verfahren unabhängig von Produkt- und Branchenspezifika anwenden können. Um ein möglichst breites Einsatzgebiet in der Industrie abzudecken, sollen sowohl manuelle als auch hybride getaktete Fließmontagen<sup>43</sup> verschwendungsarm zu gestalten sein. Lotter (2012) unterscheidet bei den manuellen und hybriden Montagen zwischen variantenreichen Serienfertigern von Kleingeräten wie Hersteller von Feinwerk- und elektrotechnischen Produkten, sowie Herstellern von Großgeräten wie Fahrzeuge und deren Komponenten oder auch Haushaltsgeräten wie Geschirrspüler. Scherm stellt fest, dass mit zunehmender Komplexität auch die Bedeutung einer interaktiven mehrstufigen und iterativen Gestaltung von Planungsprozessen wächst. Weiter fordert Scherm, die betroffenen Organisationseinheiten miteinzubeziehen, um vorhandenes Wissen nutzen zu können (Scherm et al. 2007, S. 207 auf Basis von Klein et al. 2004, S. 20 ff.). Die interaktive Miteinbeziehung des Planers soll innerhalb des zu entwerfenden Verfahrens bestimmte Freiheitsgrade innerhalb der Planung bis zu einem Maß zulassen, das für den Planer zu bewältigen ist.

Folgende 3 anwendungstechnische Anforderungen lassen sich zusammenfassen:

- für die Branchen der variantenreichen Serienfertiger anwendbares Verfahren
- beherrschbare Komplexität
- interaktive Miteinbeziehung des Planers

---

<sup>43</sup> Hybride Systeme sind Montagen, die sowohl automatisierte wie manuelle Montageprozesse beinhalten (vgl. Feldmann et al. 2014, S.483).

---

## 4 Stand der Technik

Im Folgenden werden bereits existierende Verfahren der Montageplanung untersucht, inwiefern diese den in der vorliegenden Arbeit gestellten Anforderungen einer verschwendungsarmen Gestaltung aus Kapitel 3 entsprechen. Trotz der Fokussierung auf die Planung getakteter Fließmontagen (vgl. Kapitel 1.2) werden im Schwerpunkt allgemeine Verfahren der Montageplanung herangezogen, da in Kapitel 3.1 bei der Untersuchung der Anforderungen hinsichtlich verschwendungsrelevanter Planungsschritte bereits deutlich wurde, dass ein umfassender Bereich von der Anforderungsanalyse bis zur Grobplanung des Montagesystems gefordert ist. Wie Kratzsch (2000, S.33) treffend feststellt, existiert kein geeignetes Planungsverfahren für Fließmontagen, das die wichtigsten Planungsphasen von der Definition der Ziele bis zur Umsetzung aufzeigt. Weiter führt Kratzsch aus, dass sich die Literatur mit Ausrichtung auf Fließmontagen auf singuläre Planungsschritte wie die Abtaktung oder die Reihenfolgeoptimierung konzentriert, was dem in dieser Arbeit geforderten breiten Ansatz widerspricht. Weiter begründet sich die Auswahl allgemeiner Planungsverfahren durch die in Kapitel 3.5 definierte Branchenneutralität. Kapitel 4.1 beschreibt sowohl ideelle wie technische Verfahren,<sup>44</sup> während Kapitel 4.2 ausgewählte am Markt befindliche Software im Bereich der Montageplanung betrachtet. Kapitel 4.3 fasst die Ergebnisse der Untersuchung innerhalb des Fazits zusammen.

### 4.1 Existierende Verfahren der Montageplanung

#### ***Verfahren nach Bullinger (1986)***

Bullinger gliedert die Montageplanung in 7 Phasen (siehe Abbildung 15). Während in Phase 1 organisatorische Aspekte wie die Verantwortung, Terminierung und

---

<sup>44</sup> „Ideelle Planungsverfahren beinhalten Methoden und sachlogische Vorgehensweisen, während technische Planungsverfahren computergestützte Realisierungen der ideellen Verfahren darstellen.“ (Braun 2004, S.47), vgl. auch König (1997, S.35)

Überwachung der Aktivitäten behandelt werden, beschäftigt sich Phase 2 mit der Analyse der Aufgabenstellung, der Zielsetzung der zu erfüllenden Planungsaufgabe und der Ermittlung vorhandener Planungsdaten. Die als Ablaufplanung bezeichnete Phase 3 umfasst alle notwendigen Teilschritte zur Ermittlung der Montageablaufstruktur. Nach Bullinger verdeutlicht die Montageablaufstruktur „die Teilaufgaben der Montage und deren Aufeinanderfolge und dokumentiert, welche Freiheitsgrade bei der Montage eines Erzeugnisses vorliegen, also welche Teilaufgaben hintereinander ausgeführt werden müssen bzw. parallel ausführbar sind“ (Bullinger 1986, S. 53). Bullinger zeigt auf, wie durch Analyse der Erzeugnisstruktur die produktspezifischen Vorranggraphen erstellt werden, die den Montageablauf visualisieren.

1. Projektorganisation	1.1 Projektmanagement 1.2 Hilfsmittel der Projektorganisation 1.3 Projektplanung	1.4 Projektüberwachung 1.5 Prinzipieller Projektablauf	
2. Konzeption	2.1 Planungsdaten 2.2 Planungsziele 2.3 Prinziplösung	2.4 Montagekostenkalkulation	
3. Ablaufplanung	3.1 Erzeugnisstrukturierung 3.2 Montageablaufstruktur 3.3 Daten der Montageablaufstruktur	3.4 Kapazitätsteilung 3.5 Bildung der Arbeitsinhalte	
4. Montagesystementwurf	4.1 Technik 4.2 Organisation 4.3 Prinzipanordnung	4.4 Materialbereitstellung 4.5 Layout 4.6 Auswahl Montagesystem	4.6 Simulation 4.7 Einplanung des Produktionsprogramms
5. Ausarbeitung	5.1 Manuelle Montagestationen 5.2 Automatisierte Montagestationen 5.3 Überprüfung der Montageplätze		
6. Realisierung	6.1 Bereitstellung der Betriebsmittel 6.2 Personaleinsatzplanung 6.3 Aufbau- und Anlaufbetreuung		
7. Betrieb	7.1 Controlling 7.2 Rationalisierung 7.3 Kennzahlen, Problemlösungstechniken		

**Abbildung 15: Montageplanung in 7 Phasen nach Bullinger (1986, S.51)**

Das Verfahren nach Bullinger behandelt die Teilaufgabe der Planung der Aufbaustruktur von Montagesystemen, also die Segmentierung des gesamten

Montagesystems in Teilsysteme, nicht explizit. Bullinger erwähnt die Zuordnung der Produkt- bzw. Baugruppen zu Montageteilsystemen über einen Hinweis, dass diese Aufgabe vor der Kapazitätsteilung erfolgen muss (vgl. S.126). Die Kapazitätsteilung umfasst die Gliederung des Bedarfs an Montagekapazität in Kapazitätsbedarfsteile, die entweder Arbeitsplätze oder Mitarbeiter repräsentieren. Bullinger nennt die Arten- und Mengenteilung als prinzipielle Formen der Kapazitätsteilung (der Begriff Arbeitsteilung wird in der Literatur synonym verwendet). Bei der Artenteilung führt ein Mitarbeiter nur einen Teil der zu montierenden Arbeiten aus, dafür bearbeitet er mehr Erzeugnisse. Bei der Mengenteilung bearbeitet ein Mitarbeiter die gesamten Arbeiten, jedoch bearbeitet er weniger Stückzahlen. Nach Bullinger ist das Ergebnis der Kapazitätsteilung die Zuordnung der Teileverrichtungen zu Arbeitsplätzen.

Phase 4 beschreibt den Montagesystementwurf, der die Ausplanung einzelner Stationen und deren Anordnung betrifft, ebenso wird die Materialbereitstellungsplanung thematisiert. In Phase 6 erfolgt die Ausarbeitung der einzelnen Montagestationen. Es folgen die Phasen 7 und 8, zunächst die Realisierung und danach das Betreiben des geplanten Montagesystems.

Das Verfahren nach Bullinger deckt im Wesentlichen alle für die Zielstellung relevanten Planungsschritte ab, jedoch enthält es kein Modell zur Beschreibung des zu planenden Montagesystems und folglich auch keine Algorithmen zur Analyse von Zielkriterien auf Basis einer Modellierung. Verschwendungsvermeidende Mechanismen und Bewertungen fehlen ebenso wie eine integrierte Betrachtung von Flexibilitätsaspekten innerhalb der 7 Planungsphasen. Das Verfahren ist stark abstrahiert, daher branchenneutral. Kostenaspekte werden verfahrensbegleitend durch 4 Kalkulationen an unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet. Bullinger nennt 4 statische Verfahren zur Kostenkalkulation: die Kostenvergleichsrechnung, die Gewinnvergleichsrechnung, die Amortisationsrechnung und die Rentabilitätsrechnung. Er ergänzt die Kapitalwertmethode und die Zinsfußmethode als dynamische Verfahren.

### Verfahren nach Zeile (1995)

Zeile konzentriert sich auf die Planung der Struktur flexibler Montagesysteme für variantenreiche Serienprodukte. Das Verfahren zielt auf die Anwendung in der Grobplanungsphase im Rahmen von Neuplanungen (vgl. Zeile 1995, S. 19). Das Verfahren nach Zeile enthält eine eindeutige algorithmierbare Beschreibung zur Ermittlung der Montagestruktur bestehend aus einer Aufbau- und Verkettungsstruktur im Sinne einer späteren Umsetzung des Verfahrens in ein Rechnerprogramm.

Das Verfahren nach Zeile beginnt mit der Ermittlung der Aufbaustruktur durch eine Clusteranalyse auf Basis der Erzeugnis- und Montageablaufstruktur. In einem zweiten Schritt leitet er mit Hilfe der Graphentheorie die Verkettungsstruktur ab. Innerhalb eines Kostenvergleichs werden als dritter Schritt Planungsalternativen bewertet (siehe Abbildung 16).

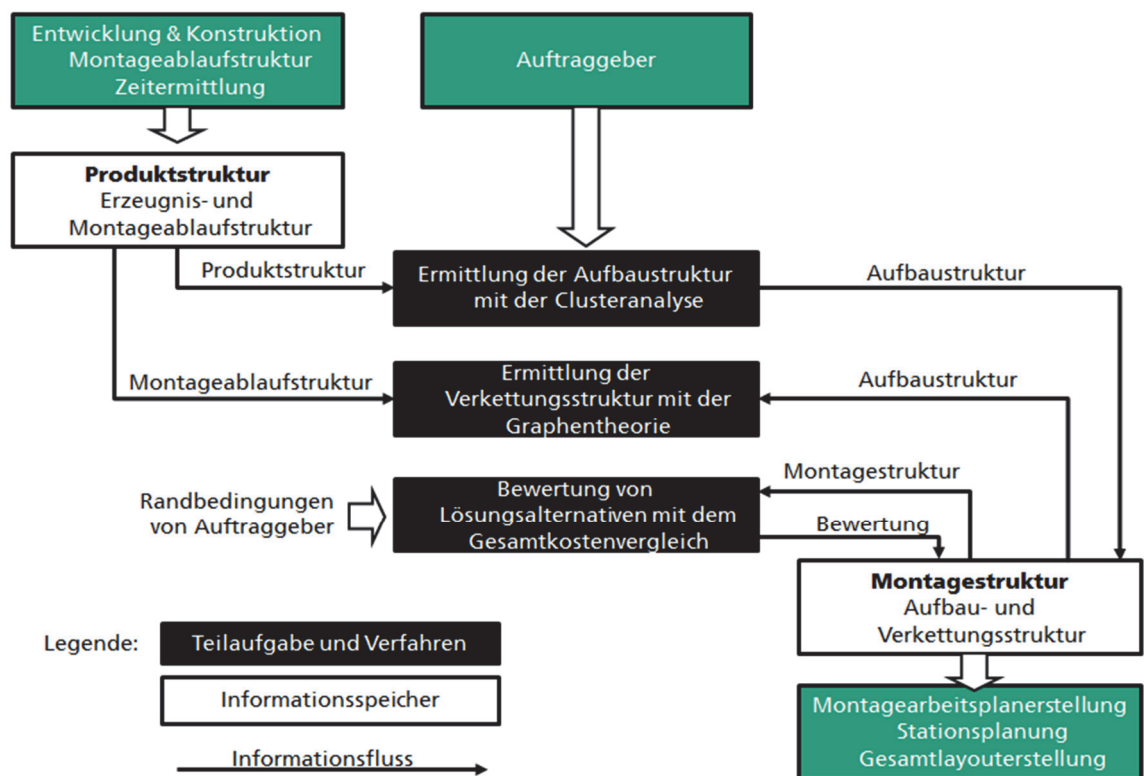
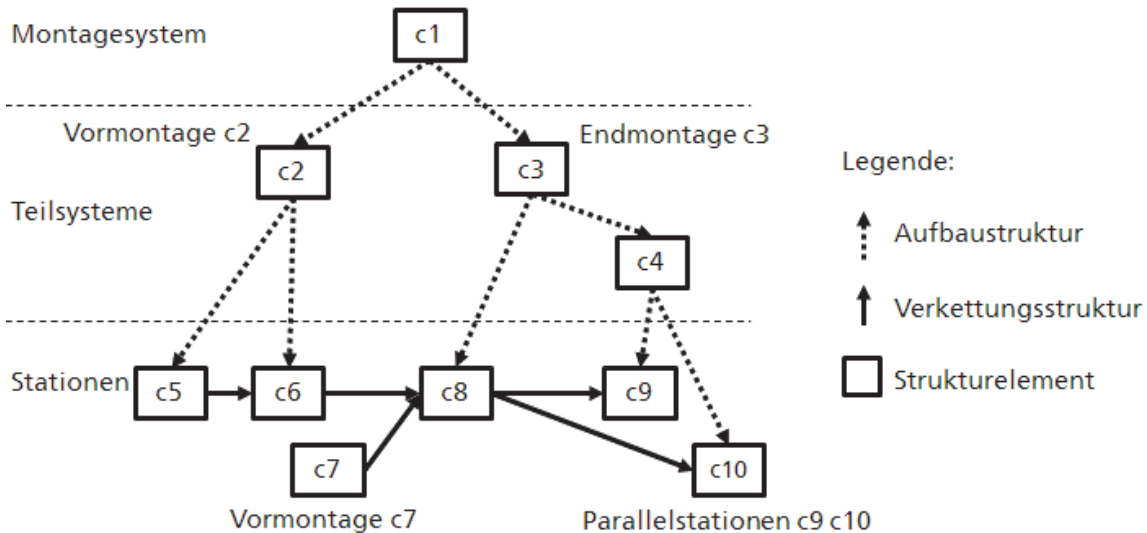


Abbildung 16: Montagestrukturplanung nach Zeile (1995, vgl. S.41)



Zur eindeutigen Spezifizierung der Montagestruktur verwendet Zeile ein hierarchisches Modell mit den 3 Ebenen Montagesystem, Teilsystem und Station.



**Abbildung 17: Montagestrukturmodell nach Zeile (1995, S.38)**

Die Aufbaustruktur definiert er als hierarchische Verbindung der Strukturelemente, z.B. besteht das Montagesystem aus den Strukturelementen Vor- und Endmontage (siehe Abbildung 17). Innerhalb der Clusteranalyse, die die Aufbaustruktur erzeugt, benutzt Zeile distanzbestimmende Merkmale<sup>45</sup> zwischen Gruppierungen von Teilverrichtungen. Teilverrichtungen mit geringer Distanz werden zusammengefasst, sodass sich sukzessive die Stationen als Gruppierung von Teilverrichtungen bilden.

Trautsch (2012, S.84) reduziert die Komplexität, indem die jeweiligen partiellen Distanzen von Montageerzeugnissen bezüglich 5 Eigenschaften ermittelt werden. Abbildung 18 zeigt diese 5 Eigenschaften und gibt die jeweilige Berechnungsformel zur Ermittlung der partiellen Distanzen an.

<sup>45</sup> Zeile (1995, S. 46) definiert die Merkmale Vorgangsart, Automatisierbarkeit, Fügeichtung, Fügebewegung, Handhabungsgewicht, Werkzeuge und Montageablaufstruktur, er ergänzt die beiden restriktiven Merkmale Teilverrichtungszeit und Werkstückwechselzeit

Nr	Eigenschaft	Berechnung der partiellen Distanz	Relevanz bezüglich...
1	Funktions-gleiche Baugruppen	$d_1^{xy} = 1 - \left( \frac{\text{Anzahl funktionsgleicher } BG_{xy}}{\text{Anzahl } BG_x + \text{Anzahl } BG_y - \text{Anzahl funktionsgl. } BG_{xy}} \right)$ (6)	... Montagablauf
2	Gleichteile	$d_2^{xy} = 1 - \left( \frac{\text{Anzahl Gleichteile}_{xy}}{\text{Anzahl Teile}_x + \text{Anzahl Teile}_y - \text{Anzahl Gleichteile}_{xy}} \right)$ (7)	... Aufwand der Bereitstellung
3	Montage-technologien	$d_3^{xy} = 1 - \left( \frac{\sum \text{Min (Anteil gleicher Montagetechnologie)}}{100\%} \right)$ (8)	... benötigte Betriebsmittel
4	Montage-umfang	$d_4^{xy} = \left( \frac{ \text{Montageumfang}_x - \text{Montageumfang}_y }{\text{Montageumfang}_x + \text{Montageumfang}_y} \right)$ (9)	... Komplexität der Montageaufgabe
5	Abmessungen oder Gewicht	$d_5^{xy} = \left( \frac{ \text{Gewicht}_x - \text{Gewicht}_y }{\text{Gewicht}_x + \text{Gewicht}_y} \right)$ (10)	... Materialfluss und Handhabung

Legende:  $d_i^{xy}$ : partielle Distanz der Eigenschaft i zwischen Erzeugnis x und Erzeugnis y

**Abbildung 18: Partielle Distanzen nach Trautsch (2012) auf Basis Zeile (1995)**

Trautsch berechnet analog Zeile aus den partiellen Distanzen die Gesamtdistanz (Formel 4.1) und fasst Montageerzeugnisse zu Gruppierungen zusammen. Je kleiner der Distanzwert, desto ähnlicher sind die Erzeugnisse.

$$D^{xy} = \frac{\sum_{i=1}^5 (g_i * d_i^{xy})}{\sum_{i=1}^5 g_i} * 100\% \quad WB: 0 \dots 100 \quad (4.1)$$

$D^{xy}$ : Distanz zwischen Erzeugnis x und Erzeugnis y

$d_i^{xy}$ : partielle Distanz der Eigenschaft i zwischen Erzeugnis x und Erzeugnis y

$g_i$ : Gewichtungsfaktor der Eigenschaft i

Den Ausführungen von Zeile weiter folgend, entspricht die Verkettungsstruktur den Knoten zwischen den Strukturelementen, diese Knoten repräsentieren den Materialfluss (vgl. Abbildung 17). Neben den Strukturelementen der Montage werden im Montagestrukturmodell als Entitäten noch die Teilverrichtung, die Betriebsmittel

und die Bereitstellereinrichtung verwendet. Das Produktmodell orientiert sich am Erzeugnisbaum, der hierarchisch die Teile, Baugruppen und Erzeugnisse miteinander verknüpft.

Innerhalb der Teilaufgabe der Montagestrukturplanung berücksichtigt das Verfahren nach Zeile folgende Ansätze zur Kostenoptimierung, die für die vorliegende Arbeit relevant sind:

- Teilverrichtungen besitzen das Merkmal Automatisierbarkeit
- Fügerichtungen werden berücksichtigt
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durch Kostenanalyse möglich, ebenso ist eine Vergleichbarkeit von Lösungsvarianten möglich

Das Verfahren von Zeile geht nicht auf die Gestaltung der Linie ein, die Bestimmung des Montagetakts (vgl. Kapitel 2.3 und die Anforderungen in Kapitel 3.1) ist nicht im Fokus. Es existieren keine expliziten verschwendungsreduzierenden Mechanismen bzw. wird die Wertschöpfungsorientierung nicht thematisiert, ebenso wird Verschwendung im Modell nicht quantifiziert. Layoutrelevante Ausprägungen des Montagesystems werden nicht betrachtet. Es existieren ebenso keine Überprüfungsmechanismen zur Machbarkeit. Es erfolgt keine Unterstützung des Planers bei zeitlichen Szenarien, was die Flexibilität betrifft.

### ***Rechnerunterstütztes Verfahren nach Holle (2002)***

Holle (2002, S. 6) stellt in seinem Verfahren den „Informations- und Datenfluss im Netz des Planungsprozesses“ in den Mittelpunkt. Der Ablauf orientiert sich hier nicht an der zeitlichen Abfolge der Planungsprozesse sondern am sukzessiven Aufbau des Produkt-, Prozess- und Montagesystem-Modells und der entsprechenden informationstechnischen Umsetzung.

Holle erfasst in einem ersten Schritt produkttechnische Basisdaten in einer Füge- und Greifmatrix. Die Fügematrix spannt die zu betrachtenden Einzelteile in sowohl Spalten wie Zeilen auf und enthält in den Schnittpunkten die Verbindungen und deren Verbindungselemente. Mit der Verwendung von MTM als System

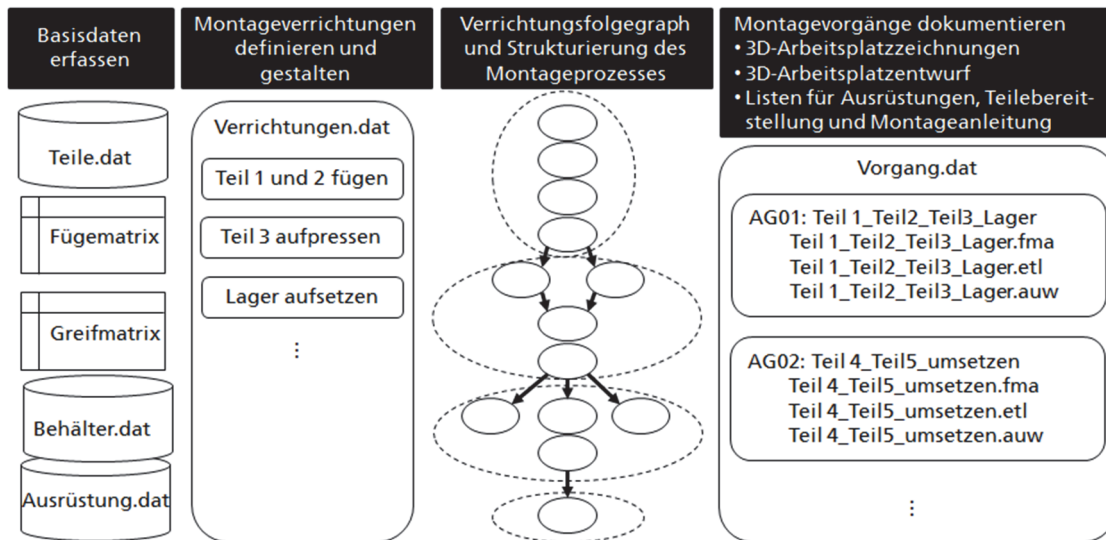
vorbestimmter Zeiten werden die jeweiligen Fügezeiten eingetragen. Die Greifmatrix zeigt die Zuordnung der Einzelteile zu den Bereitstellbehältern, indem die Spalten die Einzelteile und die Zeilen die Gebinde repräsentieren. In den Schnittpunkten wird der MTM-Code eingetragen, der die benötigte Zeit zum Greifen repräsentiert.

In einem zweiten Schritt werden Verrichtungen als kleinster Teil späterer Montagevorgänge definiert. Der Verrichtungsinhalt wird vom Planer aus den Daten der Füge- und Greifmatrix abgeleitet. So werden die Zeiten der Verrichtung aus der Greif- und Fügematrix entnommen und der Verrichtung zugeteilt. Benötigte Werkzeuge oder andere Betriebsmittel werden bei Bedarf erfasst und zugeordnet. Die Verrichtungen werden nach Primär- und Sekundär-Montageverrichtung klassifiziert. Nach Erfassung aller Verrichtungen wird die Reihenfolge durch den Planer definiert.

Nach Erfassung der benötigten Verrichtungen wird der Gesamtbedarf an Montagezeit unter Berücksichtigung der Stückzahlen dem Kapazitätsangebot gegenübergestellt und die Anzahl der notwendigen Takte berechnet.

Danach legt Holle die Reihenfolge der zu bearbeitenden Verrichtungen innerhalb eines Verrichtungsfolgegraphen fest. Der Verrichtungsfolgegraph ist das Ergebnis der vom Planer definierten Sequenz auszuführender Verrichtungen. Der Verrichtungsfolgegraph ist vom Vorranggraph zu unterscheiden, der die prinzipiell möglichen Freiheitsgrade zur Bildung der Reihenfolge darstellt.

In einem letzten Schritt werden aus dem Verrichtungsgraph mögliche Permutationen der finalen Montagereihenfolge gebildet. Die Permutationen der Reihenfolgen werden dazu verwendet, die Verrichtungen den Arbeitsstationen zuzuteilen. Dabei wird der Montagetakt als Grenzwert verwendet, es können daher nicht mehr Verrichtungszeiten innerhalb einer Station zugeteilt werden als die maximal zur Verfügung stehende Montagetaktzeit. Die von Holle als Montageablauf bezeichneten Arbeitspläne sowie Listen der erforderlichen Arbeitsmittel je Arbeitsstation können rechnergestützt erstellt werden. Abbildung 19 zeigt die informationstechnische Aufbau- und Ablaufstruktur des Verfahrens nach Holle (2002, S.134).



**Abbildung 19: Aufbau- und Ablaufstruktur nach Holle (2002)**

Das Verfahren nach Holle stellt ein ausgearbeitetes rechnerunterstütztes Verfahren dar, das in Software umgesetzt wurde, es gehört damit zu den technischen Verfahren. Ebenso bildet das Verfahren sehr gut die für die Vermeidung von Verschwendung wichtigen Teilprozesse der Montageplanung ab, es sind sowohl die Montagestrukturplanung, die Stationsplanung, die Teilebereitstellung und das zu ermittelnde Montagelayout abgedeckt. Das rechnergestützte Verfahren enthält daher weitgehend die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen beschreibender Konstrukte zur Gestaltung unterschiedlicher Montagestrukturen. Eine Ausnahme bildet die Bestimmung des Automatisierungsgrads, die in den Prozessdaten und im Aufbau des Modells unberücksichtigt bleiben. Weiter verwendet Holle keine Verschwendung vermeidende oder reduzierende Mechanismen, Verschwendung wird auch nicht quantifiziert. Das Verfahren bietet dem Planer nur eingeschränkt Entscheidungsunterstützung bei mehreren Planungsszenarien, da die verschiedenen Bewertungskriterien wie Invest und Personalkosten nicht Teil eines systematischen Zielsystems sind.

### **Planungssystematik nach Konold (2003)**

Die Planungssystematik nach Konold (et. al. 2003, S.32) basiert auf Planungsunterlagen der Robert Bosch GmbH. Das systematische Vorgehen zielt auf die Konzeption flexibler Montagesysteme. Konold teilt die Planung in 5 verschiedene Phasen mit jeweiligen Planungsschritten auf (siehe Abbildung 20).

<b>1) Aufgabenstellung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ziele festlegen</li> <li>▪ Projektverantwortlichen benennen</li> <li>▪ Terminrahmen vorgeben</li> <li>▪ Planungsdaten beschaffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Simulationsanalyse durchführen</li> <li>▪ Aufgaben abgrenzen</li> <li>▪ Verfügbare Hallenfläche vorgeben</li> <li>▪ Zeitlichen Ablauf des Projekts vorgeben</li> </ul>
<b>2) Grobplanung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Montagesystem-Ausbringung berechnen</li> <li>▪ Arbeitsabläufe festlegen und Montagestruktur entwickeln</li> <li>▪ Montageabschnitte bilden</li> <li>▪ Montagesystem-Alternativen entwickeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notwendige Hallenfläche ermitteln</li> <li>▪ Personalbedarf planen</li> <li>▪ Lösungsvarianten bewerten und auswählen</li> <li>▪ Projektkalkulation und Wirtschaftlichkeitsrechnung durchführen</li> </ul>
<b>3) Feinplanung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gesamtsystem und Teilsysteme im Detail ausarbeiten</li> <li>▪ Terminplan erstellen</li> <li>▪ Ausschreibung durchführen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kritische Prozesse absichern</li> <li>▪ Personaleinsatz planen</li> <li>▪ Wirtschaftlichkeitsnachweis führen</li> </ul>
<b>4) Realisierung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Beschaffung veranlassen</li> <li>▪ Arbeitsplätze nach MTM gestalten</li> <li>▪ Personal schulen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Montagesystem installieren</li> <li>▪ Dokumentation erstellen</li> <li>▪ Ausprobe</li> </ul>
<b>5) Fertigungsanlauf</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Systemanlauf analysieren</li> <li>▪ Fehler beseitigen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dokumentation ggf. korrigieren</li> <li>▪ Abnahme durchführen</li> </ul>

**Abbildung 20: Planungssystematik nach Konold (2003)**

Die erste Phase der Aufgabenstellung umfasst im Wesentlichen die Festlegung der Ziele, das Aufsetzen projektorganisatorischer Rahmenbedingungen, die Erfassung der verfügbaren Plandaten und die Abgrenzung der Aufgabenstellung. Innerhalb der Grobplanungsphase fasst Konold die Erarbeitung der Arbeitsabläufe und der Montagestruktur zusammen. Hierbei werden mehrere Systemalternativen gebildet, deren erforderliche Ressourcen wie Fläche und Personal kalkuliert und innerhalb einer Bewertung gegenübergestellt. Die dritte Phase der Feinplanung beinhaltet die Ausplanung des Gesamtsystems im Detail, während die Phasen 4 und 5 das Realisieren des geplanten Systems und letztendlich den Fertigungsanlauf abbilden.

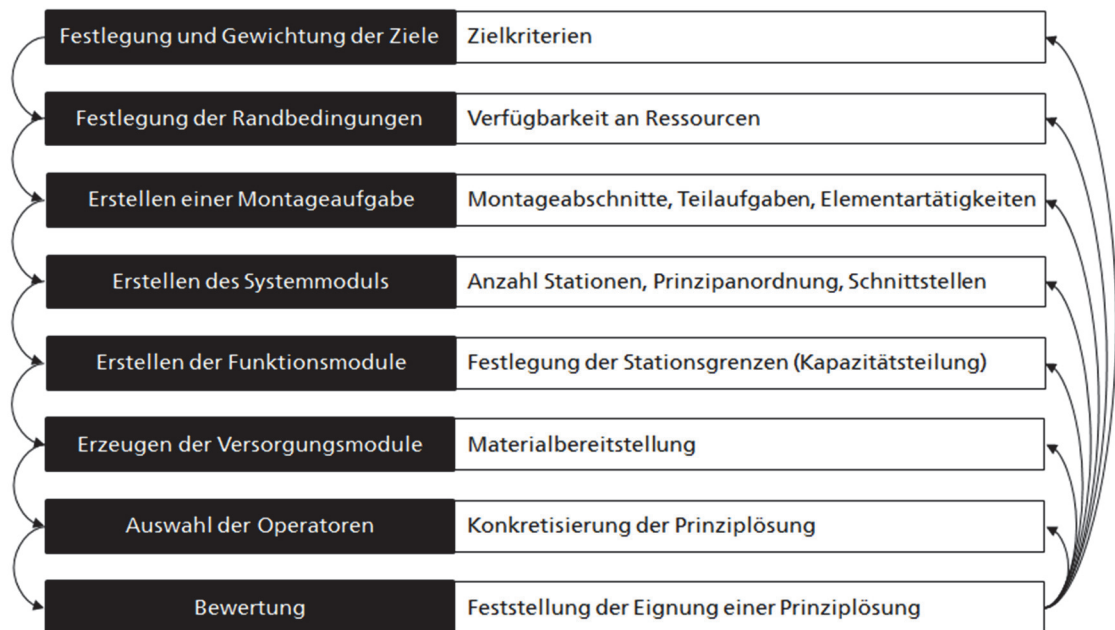
Das Planungsverfahren nach Konold zählt zu den ideellen Verfahren. Die einzelnen Planungsschritte werden in kompakter Form dargestellt, oft werden Checklisten verwendet, die dem Planer als Unterstützung bei der Abarbeitung der einzelnen Teilschritte dienen. Vergleicht man die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen an die Planung verschwundungsarmer Fließmontagen, so sind die für die Zielsetzung relevanten Planungsschritte abgedeckt. Einschränkend jedoch erfolgt die Bildung von Teilsystemen ähnlich wie bei Bullinger auf Basis der Analyse der Vorranggraphen, während Zeile einen detaillierteren tieferen Ansatz mit Hilfe der Clusteranalyse verfolgt. Die Anwendbarkeit des Verfahrens ist durch den gewählten praktischen Ansatz gegeben, jedoch fehlen aufgrund des nicht-technischen Verfahrens beschreibende, analysierende und bewertende Konstrukte auf Basis eines Modells.

### ***Planungsleitfaden für hybride Systeme nach Slama (2004)***

Der Planungsleitfaden nach Slama eignet sich zur Gestaltung hybrider Systeme. Slama konzentriert sich im Vorgehen ausschließlich auf die Grobplanungsphase. Der Leitfaden beschreibt ein rechnerunterstütztes Vorgehen, das innerhalb des Forschungsprojekts MAMOS in Zusammenarbeit mit Industrie- und Forschungspartnern prototypisch in ein IT-Werkzeug umgesetzt wurde.

Zunächst werden Zielkriterien und Rahmenbedingungen bezüglich der begrenzten Ressourcen Boden, Personal und Kapital festgelegt. Das Erstellen der Planungsaufgabe umfasst auf Basis der Produktstrukturinformationen die Strukturierung der Montageaufgabe in Vormontagen mit Zuordnung der jeweiligen Teilaufgaben, die weiter in Elementartätigkeiten auf Basis von MTM Grundvorgängen aufgeteilt werden. Es folgt die Erstellung des Systemmoduls, dessen Ergebnis die Definition der Anzahl Stationen und deren Anordnung und Verkettung zueinander darstellt. Bei der Erstellung der Funktionsmodule werden die Montagestationen und deren Arbeitsinhalte geplant. Anschließend erfolgt die Planung der Bereitstellung. Nach Auswahl von Operatoren werden die geschaffenen Prinziplösungen bewertet und deren Eignung hinsichtlich der Ziele festgestellt. Die

automatisierte Bewertung erfolgt unter Berücksichtigung der Montagekosten und der Leistungsdaten Ausbringung und Taktzeit, die nichtmonetären Faktoren Flexibilität, Wiederverwendbarkeit und Sozialverträglichkeit werden mit Hilfe von Kennzahlen mitberücksichtigt. Abbildung 21 zeigt zusammenfassend die verschiedenen Planungsschritte (Slama 2004, S.32)



**Abbildung 21: Leitfaden zur rechnergestützten Planung nach Slama (2004)**

Das rechnerunterstützte Planungsverfahren enthält die Planung des Montageablaufs, ebenso sind die Stations- und Layout-Grobplanung sowie die Bereitstellungsplanung im Verfahren abgedeckt. Bei der Bildung von Teilsystemen und auch der Zuordnung der Produkte und Varianten zu den Teilsystemen ist der Planer auf sich gestellt, er bekommt hier kaum Unterstützung in Form von Algorithmen oder einer methodischen Vorgehensweise. Ebenso ist die Wahl des Automatisierungsgrads nicht methodisch unterstützt. Die Bewertungslogik enthält sowohl monetäre wie nichtmonetäre Größen und repräsentiert hinsichtlich der in der Literatur beschriebenen Zielkriterien eine gute Abdeckung. Jedoch sind Ansätze zur Quantifizierung und Bewertung von Verschwendung nicht erkennbar. Bei der Gestaltung des Systems (vgl. die Bestimmung des Automatisierungsgrads und Bildung von Teilsystemen) nimmt der Planer eine zentrale Rolle ein, indem er



Entscheidungen ohne oder nur mit geringer methodischer Unterstützung trifft. Einerseits kann er dadurch sein Erfahrungswissen zielführend einbringen, andererseits wird eine bestimmte Qualifikation vorausgesetzt, mit der die dadurch entstandene höhere Komplexität der Planungsaufgabe bewältigt werden muss.

### ***Optimierungsverfahren nach Isebrecht (2008)***

Isebrecht (2008, S. 3-24) konzentriert sich in Ihrem Verfahren zur Montageplanung auf die unter Kostengesichtspunkten optimale Zuordnung von Produkten auf Montagelinien in der Automobilindustrie. Hierbei wird eine Lösung für den spezifischen Anwendungsfall entwickelt, 3 verschiedene Fahrzeugtypen auf 2 unterschiedliche Montagehallen aufzuteilen, wobei nur ein Fahrzeugtyp in beiden Hallen gefertigt werden kann und die beiden anderen jeweils einer Halle fest zugeordnet sind. Der Optimierungsalgorithmus nach Isebrecht liefert mit Hilfe einer Gesamtkostenfunktion ein optimales Ergebnis für die Parametrierung der Freiheitsgrade:

- Montagetakt der jeweiligen Produktionshallen mit zeitlicher Einordnung im betrachteten Planungshorizont
- Verteilung der zu produzierenden Fahrzeugtypen je Halle mit zeitlicher Einordnung im betrachteten Planungshorizont
- Anzahl benötigte Arbeitskräfte je Produktionshalle unter Berücksichtigung der zeitlichen Einordnung im Planungshorizont

Weiter berücksichtigt der Algorithmus einschränkende Bedingungen wie initiale Werte des vorhandenen Montagesystems (z.B. verfügbare Stammarbeitskräfte) und weiteren sachlogischen Restriktionen (z.B. Bandbreite technisch möglicher Taktzeiten je Produktionshalle).

Die Gesamtkostenfunktion betrachtet ausschließlich Personal- und Wechselkosten, letztere Kosten entstehen durch Veränderung des Takts und Veränderung von Schichtmodellen während des Planungshorizonts. Zur Vergleichbarkeit von Szenarien wird der jeweilige Kapitalwert der Kosten im zeitlichen Verlauf in

Abhängigkeit vom firmenintern fixierten Zinssatz berechnet. Der Optimierungsalgorithmus basiert auf dem Prinzip der dynamischen Optimierung.<sup>46</sup>

Das Verfahren nach Isebrecht stellt eine spezielle Lösung unter der Annahme vieler einschränkender Prämissen dar, die eine Übertragbarkeit auf allgemeinere Anwendungsfälle nicht zulassen. Verschwendungsvermeidende Mechanismen werden nicht berücksichtigt. Verschwendungsrelevante Ausprägungen eines Montagesystems beschränken sich auf die Berücksichtigung des Taktausgleichsverlusts und gehen in die Gesamtkostenberechnung in Form der Auslastung mit ein. Die Modellierung und Gestaltung der Montagestruktur wird hier nicht betrachtet, da die Struktur bereits in der Problemstellung fixiert wurde.

### ***Planung und Bewertung von Montagesystemen nach Hartel (2012)***

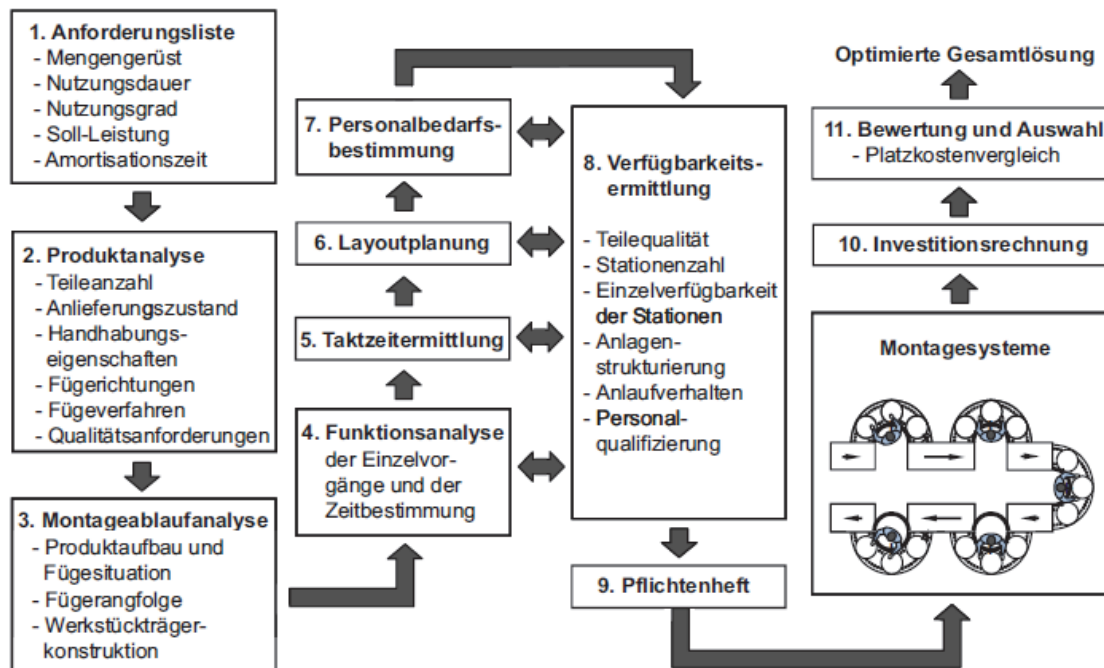
Hartel (2012, S. 367) zitiert das Montageplanungsverfahren von Lotter (1992) und erweitert dieses klassische Verfahren im Sinne einer absatzsynchrone Montageplanung, die variierende Stückzahlen während der Lebenszyklusphasen der Produkte in Betracht zieht. Damit werden unterschiedliche Ausbauphasen des Montagesystems definiert, um pro Zeitabschnitt jeweils der wirtschaftlichsten Lösung Rechnung zu tragen.

Die Planungssystematik nach Hartel umfasst 11 Planungsstufen. In Stufe 1 werden Eckdaten der Planung innerhalb einer Anforderungsliste zusammengestellt. Unter anderem erfolgt eine Rückrechnung des Investitionsvolumens aus der Amortisationszeit und der Nutzungsdauer. Stufe 2 ist die Analyse des Produkts mit dem Ziel der Festlegung des Automatisierungsgrads. Es werden hierbei Stückzahlen, Fügerichtungen und Fügeverfahren sowie Handhabungseigenschaften und Qualitätsanforderungen analysiert. In Stufe 3 wird der Montageablauf analysiert und als dessen Ergebnis die produktspezifischen Vorranggraphen erstellt. Die

---

<sup>46</sup> Die dynamische Optimierung ist ein Lösungsverfahren für sequenzielle Entscheidungsprobleme (Isebrecht 2008, S. 24).

anschließende Funktionsanalyse untergliedert die einzelnen Montagevorgänge bzw. Teilverrichtungen in deren Funktionsfolgen bzw. Bewegungselement nach den sich wiederholenden Grundvorgängen Ordnen, Zuführen, Fügen und Prüfen. Es folgen in den Stufen 5 bis 7 die Ermittlung der Taktzeit, der Entwurf des Layouts und die Bestimmung des Personalbedarfs. Die darauf folgende Überprüfung der Verfügbarkeiten bezüglich Qualität, Ressourcenanzahl und Verfügbarkeit sowie personenbezogene Qualifikationen lösen unter Umständen eine Überplanung und damit ein erneutes Durchlaufen der Stufen 4 bis 7 aus. Das in Stufe 9 zu erstellende Pflichtenheft dokumentiert die Planungsergebnisse der Stufen 1 bis 8, worauf in Stufe 10 eine Investitionsrechnung erfolgt, die über den Eigenbau oder Fremdbezug von Anlagen entscheidet. Stufe 11 stellt die verschiedenen Szenarien innerhalb einer Montagestückkostenrechnung gegenüber und benutzt Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung wie auch die Nutzwertanalyse zur Bewertung und Auswahl des favorisierten Gesamtszenarios.

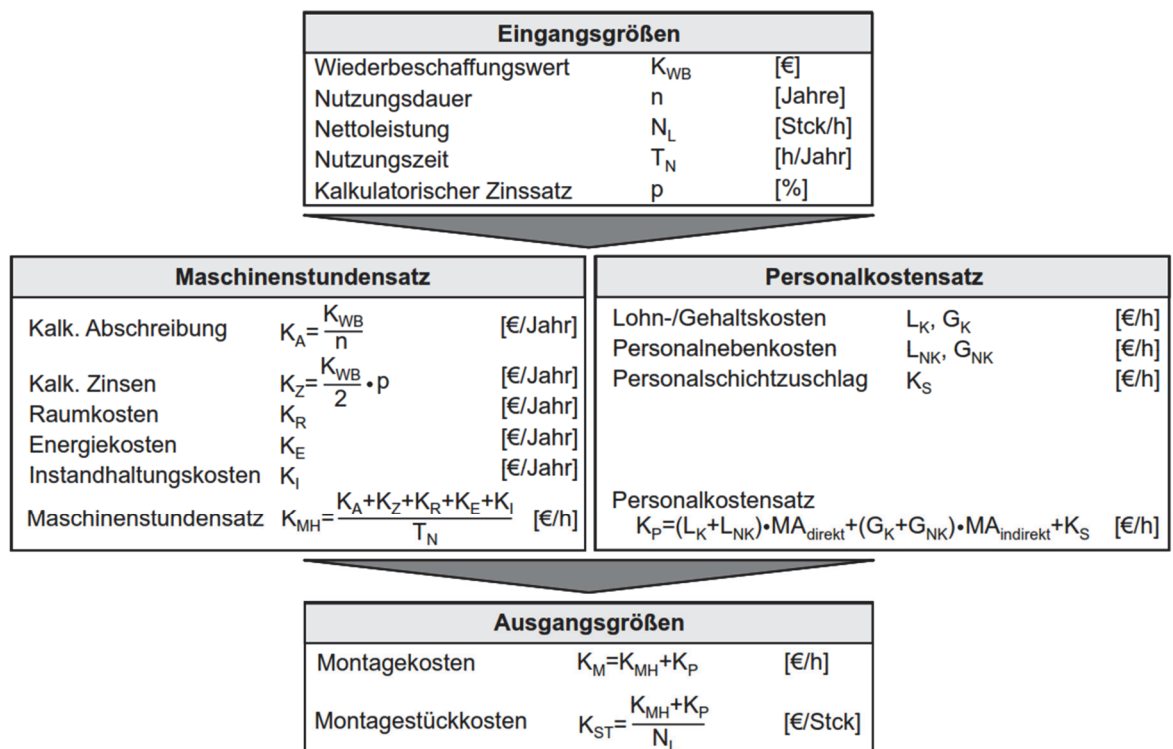


**Abbildung 22: Planungssystematik nach Hartel auf Basis von Lotter (2012)**

Hartel bezeichnet Montagesysteme dann als absatzsynchron, wenn diese möglichst wirtschaftlich dem Absatzverlauf im Produktlebenszyklus folgen. Es ergeben sich im

Vergleich zum klassischen Verfahren zusätzliche lebenszyklusabhängige Anforderungen. Diese Anforderungen sind stückzahlflexible Systeme aufgrund schwer einschätzbarer Nachfrage während des Anlaufs, variantenflexible Systeme in der Sättigungsphase und flexible wiederverwendbare Ressourcen während des Produktauslaufs. Deshalb erfolgt in Erweiterung der klassischen Verfahren die Definition bestimmter Planungsperioden mit Zuordnung entsprechender Ausbaustufen des Montagesystems, idealerweise aus modular aufgebauter und wiederverwendbarer Technik (vgl. Hartel, 2012, S. 367-377).

Zur Auswahl zwischen mehreren Montagelösungen bewertet Hartel Alternativen, indem die jeweiligen Montagestückkosten kalkuliert werden. Die Kosten teilen sich in die beiden Anteile Maschinenstundensatz und Personalkostensatz auf. Abbildung 23 zeigt das von Hartel (2012, S. 382) graphisch dargestellte Kalkulationsschema mit den relevanten Formeln.



**Abbildung 23: Kalkulationsschema Montagestückkosten nach Hartel (2012)**

Das von Hartel zitierte und erweiterte Verfahren Lotters deckt die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen bezüglich der relevanten Planungsschritte nur teilweise

ab. Es fehlt eine Berücksichtigung der Montagestrukturplanung auf Gesamt- und Teilsystemebene. Verschwendungsrelevante Zusammenhänge werden nicht betrachtet. Hartel erweitert den Ansatz von Lotter in Richtung einer absatzsynchronen Montagesystemgestaltung, jedoch ist dieser Ansatz nicht vollständig in das Stufenmodell im Sinne einer logischen Abfolge zusätzlicher Planungsschritte integriert.

### **4.2 Existierende EDV-Tools zur Planung von Montagesystemen**

Die Digitale Fabrik ist nach Westkämper (2009, S. 521) ein statisches Modell der Fabrik, sie enthält also Modelle der Objekte und Ressourcen einer Fabrik. Die Methoden der digitalen Fabrik – darunter ist auch die Optimierung inbegriffen – werden in verschiedenen Werkzeugen umgesetzt (vgl. Landherr 2013, S. 116). Es existiert eine Vielzahl am Markt befindlicher digitaler Werkzeuge, die für die Planung von Montagen eingesetzt werden können. Neben den vielen Aufgabenbereichen, die diese kommerziellen Systeme abdecken, soll im Folgenden speziell auf sogenannte CAPP-Systeme<sup>47</sup> eingegangen werden, die sich auf die Planung der Prozesse konzentrieren. Da die in Kapitel 3.1 definierten verschwendungsrelevanten Planungsschritte im Wesentlichen die in der Grobplanung definierten Inhalte fokussieren, wird eine Auswahl von Systemen betrachtet, die sich auf das in der Grobplanung betrachtete Zuordnungsproblem der Montageprozesse einerseits zum physischen Montagesystem (Stationen, Betriebsmittel etc.) und andererseits zum Produkt bzw. dessen Bestandteile (Baugruppen, Einzelteile) konzentrieren. Damit entfallen 3D-Visualisierungs- und Simulationsprogramme, die innerhalb der Feinplanung zur Ausplanung der Arbeitsplätze und Überprüfung der Machbarkeit oder Ergonomie von Prozessen verwendet werden. Bei der Auswahl der folgenden Systeme wurden im Besonderen Ansätze zur Ermittlung wertschöpfender und nicht wertschöpfender Arbeit berücksichtigt.

---

<sup>47</sup> Computer-Aided Process Planning-Systeme (Landherr 2013, S.118)

Die beiden führenden Marktanbieter von Werkzeugen der digitalen Fabrik sind die Softwarehäuser Siemens Industry Software GmbH & Co KG und das französische Unternehmen Dassault Systems. Der „Process Designer“ ist das entsprechende CAPP-Modul der Systemlösung von Siemens, der „Process Engineer“ das entsprechende Modul der Systemlösung Delmia von Dassault Systems. Beide Module enthalten ähnliche Funktionalitäten, weshalb die Grundfunktionalitäten exemplarisch am Beispiel des „Process Designers“ von Siemens dargestellt werden. Die Software erlaubt die Darstellung von Produkt, Prozess und Ressourcenelementen in Form von hierarchischen Baumstrukturen. Ist die Produktstruktur definiert, kann die Montagestruktur zunächst getrennt voneinander eingegeben werden, es können verschiedene Linien und deren Arbeitsstationen definiert werden. Es erfolgt dann eine Zuordnung der Prozesse zu den Stationen inklusive der notwendigen Betriebsmittel und der zu verbauenden Teile (vgl. Petzelt 2010, S. 55-60).

Bei der Bestimmung von Sollzeiten werden Systeme vorbestimmter Zeiten wie MTM benutzt. Das Line-Balancing wird unterstützt, indem z.B. Taktzeiten oder die Anzahl Takte verändert werden können. Eine Umplanung der Teilverrichtungen zu anderen Stationen wird grafisch durch Drag & Drop in Yamazumi-Diagrammen unterstützt. Der „Process-Designer“ ermöglicht dem Planer eine schnelle und übersichtliche Modellierung eines Montagesystems. Der Benutzer wird bei der Planung der Montagestruktur auf Ebene der Teilsysteme und Arbeitsstationen durch das Line-Balancing-Verfahren unterstützt. Die Planung des Groblayouts sowie die Planung der Bereitstellung sind funktionell enthalten. Dagegen stehen dem Planer bei Festlegung des Automatisierungsgrads und auch die bei der Erarbeitung der Montagestruktur auf der Ebene Gesamt-/Teilsystem keine Algorithmen zur Verfügung.

Hinsichtlich der Quantifizierung von Verschwendung können die Teilverrichtungen den Kategorien „wertschöpfend“ und „nicht wertschöpfend“ zugeordnet werden, wodurch das Erkennen und das Einschätzen des Verschwendungsausmaßes erleichtert wird. Aktive verschwendungsreduzierende Mechanismen sind nicht

erkennbar, der Planer muss die Optimierung selbst außerhalb des Systems vornehmen und die verbesserte Planungsalternative erneut eingeben und konfigurieren.

Ein weiteres auf dem Markt befindliches Produkt bietet die Firma ProPlanner an. Die Software „Assembly Planner“ in Kombination mit der Erweiterung „Advanced line-balancing module“ bildet ähnliche Funktionalitäten bezüglich der Montagesystemplanung ab wie der Process Designer. Im Fokus ist die Planung von Fließmontagen als einzelne Montageteilsysteme des Gesamtsystems mit Zuordnung der Teilverrichtungen zu Arbeitsstationen und Montagewerkern. Systeme vorbestimmter Zeiten wie MTM werden durch das Modul „TimeEstimationPro“ abgebildet. Es sind Auswertungen hinsichtlich der Wertschöpfung möglich, indem die Teilverrichtungen den Kategorien wertschöpfend und nicht wertschöpfend zugeordnet werden und aufsummiert werden.

Die Produkte von ProPlanner unterstützen nicht die Montagestrukturplanung auf Ebene Gesamt-/Teilsystem, ebenso wird die Bestimmung der Automatisierungsgrade nicht abgedeckt. Systematische verschwendungsvermeidende und reduzierende Mechanismen sind nicht erkennbar.

Speziell im Bereich der Zeitwirtschaft bietet die MTM Vereinigung Softwareunterstützung durch das Produkt TiCon an. TiCon bietet die Möglichkeit, definierte Teilverrichtungen gemäß des MTM-Systems vorbestimmter Sollzeiten in deren Bewegungselemente bzw. Grundvorgänge aufzuteilen. Analog der Systeme Process Designer und ProPlanner unterstützt auch TiCon die Gliederung in wertschöpfende und nicht wertschöpfende Arbeit, jedoch mit Hilfe einer vorhergehenden Kategorisierung durch den Planer. Mit der Fokussierung auf die Zeitwirtschaft werden andere in der Grobplanung auszuführende Planungsschritte wie beispielsweise die Groblayoutplanung oder die Bereitstellung nicht unterstützt.

### 4.3 Fazit

Die untersuchten Ansätze und Beschreibungsformen der ideellen und technischen Verfahren sowie der Funktionalitäten ausgewählter am Markt befindlicher Softwaretools bilden den Stand der Technik hinsichtlich der Forschungsfragen ab. Die Ansätze wurden anhand der in Kapitel 3 definierten Anforderungen gespiegelt, der jeweilige Grad der Erfüllung von Anforderungen ist aus der Kreuztabelle in Abbildung 24 auf der nächsten Seite zu entnehmen.

Für die Zielsetzung der Planung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen wurden insgesamt 6 relevante Planungsschritte identifiziert (vgl. Kapitel 3.1). Weder die untersuchten existierenden Verfahren noch die untersuchten IT-Werkzeuge am Markt decken alle 6 relevanten Planungsschritte in vollem Umfang ab.

Die ideellen Verfahren von Bullinger und Konold beinhalten einen Großteil der relevanten Planungsschritte, verwenden jedoch weder die als Anforderung definierten Modelle zur Darstellung der verschiedenen Montagesystemstrukturen (vgl. Kapitel 3.2) noch die darauf aufbauenden Algorithmen in Form von konkreten Berechnungen und Formeln (vgl. Kapitel 3.2 und 3.3).

Die zum Messen von Verschwendung notwendige Quantifizierung (vgl. Kapitel 3.4) bieten die untersuchten IT-Tools nur in Ansätzen. Die Funktionalitäten reduzieren sich auf das durch den Planer selbst auszuführende Zuordnen von Montageprozessen, die Verschwendung beinhalten. Die untersuchten Verfahren verzichten gänzlich auf eine Quantifizierung von Verschwendung nach deren verschiedenen Verschwendungsarten.

Heutige Montageplanungsverfahren reduzieren sich im Wesentlichen auf 2 Ansätze der Vermeidung von Verschwendung: einerseits wird Automatisierungspotenzial durch den Einsatz der Rationalisierungsmethode erschlossen und andererseits wird



Anforderungen Stand der Technik	Beinhaltung der für die Zielsetzung relevanten Planungsprozesse		Verfahrensablauf und analysierende Konstrukte		Beschreibende Konstrukte zur Montagesystem- Modellierung		Bewertende Konstrukte zur Sicherstellung der Zielsetzung		Anwendbarkeit des Verfahrens								
	Planung des Montageablaufs	Montagestrukturplanung auf Ebene Gesamt-/Teilsystem	Montagestrukturplanung auf Ebene Teilsystem/Arbeitsplatz	Bestimmung des Automatisierungsgrads	Planung der Montagegroblayout	Ermittlung Montagegroblayout	Planung der Teilebereitstellung	Verschwendung vermeidende/reduzierende Mechanismen	Überprüfungsmechanismen zur Machbarkeit	Abbildung mehrerer Produkte und Varianten	Modellierung unterschiedlicher Montagesystemstrukturen	Quantifizierung von Verschwendung/Wertschöpfung	Quantifizierung der Stückkosten	Berücksichtigung von Flexibilitätsgrößen	Branchenneutrales Verfahren	beherrschbare Komplexität	interaktive Miteinbeziehung des Planers
<b>Ideelle Planungsverfahren</b>																	
1986 Bullinger	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2003 Konold	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>Beschreibungsformen technischer Planungsverfahren</b>																	
1995 Zeile	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2002 Holle	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2004 Slama	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2008 Isebrecht	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2012 Hartel	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>IT-Werkzeuge am Markt</b>																	
- ProPlanner	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
- Process Designer	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
- TiCon Base (+PD+Takt)	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung 24: Vergleich des Stands der Technik mit den Anforderungen

MTM zum Zweck der Reduzierung von nicht wertschöpfenden Nebenzeiten eingesetzt. Dieser sequenzielle Ansatz stellt keine über die Planungsphasen integrierte Betrachtung dar, somit werden Rückwirkungen auf die in Kapitel 3.1 identifizierten verschwendungsrelevanten Planungsschritte der Segmentierung von Montagesystemen, der Automatisierung von Montageprozessen, der Austaktung von Montageteilsystemen sowie der Planung der Bereitstellung von Montageteilen nicht zusammenhängend betrachtet.

Es konnte kein heute existierendes Verfahren identifiziert werden, das systematisch alle 7 Verschwendungsarten über die Planungsphasen thematisiert. Eine Verwendung von Mechanismen zur systematischen Vermeidung bzw. Reduzierung aller 7 Verschwendungsarten (vgl. Kapitel 3.2) konnte weder bei den am Markt befindlichen IT-Tools noch bei den untersuchten Verfahren festgestellt werden.

Zusammenfassend lassen sich folgende Defizite feststellen:

- Es existieren keine Ansätze und planerischen Auslegungsmethoden zur Montageplanung, die alle 7 Verschwendungsarten systematisch vermeiden oder reduzieren.
- Die gestellten Anforderungen an die Abbildung einzelner Planungsprozesse für die detaillierte Betrachtung von Verschwendung erfordern eine breite, phasenübergreifend integrierte Abdeckung, die in den heutigen Verfahren nicht gegeben ist.
- Es konnte kein Bewertungsmodell festgestellt werden, das Verschwendung in absoluten Zahlen misst und darauf aufbauend Optimierungen zulässt.

Die festgestellten Defizite verhindern das Erschließen weiterer Kostensenkungspotenziale, vor allem bei Montagen mit hoher Stückzahl. Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit ein Verfahren zur Planung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen entwickelt.

---

## **5 Lösungsansatz zur Planung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen**

Kapitel 5 stellt den Lösungsansatz dieser Arbeit einschließlich der enthaltenen Elemente vor. Kapitel 5.1 analysiert zusammenfassend die Ziele und die Aufgabenstellung, darauf aufbauend leitet Kapitel 5.2 den Aufbau der einzelnen Elemente ab. Kapitel 5.3 fügt die hergeleiteten Elemente zum Gesamtlösungsansatz zusammen.

### **5.1 Analyse der Ziel- und Aufgabenstellung**

Die Ziel- und Aufgabenstellung folgt zum einen aus den in Kapitel 1.3 definierten Forschungsfragen, wie die Verschwendung in getakteten Fließmontagen messbar gemacht werden kann, und welche Schritte dafür notwendig sind, um die Verschwendung zu reduzieren. Zum anderen soll das neue Verfahren zur Planung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen die in Kapitel 3 definierten Anforderungen erfüllen, um die im Fazit (vgl. Kapitel 4.3) beschriebene Forschungslücke zu schließen.

Folgende zu lösende Aufgaben entstehen zusammenfassend durch Spiegelung der Forschungsfragen an den Anforderungen:

- Die 7 Verschwendungsarten sind innerhalb des Planungsprozesses quantifizier-, mess- bzw. berechenbar.
- Das Verfahren bildet die verschwendungsrelevanten Planungsphasen und –schritte der Montageplanung ab, d.h. es ist eine Ablaufstruktur für die Reduzierung von Verschwendung identifiziert und implementiert.
- Das Verfahren enthält Verschwendung vermeidende und reduzierende Mechanismen zur Sicherstellung der Zielsetzung.
- Das Verfahren ermöglicht den Aufbau eines Modells zur Beschreibung von Montagesystemen.

- Das Modell zur Beschreibung von Montagesystemen ist so aufgebaut, dass unterschiedliche Montagesystemstrukturen und verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten abgebildet werden können.
- Das Modell zur Abbildung von Montagesystemen ist individuell konfigurierbar und dadurch in der Lage, Planungsszenarien mit geringem Verschwendungsanteil zu generieren.
- Algorithmen auf Modellbasis dienen zur Berechnung von Kennzahlen, die zur Zielerreichung beitragen.
- Der Anwender des Verfahrens erhält Entscheidungsunterstützung zur Auswahl bei mehreren generierten Planungsszenarien.
- Zur Sicherstellung der Machbarkeit bzw. der Korrektheit des im Modell abgebildeten Montagesystems werden Überprüfungsmechanismen verwendet. Der Anwender kann auf diese Mechanismen zurückgreifen.
- Das Verfahren ermittelt Stückzahlkosten auf Basis der erstellten Modelle.
- Durch die Reduzierung von Verschwendung sollen Kostensenkungspotenziale des Lean Managements zum Zeitpunkt des Anlaufs bereits gehoben werden.
- Flexibilitätsrelevante Größen sind im Verfahren enthalten.
- Das Verfahren ist branchenneutral für variantenreiche Serienfertiger anwendbar, verfügt über eine beherrschbare Komplexität und bezieht den Planer interaktiv in die Planung mit ein.

### **5.2 Ableitung der Elemente des Lösungsansatzes**

Auf Basis der im vorigen Unterkapitel genannten Ziel- und Aufgabenstellung lassen sich Elemente des Lösungsansatzes definieren. Die für das Planungsverfahren notwendigen einzelnen Modelle werden zweckmäßig in der Folge als Basismodelle bezeichnet, da sie die Grundlage für das Verfahren bilden. Es lassen sich auf oberster Ebene verschiedene Basismodelle und das Verfahren selbst als Elemente des Lösungsansatzes unterscheiden.

Die Basismodelle gliedern sich nach deren zu erfüllenden Aufgaben (vgl. Kapitel 2.4, 3.3 und 3.4): es lassen sich beschreibende und bewertende Basismodelle unterscheiden. Betrachtet man die bewertenden Basismodelle, ergibt sich aus der Zielsetzung in Kapitel 1.2, dass sowohl die Verschwendung als auch die Stückkosten zu quantifizieren sind. Neben den bewertenden Elementen ist ein Modell zur Beschreibung von verschwendungsarmen Fließmontagen zu gestalten. Unter Verwendung der im Grundlagenkapitel dargestellten Systemelemente einer Montage (vgl. Kapitel 2.1) lassen sich 3 Arten von Elementen erkennen, die ein Montagesystem beschreiben:

- produktrelevante Elemente
- den Arbeitsinhalt
- Elemente zur Beschreibung des physischen Montagesystems wie Linien, Arbeitsstationen oder –plätze, einzelne Betriebsmittel sowie Bereitstellungsgebäude.

Der Ablauf des Verfahrens skizziert das Vorgehen der Planung von verschwendungsarmen Fließmontagen. Die Abgrenzung der relevanten Planungsphasen und –schritte für die in dieser Arbeit gesetzte Zielstellung erfolgte in Kapitel 3.1. Dort wurden die Teilschritte als Anforderung für eine Planung von verschwendungsarmen Montagesystemen identifiziert (vgl. Kapitel 3.1, Abbildung 14). Für den Entwurf des neuen Verfahrens werden diese Teilschritte berücksichtigt, d.h. es erfolgt aus dieser Analyse eine neue Zusammensetzung von Phasen und Schritten gemäß der Relevanz hinsichtlich der Reduzierung von Verschwendung.

### **5.2.1 Entwurf der Basismodelle für das Verfahren**

Wie in den Anforderungen bezüglich bewertender Konstrukte bereits hergeleitet (vgl. Kapitel 3.4), sind Elemente des Verfahrens notwendig, die einen bewertenden Vergleich zwischen verschiedenen Planungsszenarien zulassen, um darauf basierend eine Auswahl treffen zu können. Es wird je ein Basismodell zur Bewertung von

Verschwendung und ein Basismodell zur Bewertung der Stückkosten getrennt voneinander definiert.<sup>48</sup>

Das Basismodell zur Bewertung von Verschwendung ermöglicht eine Messung in absoluten Zahlen, um gemäß der Aufgabenstellung nachweislich die Verschwendung in getakteten Fließmontagen reduzieren zu können (vgl. Kapitel 1.3 und Kapitel 5.1) und unterschiedliche Planungsvarianten von Fließmontagen anhand der Verschwendung zu vergleichen. Die Quantifizierung erfolgt über zu definierende Kennzahlen je Verschwendungsart, es sind alle 7 Arten von Verschwendung in getakteten Fließmontagen (vgl. Kapitel 2.2) abzudecken. Auf Basis der Kennzahlen erfolgt die Bewertung des Anteils der durch Verschwendung verursachten Stückkosten (im Folgenden als Verschwendungsstückkosten bezeichnet).

Das Basismodell zur Bewertung von Wirtschaftlichkeit erfolgt auf Basis der Berechnung von Montagestückkosten unter der in Kapitel 3.4 getroffenen Annahme konstanter Preise.

In Kapitel 2.4 wurden beschreibende Konstrukte als Elemente eines Verfahrens genannt, die in der Lage sind, das Planungsergebnis trotz vielfältiger theoretisch möglicher Ausprägungsformen und komplexer Zusammenhänge der Teilgestaltungsbereiche untereinander eindeutig beschreiben. Um die verschwendungsreduzierte Fließmontage eindeutig zu definieren und sukzessive während des Planungsverfahrens entwickeln zu können, wird auch hier der Ansatz der Modellbildung gewählt.

Das Basismodell Produkt bildet gemäß der Systemelemente einer Montage (vgl. Kapitel 2.1) alle produktrelevanten Elemente wie die als Input bezeichneten zu montierenden Einzelteile und Baugruppen sowie die als Output bezeichneten in der Montage zu fertigenden End- bzw. Zwischenerzeugnisse ab.

Das Basismodell Prozess beinhaltet den Arbeitsinhalt, also die auszuführenden Montageprozesse, die sich aus der Aufbaustruktur der Produkte ableiten.

---

<sup>48</sup> Vgl. hierzu die Unterscheidung von Kosten und Verschwendung in Kapitel 3.4.

Ergänzend zu den beschreibenden Basismodellen Produkt und Prozess enthält das Basismodell physisches Montagesystem die Elemente zur Beschreibung der Fließmontagen wie z.B. Linien, Arbeitsstationen oder –plätze, einzelne Betriebsmittel und Bereitstellungsgebäude.

Die wesentliche Aufgabe des Planungsverfahrens besteht nicht nur in der Modellierung von Produkt, Prozess und des physischen Montagesystems, vielmehr vervollständigt erst das Element der Beziehungen zwischen den Basismodellen die Beschreibung des Montagesystems. Dieses System ist nur dann vollständig beschrieben, wenn zu montierende Teile den entsprechenden Montageprozessen zugeordnet sind bzw. wenn der Bearbeitungsort und der Zeitpunkt in Form des Arbeitsplatzes oder des montierenden Mitarbeiters eindeutig zugewiesen sind.

### **5.2.2 Entwurf des Verfahrensablaufs**

Die in der Anforderungsanalyse zu ermittelnden Informationen (vgl. Abbildung 14) werden in dieser Arbeit unter der Phase 1 „Planungsbasis ermitteln“ zusammengefasst. Es werden hier alle für das Verfahren notwendigen und zu verarbeitenden Eingangsgrößen spezifiziert.

Phase 2 umfasst die Eingabe und Verarbeitung des Ablaufs der Fügeprozesse und deckt die planerischen Inhalte der Montageablaufplanung ab (vgl. Abbildung 14).

In der dritten Phase erfolgt das „Segmentieren“ des Montagesystems in dessen Teilsysteme. Wie in Kapitel 3.1 als Anforderung definiert, werden innerhalb dieser Stufe alle planerischen Tätigkeiten ausgeführt, die die Montagestruktur auf der Ebene Gesamt- und Teilsystem festlegen.

In den folgenden Phasen 4 und 5 wird der Automatisierungsgrad bestimmt und darauf die Montagestruktur auf Ebene Teilsystem und Arbeitsplatz geplant. Es wird zusammenfassend der Begriff „Linie planen“ verwendet, da dieser Schritt alle Tätigkeiten beschreibt, die zur Spezifikation des Teilsystems „Linie“ notwendig sind. Die Planungsphase umfasst unter anderem auch die Berechnung des

stückzahlabhängigen Kundentakts auf Basis der zu montierenden Teil- oder Enderzeugnisse pro Linie (vgl. Abbildung 14).

Phase 6 konzentriert sich auf die Planung der Teilebereitstellung (vgl. Schritt 4.7 in Abbildung 14), während Phase 7 das grobe Layout des Montagesystems entwirft. Phase 7 entspricht der Arbeitsplatzanordnung und -verkettung (Schritt 4.5 in Abbildung 14).

Die Phase 8 bewertet abschließend die bei der Planung entstandenen verschiedenen Planungsszenarien miteinander und identifiziert das Planungsszenario mit der höchsten Zielerreichung.

### **5.3 Synthese der Elemente zum Gesamtkonzept**

Die verschiedenen Elemente des Lösungsansatzes aus Kapitel 5.2 werden zu einem Gesamtkonzept zusammengefügt. Da der Ansatz verfolgt wird, dass das Verfahren Basismodelle verwendet, um während des Ausführens der einzelnen Planungsschritte das Modell des Montagesystems aufzubauen, wird mit der Entwicklung der Basismodelle begonnen.<sup>49</sup> Als erstes wird das Basismodell zur Bewertung von Verschwendung beschrieben, da die zu definierenden Kennzahlen auf die Abbildung des Montagesystems Bezug nehmen, also Folgebedingungen erstellen, z.B. in Form von Bewertungsgrößen, die sich im beschreibenden Modell eines Montagesystems wiederfinden müssen. Es folgen nacheinander die 3 Basismodelle zur Beschreibung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen in der Reihenfolge Produkt, Prozess und physisches Montagesystem. Die zusammenführenden Beziehungen dieser 3 Modelle bauen auf den einzelnen Basismodellen auf, weshalb sie unmittelbar im Anschluss beschrieben werden. Das Basismodell zur Bewertung

---

<sup>49</sup> Generell ist die Reihenfolge der Entwicklung der Basismodelle von der Reihenfolge der Nutzung im Verfahren zu unterscheiden. Der hier gewählte Begriff „Basismodell“ macht deutlich, dass zunächst unspezifische allgemeine Basismodelle entwickelt werden, die dann während der Verfahrensschritte zu einem je nach Anwendungsfall spezifischen Modell zusammengefügt werden.



der Wirtschaftlichkeit wird nach den 3 Basismodellen zur Beschreibung verschwendungsarmer Fließmontagen inklusive deren Beziehungen entworfen, da die Algorithmen zur Berechnung der Stückkosten auf den Systemelementen einer getakteten Fließmontage aufbauen. Bevor die Beschreibung der 8 Phasen des Verfahrens und deren Planungsschritte erfolgt, komplettiert die modellbasierte Bewertung der durch Verschwendung verursachten Kosten die Beschreibung der Basismodelle.

Das in Abbildung 25 dargestellte Gesamtkonzept des Lösungsansatzes vereinigt die verschiedenen Elemente miteinander und stellt deren Reihenfolge der Entwicklung von links nach rechts dar.

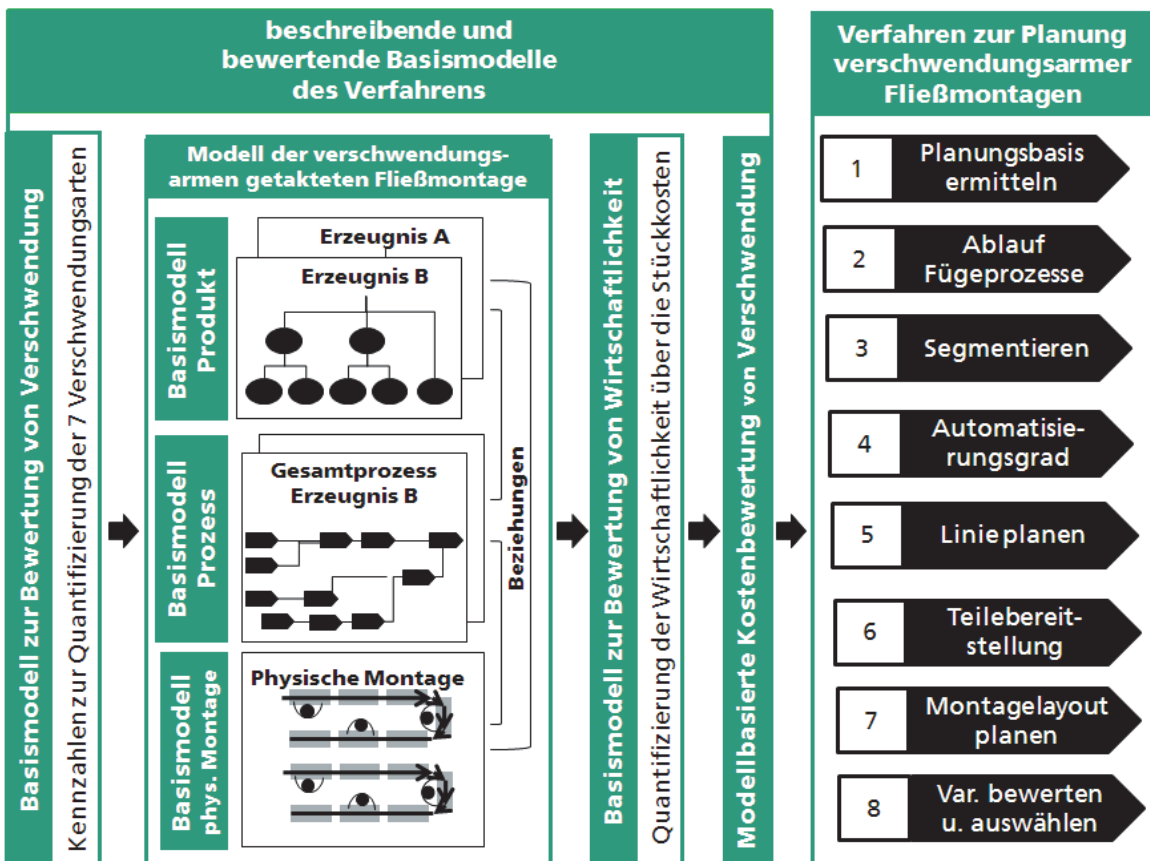


Abbildung 25: Gesamtkonzept des Lösungsansatzes und deren Elemente

---

## **6 Basismodelle zur Gestaltung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen**

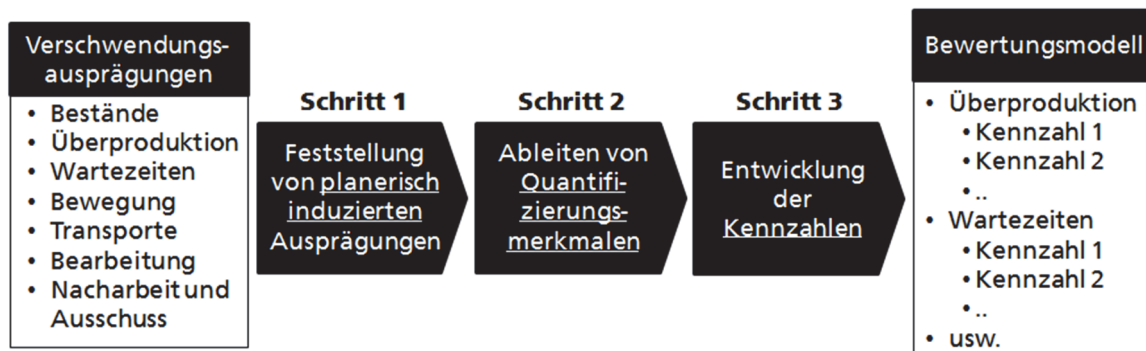
Kapitel 6 beschreibt den Aufbau der zu verwendenden Basismodelle im Detail. Kapitel 6.1 führt das Basismodell zur Bewertung von Verschwendung ein. Die Unterkapitel 6.2, 6.3 und 6.4 detaillieren die Basismodelle zur Abbildung von Produkt, Prozess und der physischen Montage. Kapitel 6.5 stellt die Beziehungen zwischen den 3 Teilmodellen dar, während in Kapitel 6.6 das Basismodell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit über die Quantifizierung der Montagestückkosten beschrieben wird. Unterkapitel 6.7 schließt die Detailbeschreibung der Basismodelle mit der modellbasierten Kostenbewertung von Verschwendung.

### **6.1 Basismodell zur Bewertung von Verschwendung**

Gemäß der Anforderung beschreibender Konstrukte zur Abbildung des Montagesystems (vgl. Kapitel 5.1) ist ein virtuelles Modell zu erschaffen, das nach dem hier gewählten Ansatz aus den Basismodellen Produkt, Montageprozess und dem physischen Montagesystem besteht. Das hier im Detail beschriebene Basismodell zur Bewertung von Verschwendung hat die Aufgabe, während der Planung das virtuell modellierte Montagesystem auf das Vorhandensein von Verschwendung zu prüfen. Das Definieren von Kennzahlen zur Verschwendungsmessung erfolgt auf Basis der in Kapitel 2.2 erläuterten 7 Verschwendungsarten, deren Ausprägung in Montagesystemen und der Ursache-Wirkungs-Beziehungen.

Die in Abbildung 9 und Abbildung 10 zusammengefassten Inhalte umfassen generelle Ausprägungen und Ursachen von Verschwendung in getakteten Fließmontagen, diese enthalten sowohl bereits durch die Planung induzierte Ausprägungen wie auch solche, die erst bei der Ausführung der Tätigkeiten während des Betriebs ausgelöst werden. Da letztere Ausprägungen und Ursachen für ein Planungsverfahren nicht relevant sind, werden diese in der Folge nicht weiter

berücksichtigt. Deshalb werden die 7 Verschwendungsarten der Reihe nach untersucht, indem zunächst die planerisch induzierten Ausprägungen herausgearbeitet werden. Danach werden aus diesen Ausprägungen Quantifizierungsmerkmale definiert und auf Basis dieser Merkmale schließlich Kennzahlen entwickelt. Abbildung 26 stellt die Vorgehensweise zur Entwicklung des Bewertungsmodells grafisch dar.



**Abbildung 26: Vorgehensweise zur Entwicklung des Bewertungsmodells**

### 6.1.1 Kennzahlen zur Feststellung von Beständen

Abbildung 9 aus Kapitel 2.2 zeigt verschiedene Ausprägungen von Verschwendung in Montagesystemen, die durch Bestände verursacht werden. Die vorhandenen WIP-Bestände<sup>50</sup> eines Montagesystems können in den Bestand innerhalb und zwischen Montageteilsystemen sowie dem bevorrateten Material zum Verbau eingeteilt werden. Der WIP-Bestand innerhalb von Montageteilsystemen besteht unter anderem aus standardisierten Puffern, sie werden zum Ausgleich von Montagezeitschwankungen zwischen Mitarbeitern benutzt. An der Übergabestelle werden solche Puffer eingerichtet, damit der Mitarbeiter, der nachfolgende Montage-tätigkeiten ausführt, nicht auf die Fertigstellung der vorgelagerten Montage-tätigkeiten warten muss. Standardisierte Puffer sind planerisch induziert.

Werden Montageschritte physisch voneinander getrennt und zeitlich entkoppelt, entstehen Montageteilsysteme. Durch die zeitliche Entkopplung entstehen Bestände

---

<sup>50</sup> Vgl. die Definition von Tautrim in Kapitel 2.2.

zwischen den Montageteilsystemen wie z.B. zwischen Vor- und Endmontage. Diese Entkopplungen sind planerisch induziert, die Bestände zwischen den Montageteilsystemen entstehen durch die Segmentierung der Montage in deren Montageteilsysteme.

Die Bestände der zu montierenden Teile, die im jeweiligen Montageteilsystem bereitgestellt werden, sind planerisch induziert, wenn eine systematische Versorgung der Teile in Form von definierten Zeitintervallen zum Nachschub des Materials in einer definierten Menge erfolgt. Diese Form der Materialversorgung wird hier als Prämisse für das später detaillierte Verfahren definiert, da durch einen unkontrollierten Nachschub von Material z.B. durch hohe Lose vorangehender Wertschöpfungsstufen wertvoller Platzbedarf verschwendet wird.

Zusammenfassend sind als Quantifizierungsmerkmale das Erfassen und Messen der verschiedenen Bestandsarten eines Montagesystems zu erkennen. Das bedeutet im Einzelnen die Berücksichtigung des WIP-Bestands, u.a. auch die Berücksichtigung von standardisierten Puffern, sowie den durch Entkopplung verursachten Bestand zwischen Montageteilsystemen und den Montagebestand der bereitgestellten Teile.

Der WIP-Bestandswert wird als erste Kennzahl I1 definiert.<sup>51</sup> Die Formel zur Berechnung der Kennzahl I1 leitet sich ab aus der in Kapitel 2.2 angegebenen Formel für Bestandswerte (Stückzahl multipliziert mit dem Einstandspreis). Der WIP-Bestandswert eines Montageteilsystems errechnet sich aus der Summe der Anzahl standardisierter Puffer SP zur Vermeidung von Wartezeiten bzw. zur Einhaltung des Takts, der Anzahl Takte AT und des durchschnittlichen Montageerzeugnis-Bestands MEB. Diese Stückzahlen sind mit den entsprechenden Teilwerten des Montage-

---

<sup>51</sup> Hier wird unter WIP-Bestand einerseits die Halbfertigware und die Fertigware eines Montageteilsystems zusammengefasst unter Verwendung der Definitionen von Tautrim und Hermann in Kapitel 2.2.

erzeugnisses TWME nach Bearbeitung im MTS und des Zwischenerzeugnisses TWZE vor Bearbeitung im MTS in folgender Weise<sup>52</sup> zu multiplizieren:

$$I1 = (SP + AT) * \left( \frac{TWME + TWZE}{2} \right) + \emptyset MEB * TWME \quad (6.1)$$

Der WIP-Bestandswert des gesamten Montagesystems errechnet sich durch die Summe der WIP-Bestandswerte der einzelnen Montageteilsysteme.

Die Formel zur Berechnung der WIP-Reichweite I2 innerhalb eines Montageteilsystems ergibt sich unter Verwendung der in Kapitel 2.2 beschriebenen Definition der Lagerreichweite. Betrachtet man das Montageteilsystem als Versorgungseinheit für nachfolgende Prozesse, so stellen die im Teilsystem befindlichen halbfertigen Zwischenerzeugnisse und die fertigen Montageerzeugnisse am Ende der Bearbeitung zusammen einen Pufferbestand dar, der für eine gewisse Zeit die Produktion aufrechterhält. Damit ergibt sich die WIP-Reichweite I2 aus der Summe der Anzahl zusätzlicher standardisierter Puffer SP zur Vermeidung von Wartezeiten bzw. zur Einhaltung des Takts, der Anzahl Takte AT und des durchschnittlichen Montageerzeugnis-Bestands MEB, multipliziert mit dem Montagetakt MT:

$$I2 = (SP + AT + \emptyset MEB) * MT \quad (6.2)$$

Die Prozessentkopplung verursacht Bestände zwischen Montageteilsystemen, wie z.B. bei Vor- und Endmontage. Diese Zwischenerzeugnis-Bestände sind daher nicht Teil der bereits behandelten WIP-Bestände innerhalb der Montageteilsysteme und werden über 2 weitere Kennzahlen abgebildet. Zum einen identifiziert die Kennzahl I3 den Zwischenerzeugnis-Bestandswert, indem die Summe der durchschnittlichen Bestandswerte BW von  $n$  verschiedenen Zwischenerzeugnissen ZE kumuliert wird:

$$I3 = \sum_{i=1}^n \emptyset BW(ZEi) \quad (6.3)$$

---

<sup>52</sup> Zur vereinfachten Berechnung wird ein stetig linearer Wertzuwachs des Teilewerts vom ins Montagesystem einfließenden Zwischenerzeugnis bis zum ausfließenden Montageerzeugnis angenommen.

Zum anderen ermittelt die Zwischenerzeugnis-Reichweite I4 den Verlust an Durchlaufzeit, indem der durchschnittliche Stückbestand  $SB$  des Zwischenerzeugnisses  $i$  mit dem Montagetakt  $KT$  multipliziert wird:

$$I4_i = \emptyset SB(ZEi) \times MT \quad (6.4)$$

Innerhalb eines Montageteilsystems ist neben dem WIP-Bestand der Montagebestand der zu verbauenden Montageteile zu berücksichtigen. Analog der letzten Kennzahlen I1 und I3 errechnet sich der Montagebestandswert I5 aus der Stückzahl multipliziert mit dem Teilewert und damit der Summierung des durchschnittlichen Bestandswerts  $BW$  der  $n$  Montageteile  $MTLi$ :

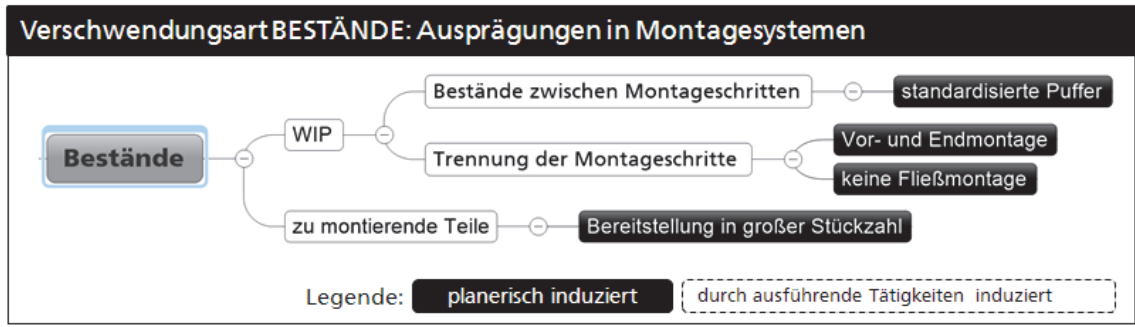
$$I5 = \sum_{i=1}^n \emptyset BW(MTLi) \quad (6.5)$$

I5 bezieht sich auf die Montageteile eines Montageteilsystems. Der Montagebestandswert des gesamten Montagesystems errechnet sich aus der Summe der Werte der einzelnen Teilsysteme.

Die Montagebestandsreichweite I6 errechnet die Zeit, wie lange ein Material ohne Nachschub verfügbar ist. Dabei wird der Stückbestand  $SB$  eines Montageteils  $MTL$  mit dem Montagetakt  $MT$  multipliziert. Es lassen sich für alle  $i=1$  bis  $n$  Montageteile die jeweilige Montagebestandsreichweite  $I6$  berechnen. Der Durchschnitt der einzelnen Reichweiten repräsentiert die Montagebestandsreichweite eines Montageteilsystems:

$$I6 = \frac{\sum_{i=1}^n SB(MTLi) \times MT}{n} \quad (6.6)$$

Abbildung 27 zeigt zusammenfassend die Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Beständen in Montagesystemen.



**Quantifizierungsmerkmale**

- Erfassung der WIP-Bestände
- Erfassung standardisierten Puffer
- Entkoppelte Vormontagen
- Reichweite der bereitgestellten Montageteile

ID	Kennzahl	Beschreibung der Kennzahl und vereinfachte Formel	Einheit
I1	WIP-Bestandswert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>(\text{Anzahl Takte} + \text{standardisierte Puffer}) * \text{mittlerer Montageerzeugnis-Wert} + \text{durchschnittlicher Montageerzeugnis-Bestand} * \text{Montageerzeugnis-Wert}</math></li> <li>• „Work in Process“ Bestandswert im Montageteilsystem</li> </ul>	€
I2	WIP-Reichweite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>(\text{Anzahl Takte} + \text{standardisierte Puffer} + \text{durchschnittlicher Montageerzeugnisbestand}) * \text{Montagetakt}</math></li> <li>• entspricht der Durchlaufzeit</li> </ul>	s, min, h
I3	Zwischenerzeugnis-Bestandswert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\sum \text{durchschnittliche Zwischenerzeugnis-Bestandswerte}</math></li> <li>• entspricht dem Wert an Beständen zwischen Montageteilsystemen</li> </ul>	€
I4	Zwischenerzeugnis-Reichweite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\text{Stückbestand} * \text{Montagetakt}</math></li> <li>• Reichweite des Zwischenerzeugnis-Bestands</li> <li>• entspricht dem Verlust an Durchlaufzeit</li> </ul>	s, min, h
I5	Montagebestands-wert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\sum \text{durchschnittliche Montageteilbestandswerte}</math></li> <li>• entspricht dem Bestandswert an zu montierenden Teilen</li> </ul>	€
I6	Montagebestands-Reichweite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\text{durchschnittl. Stückbestand Montageteile} * \text{Montagetakt}</math></li> <li>• Reichweite des Montagebestands</li> </ul>	s, min, h

Abbildung 27: Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Beständen

### 6.1.2 Kennzahlen zur Feststellung von Überproduktion

Die Abbildung 9 aus Kapitel 2.2 zeigt die Ausprägungen von Überproduktion in Montagesystemen. Ist der Montagetakt kleiner als der Kundentakt, wird schneller als notwendig produziert, es entsteht Verschwendung durch Überproduktion. Diese Ausprägung kann sowohl bereits durch die Planung induziert als auch durch ausführende Tätigkeiten während der Betriebsphase induziert sein. Für den hier zu bearbeitenden Fokus auf die Phase der Planung sind Quantifizierungsmerkmale festzustellen, wenn der geplante Montagetakt bewusst kleiner dem Kundentakt

gewählt wurde wie z.B. zur Kompensation von Maschinenausfällen. Sind z.B. zu viele Mitarbeiter innerhalb einer flexiblen Montagelinie im Einsatz, wird mehr montiert als notwendig, was bewirken kann, dass der Montagetakt geringer als der Kundentakt wird. Eine weitere planerisch induzierte Ausprägung von Überproduktion ist die Entkopplung von Montageprozessen bei Verwendung von Vormontagen. Dagegen hat das Vorarbeiten während der Serie an bestimmten oder auch allen Arbeitsplätzen innerhalb der Linie keine planerische Relevanz und wird deshalb nicht weiter betrachtet.

Es lassen sich zusammenfassend folgende 3 Quantifizierungsmerkmale ableiten: der Montagetakt ist mit dem Kundentakt zu vergleichen, entkoppelte Prozesse verursachen zusätzliche Bestände, die zu messen sind, und es ist die Anzahl der eingesetzten MA zu betrachten.

Das Quantifizierungsmerkmal des Vergleichs von Montage- und Kundentakt wird mit mehreren Kennzahlen belegt. Die Überproduktionszeit  $\ddot{U}1$  entspricht der Differenz aus dem geplanten Montagetakt  $MT$  und dem Kundentakt  $KT$ , sie gibt die Zeit an, die schneller gearbeitet wird als notwendig:

$$\ddot{U}1 = KT - MT \quad (6.7)$$

Da die Überproduktionszeit eine abstrakte Aussagekraft bezüglich des Ausmaßes von Verschwendung enthält, werden weitere Kennzahlen definiert. Die Montagetaktabweichung  $\ddot{U}2$  gibt den prozentualen Anteil an, um wieviel der Kundentakt unterschritten wurde. Dieser Anteil errechnet sich aus dem Montagetakt  $MT$  und dem Kundentakt  $KT$  wie folgt:

$$\ddot{U}2 = 100 - \left(100 \times \frac{MT}{KT}\right) \quad (6.8)$$

Die dritte Kennzahl  $\ddot{U}3$  ist die Taktverschwendung und verdeutlicht die Anzahl Takte, die aufgrund des kürzeren Montagetakts im Vergleich zum Kundentakt zusätzlich im physischen Montagesystem umgesetzt werden müssen. Die Berechnung erfolgt durch einen Vergleich der minimal möglichen Anzahl Takte eines Montageteilsystems einerseits bei Auslegung am Kundentakt und andererseits bei Auslegung am tatsächlich gewählten Montagetakt. Die Berechnung einer minimal möglichen



Anzahl Takte eines Montageteilsystems leitet sich aus dem Taktzeitdiagramm (vgl. die Phase 4 „Grobplanung des Montagesystems“ aus Kapitel 2.3) ab. Bildet man die Summe aller Teilverrichtungssollzeiten und geht man von einer optimalen Aufteilung ohne Taktzeitverlust<sup>53</sup> auf eine bestimmte Anzahl Takte aus, so errechnet sich die minimale Anzahl Takte aus dem Quotienten der Summe aller Teilverrichtungssollzeiten und dem Takt. Daraus ergibt sich folgende Berechnung zur Anzahl zusätzlich umzusetzender Takte aufgrund des Deltas von Montage- zu Kundentakt:

$$\ddot{U}3 = \left\{ INT \left( \frac{\sum TVZ}{MT} \right) + 1 \right\} - \left\{ INT \left( \frac{\sum TVZ}{KT} \right) + 1 \right\} \quad (6.9)$$

Das Quantifizierungsmerkmal der durch Prozessentkopplung verursachten Bestände wurde bereits in 2 Kennzahlen bei der Betrachtung der Verschwendungsart Bestände umgesetzt.<sup>54</sup> Die Kennzahl  $\ddot{U}4$  entspricht dem Zwischenerzeugnis-Bestandswert I3, es wird die Summe der durchschnittlichen Bestandswerte *BW* von *n* verschiedenen Zwischenerzeugnissen *ZE* kumuliert, dabei entsprechen die Zwischenerzeugnis-Bestände den Puffern oder Lagern zwischen Montageteilsystemen:

$$\ddot{U}4 = I3 = \sum_{i=1}^n \phi BW(ZEi) \quad (6.10)$$

Die Zwischenerzeugnis-Reichweite  $\ddot{U}5$  entspricht der Kennzahl I4, sie berechnet sich aus dem Stückbestand des Zwischenerzeugnisses multipliziert mit dem Montagetak *MT*:

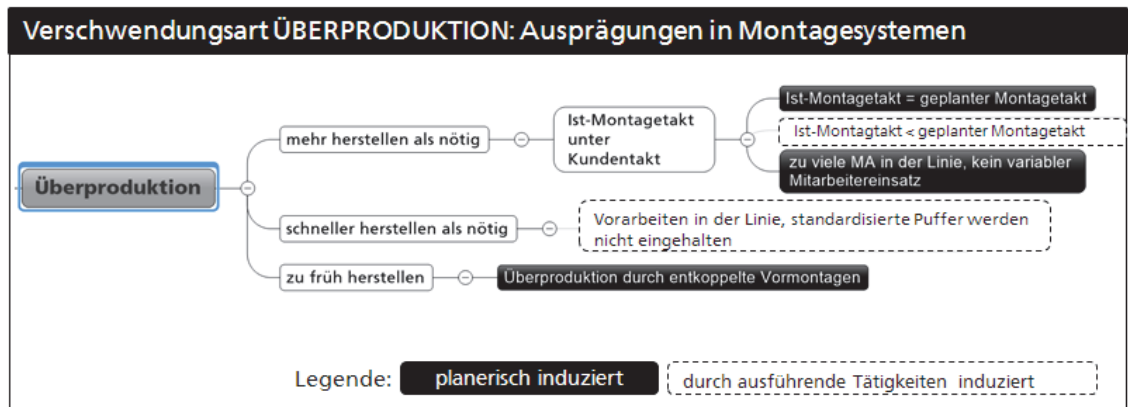
$$\ddot{U}5 = I3_i = \phi SB(ZEi) \times MT \quad (6.11)$$

Zusammenfassend zeigt die Abbildung 28 die Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Überproduktion. Die planerisch induzierten Ausprägungen von Verschwendung in Montagesystemen sind schwarz markiert und die durch ausführende Tätigkeiten induzierten in grauer Farbe dargestellt.

---

<sup>53</sup> vgl. die Verschwendung durch Wartezeiten in Kapitel 2.2

<sup>54</sup> vgl. hierzu die Kennzahlen I3 und I4 in Abbildung 27



**Quantifizierungsmerkmale**

- Vergleich von Montagetakt zu Kundentakt
- Anzahl MA in der Linie
- durch entkoppelte Vormontagen erzeugter Bestand

ID	Kennzahl	Beschreibung der Kennzahl und vereinfachte Formel	Einheit
Ü1	Überproduktionszeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kundentakt - Montagetakt</li> <li>• Zeit, die schneller gearbeitet wird als notwendig</li> </ul>	s, min
Ü2	Montagetaktabweichung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>100 - (100 * (\text{Montagetakt} / \text{Kundentakt}))</math></li> <li>• gibt an, um wieviel % zu schnell produziert wird</li> </ul>	%
Ü3	Taktverschwendung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\text{Auftr}(\sum \text{TV-Zeiten} / \text{Montagetakt}) - \text{Auftr}(\sum \text{TV-Zeiten} / \text{Kundentakt})</math></li> <li>• Anzahl Takte, die gespart werden können, wenn Kundentakt und Montagetakt gleich wären</li> </ul>	-
Ü4	Zwischenerzeugnisbestandswert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• =I3</li> <li>• Siehe bei Verschwendungsart BESTAND</li> </ul>	€, \$
Ü5	Zwischenerzeugnisreichweite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• =I4</li> <li>• Siehe bei Verschwendungsart BESTAND</li> </ul>	s, min, h

**Abbildung 28: Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Überproduktion**

### 6.1.3 Kennzahlen zur Feststellung von Wartezeiten

Auf Basis der allgemeinen Ausprägungen von Wartezeiten aus Kapitel 2.2 (vgl. Abbildung 9) werden die planerisch induzierten Wartezeiten identifiziert. Wartet der Mitarbeiter auf das Werkstück, so liegt ein planerisch induzierter Sachverhalt vor, wenn der vorgelagerte MA bzw. die vorgelagerte Maschine die zugeordneten Arbeitsinhalte noch nicht vollständig abgeschlossen hat und die Vorgabezeiten eingehalten worden sind. Im Fall des Wartens auf den vorgelagerten MA kann jedoch auch die Ursache in variierenden Ist-Zeiten der Mitarbeiter liegen, in diesem Fall ist die Verschwendung durch ausführende Tätigkeiten in der Betriebsphase

induziert. Das Warten auf Material ist ebenfalls durch ausführende Tätigkeiten während der Betriebsphase induziert, es muss eine Abweichung der Sollprozesse vorliegen, da die Planung von stabilen Nachschubprozessen ausgeht. Störungen können insofern mit in die Planung miteinbezogen werden, wenn Nutzungsgrade von Maschinen bekannt sind. Das Anhalten von Montagelinien auf Basis von Qualitätsproblemen zählt nicht zu den planerisch induzierten Verschwendungen, da diese in der Regel nicht vorweg zu nehmen sind. Die abgeleiteten Quantifizierungsmerkmale umfassen die Mitarbeiterauslastung und den Nutzungsgrad von Anlagen.

Der Abtaktungsverlust  $W1$  entspricht dem durchschnittlichen ungenutzten Anteil an der Mitarbeiterauslastung pro Montageteilsystem bei einer definierten Gesamtanzahl von Mitarbeitern innerhalb eines Montageteilsystems.<sup>55</sup> Sie errechnet sich aus den einzelnen Mitarbeiterauslastungen  $MAA$  von insgesamt  $n$  Mitarbeitern, wobei sich die einzelne Mitarbeiterauslastung aus der Summe der dem Mitarbeiter zugeordneten  $m$  Teilverrichtungszeiten  $TVZ$  in Relation zum Montagetakt  $MT$  ergibt:<sup>56</sup>

$$W1 = 100 - \frac{100 * \sum_{i=1}^n MAA_i}{n} = 100 - \frac{100 * \sum_{i=1}^n (\frac{\sum_{j=1}^m TVZ_{j,i}}{MT})}{n} \quad (6.12)$$

$W1$  ist der Wert in % und bezieht sich auf ein Montageteilsystem. Für das gesamte Montagesystem ergibt sich der Abtaktungsverlust aus der Bildung des Durchschnitts aller Mitarbeiter innerhalb der Montageteilsysteme.

Die zweite Kennzahl  $W2$  ist die Mitarbeiterausfallquote Störungen. Diese Kennzahl quantifiziert den durchschnittlichen unproduktiven Anteil der Gesamtzeit eines Mitarbeiters hervorgerufen durch Störungen. Hier müssen unterschiedliche Fälle untersucht werden. Für den ersten Fall, dass bei einer Störung die Mitarbeiter unmittelbar mit anderen Tätigkeiten beschäftigt werden können oder die

---

<sup>55</sup> vgl. hierzu Erlach's Beschreibung zum Abtaktungsverlust in Kapitel 2.2

<sup>56</sup> vgl. die Definition der Auslastung nach Matevska in Kapitel 2.2

Arbeitszeitmodelle der Mitarbeiter eine Unterbrechung und spätere Fortsetzung ohne Lohnverlust für das Unternehmen erlauben, ist im Fall a:

$$W2 = 0 \quad (6.13)$$

Für den Fall b, dass bei Eintreten einer Störung mit einer realitätsnahen festen Ausfallzeit gerechnet werden kann, entspricht W2 der Anzahl auftretender Störungen k multipliziert mit der Ausfallzeit AZ in Relation zur verfügbaren Gesamtzeit des Mitarbeiters GZ. In % ausgedrückt ergibt sich:

$$W2 = 100 * \frac{k * AZ}{GZ} \quad (6.14)$$

Für den Fall c, dass die Mitarbeiterausfallquote Störungen W2 über einzelne Anlagenverfügbarkeiten AV von n Maschinen eines Montageteilsystems angenähert werden kann, lautet die Formel zur Berechnung:<sup>57</sup>

$$W2 = 100 - (100 * \prod_{i=1}^n AV_i) \quad (6.15)$$

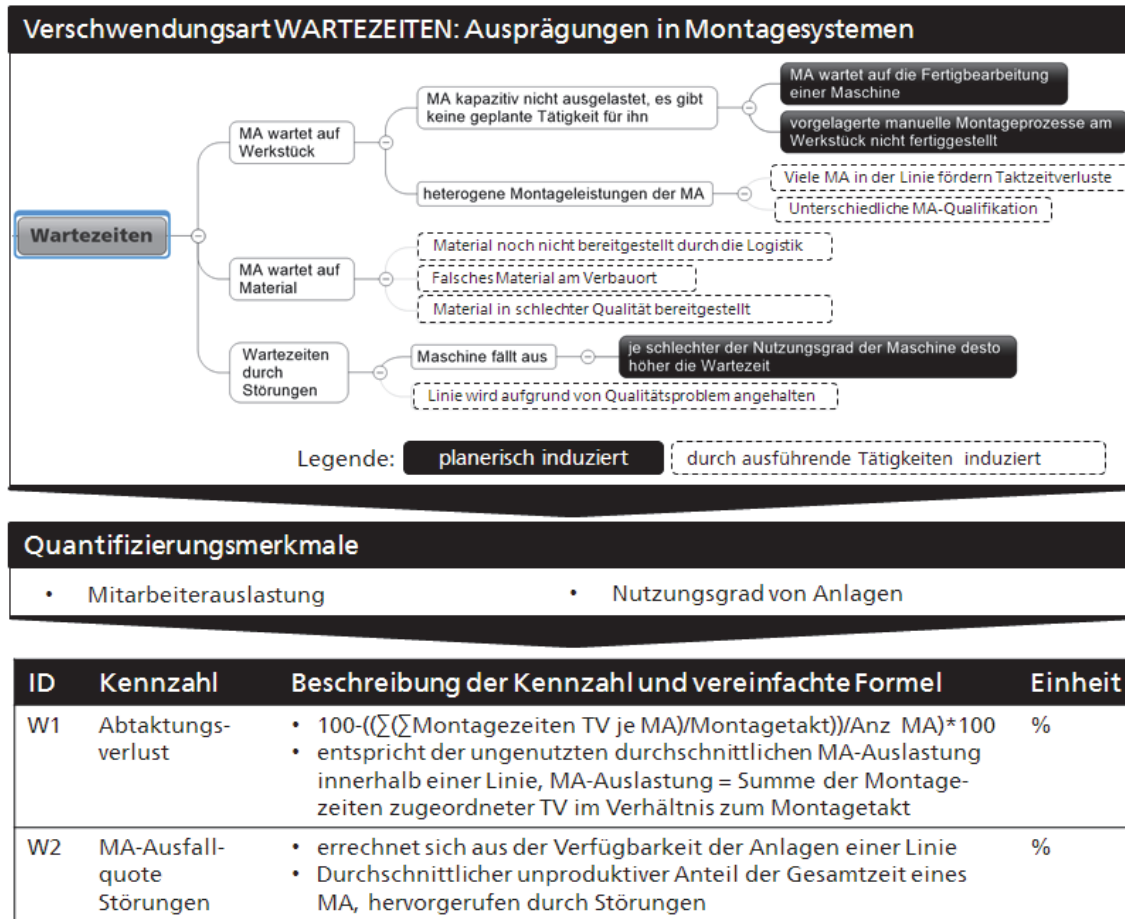
W2 bezieht sich auf ein Montageteilsystem. Bei Berücksichtigung der Anlagenverfügbarkeit ist zu beachten, dass alle Anlagen für alle Varianten eines Montageerzeugnisses benutzt werden. Im Falle einer partiellen Nutzung von Maschinen muss die Berechnung über die anteilige Zeit je Montageerzeugnis-Variante erfolgen. Die Mitarbeiterausfallquote des gesamten Montagesystems errechnet sich analog W1 als Durchschnittswert der im System beteiligten MA, also der MA aller Montageteilsysteme.

Die skizzierten Fälle a bis c stellen stark vereinfachte Sachverhalte dar und zeigen Möglichkeiten zur schnellen Kalkulation auf. Ist im Anwendungsfall einer Gestaltung hybrider Montagesysteme die Anlagenverfügbarkeit etwa einer Neuinvestition oder einer bereits intensiv genutzten Maschine als kritisch zu beurteilen, muss für W2 eine individuelle Formel erstellt werden.

---

<sup>57</sup> Nach Bode errechnet sich die Gesamtverfügbarkeit eines Systems bei Serienschaltung (d.h. alle Elemente müssen gleichzeitig verfügbar sein, damit das Gesamtsystem verfügbar ist) aus dem Produkt der einzelnen Verfügbarkeiten (Bode et al. 1980, S.60).

Abbildung 29 zeigt zusammenfassend die Herleitung der Kennzahlen für die Verschwendungsart Wartezeiten.



**Abbildung 29: Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Wartezeiten**

### 6.1.4 Kennzahlen zur Feststellung der Verschwendungsart Bewegung

Abbildung 9 in Kapitel 2.2 zeigt die Ausprägungen der Verschwendungsart Bewegung in Montagesystemen. Die Bewegungen können nach ihrer Art in die Bewegung „Material zu Werkstück“, „Laufwege der Mitarbeiter“, „Werkstückbewegungen“ und „sonstige Bewegungen“ wie z.B. Körperdrehungen eingeteilt werden. Alle genannten Arten von Bewegungen sind planerisch induziert unter der Prämisse, dass die definierten Arbeitsschritte der Planung im realen System eingehalten werden. Hierzu gehört auch die planbare Nutzung beider Hände für manuelle Tätigkeiten.

Es lassen sich aus den Ausprägungen von Bewegungsverschwendung folgende zwei wesentliche Quantifizierungsmerkmale ableiten: die Klassifizierung von wertschöpfender und nicht wertschöpfender Tätigkeit sowie die Bestimmung des Automatisierungsgrads bei Bewegungen des Werkstücks.

Als erste Kennzahl zur Feststellung von Bewegungsverschwendung M1 wird der Anteil von Bewegungsverschwendung pro Mitarbeiter definiert. Dieser Anteil entspricht dem durchschnittlichen Anteil an nicht wertschöpfender Arbeit an der zu verrichtenden Gesamtarbeit eines Mitarbeiters in einem Montageteilsystem. Die nichtwertschöpfende Arbeit wird dabei mit nicht wertschöpfenden Teilverrichtungen gleichgesetzt unter Berücksichtigung der entsprechenden Bearbeitungszeiten NWBZ. Die Summe der nicht wertschöpfenden Zeiten wird in der Formel durch die verfügbare Gesamtzeit eines Mitarbeiters  $VGZ_{MA}$  geteilt:

$$M1 = \frac{\sum NWBZ}{VGZ_{MA}} \quad (6.16)$$

Die Kennzahl M1 bezieht sich auf einen bestimmten Mitarbeiter bei definierter Gesamtanzahl der Mitarbeiter im Montageteilsystem.

Je nach Art der in der ersten Kennzahl M1 definierten nicht wertschöpfenden Bearbeitungszeiten werden 3 weitere Kennzahlen zur genaueren Spezifizierung der Bewegungsverschwendung eingeführt. Die Kennzahl M2 beschreibt den zeitlichen Anteil an Bewegungsverschwendung für Materialpicks im Verhältnis zur verfügbaren Gesamtzeit  $VGZ_{MA}$ . Die Berechnung erfolgt über die Summe der einzelnen Sollzeiten der Materialbewegungsanteile von Teilverrichtungen  $BZ_{MP}$  dividiert durch die verfügbare Gesamtzeit VGZ:

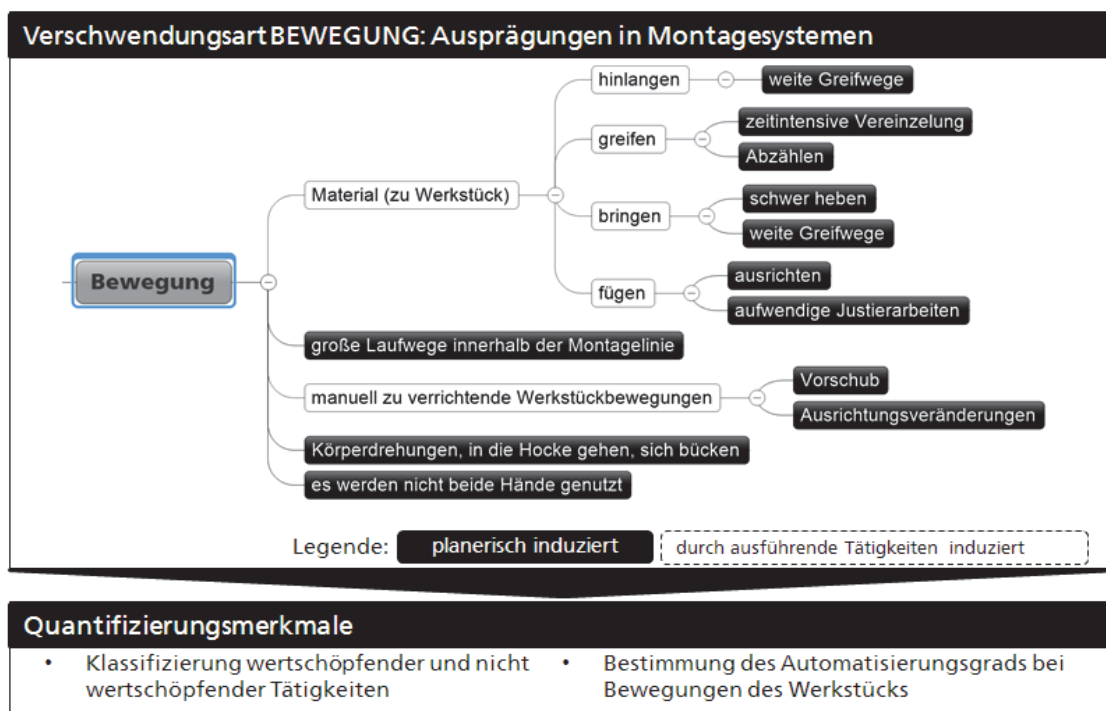
$$M2 = \frac{\sum BZ_{MP}}{VGZ_{MA}} \quad (6.17)$$

Der Anteil an nicht wertschöpfenden Tätigkeiten für Laufwege ist als Kennzahl M3 definiert, während M4 den Anteil für die Bewegungsverschwendung zum Handling des Werkstücks quantifiziert. Damit ergeben sich analog der Formel für Kennzahl M2 folgende Formeln für M3 und M4:

$$M3 = \frac{\sum NWBZ_{LW}}{VGZ_{MA}} \quad (6.18)$$

$$M4 = \frac{\sum NWBZ_{HWS}}{VGZ_{MA}} \quad (6.19)$$

M1 bis M4 beziehen sich auf einzelne Mitarbeiter. Zur Berechnung einer Gesamtaussage auf Ebene Montageteilsystem bzw. gesamtes Montagesystem wird der jeweilige Durchschnittswert der im betrachteten System befindlichen Mitarbeiter gebildet. Abbildung 30 zeigt zusammenfassend die Herleitung der Kennzahlen für die Verschwendungsart Bewegung.



ID	Kennzahl	Beschreibung der Kennzahl	Einheit
M1	Anteil Bewegungsverschwendung MA	• Durchschnittlicher Anteil an nicht wertschöpfender Arbeit der einzelnen MA an der gesamten Arbeit, hervorgerufen durch Bewegung	%
M2	Anteil Bew.Ver. Materialpick	• Anteil an Bewegungsverschwendung beim Zuführen des Materials zum Fügepunkt	%
M3	Anteil Bew.Ver. Laufwege	• Anteil an Bewegungsverschwendung durch Laufwege	%
M4	Anteil Bew.Ver. Werkstück	• Anteil an Bewegungsverschwendung durch das Handling des Werkstücks	%

Abbildung 30: Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Bewegung

### **6.1.5 Kennzahlen zur Feststellung von transportinduzierter Verschwendung**

Transporte binden Ressourcen, daher sollten Transporte immer planerisch berücksichtigt sein, weshalb ein Transport folglich planerisch induziert ist. Die bereits in Kapitel 2.2 identifizierten Ausprägungen der Verschwendungsart Transporte in den Montagesystemen verdeutlichen diese Aussage. Mehrfachhandhabung von Material oder weite Wege zwischen Montage und Lager<sup>58</sup> sowie ungünstige Fabriklayouts oder die Nichttrennung von logistischen und bearbeitenden Tätigkeiten sind allesamt planerisch induziert. Ebenso planerisch induziert sind ungünstige Logistikkonzepte, die erhöhten Transportaufwand verursachen.

Da die Transporttätigkeiten innerhalb eines Montagesystems als Teilmenge der Bewegungstätigkeiten definiert werden kann, leiten sich ähnliche bis identische Quantifizierungsmerkmale im Vergleich zur Verschwendungsart Bewegung ab. Die Klassifizierung wertschöpfender und nicht wertschöpfender Transporttätigkeiten ist hier relevant sowie die Erfassung der Laufwege im Layout. Deshalb wird auf die Kennzahlen zum Messen der Bewegungsverschwendung zurückgegriffen.

Das Quantifizierungsmerkmal der Teilebereitstellung und der damit verbundenen Platz- sowie Versorgungsbedarfe ist gesondert zu betrachten. Durch ein ungünstiges Logistikkonzept verursachte Transporte liegen meist außerhalb des in dieser Arbeit definierten Betrachtungsrahmens eines Montagesystems<sup>59</sup>, z.B. werden die der Montage vorgelagerten Materialversorgungsprozesse nicht berücksichtigt. Es besteht jedoch eine Abhängigkeit zur im Montagesystem befindlichen Teilebereitstellung in Form von Behältergrößen und -mengen, dem Platzbedarf sowie der Bevorratungsstrategie, da diese wesentlich die vorgelagerten logistischen Transportprozesse beeinflussen. Werden bei der Bereitstellung beispielsweise große Behälter mit hoher Füllmenge verwendet, erhöht sich die Reichweite, was einen geringer

---

<sup>58</sup> vgl. hierzu Abbildung 9

<sup>59</sup> vgl. die Abgrenzung zur Logistik in Kapitel 2.1



frequentierten Nachschub ermöglicht. Die in der Folge entwickelten beiden Kennzahlen quantifizieren daher nicht die Verschwendung innerhalb des Montagesystems, stattdessen stellen sie Indikatoren für die Verschwendungsart Transporte in der Peripherie dar, ausgelöst durch die Gestaltung der im System befindlichen Teilebereitstellung.

Die erste Kennzahl dieser Rubrik ist der verfügbare Bereitstellplatz T5 als Differenz aus dem Flächenangebot FA und der beanspruchten Bereitstellfläche BBF an den jeweiligen Arbeitsplätzen i:

$$T5_i = FA_i - BBF_i \quad (6.20)$$

Bezogen auf das Montageteilsystem wird der verfügbare Bereitstellplatz jedes einzelnen Arbeitsplatzes des Teilsystems addiert. Der verfügbare Bereitstellplatz ist deshalb ein Indikator für Transportverschwendung, da durch verbesserte Ausnutzung Transportvorgänge in der Peripherie eingespart werden können.

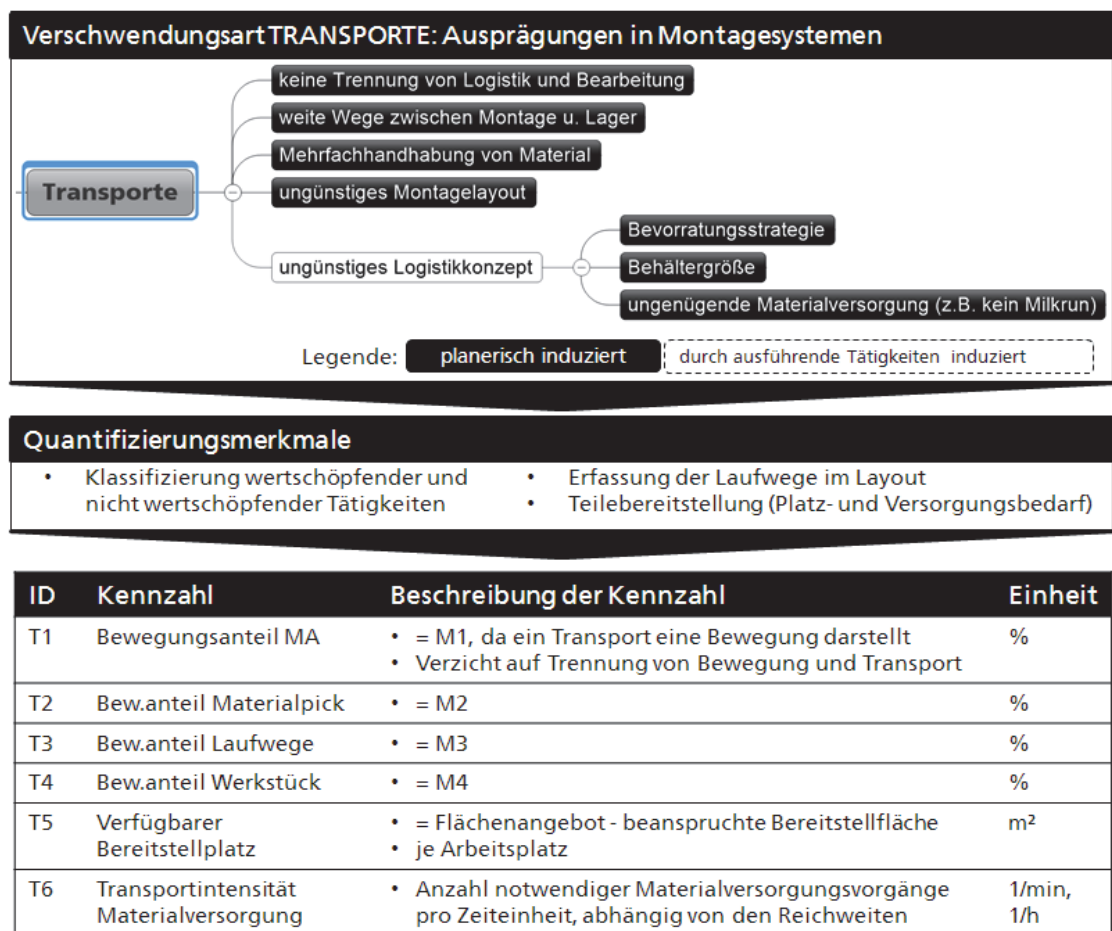
Die bei der Verschwendungsart Bestände bereits verwendete Montagebestandsreichweite I6 kann für die einzelnen Teile aufgrund unterschiedlicher Geometrien und Verpackungsanforderungen sehr unterschiedlich sein. Je unterschiedlicher die einzelnen Reichweiten dimensioniert sind, desto mehr Transportaufwand entsteht zur Versorgung der Montage, da zu verschiedenen Zeiten angeliefert werden muss. Die Anzahl notwendiger Materialversorgungsvorgänge pro Zeiteinheit wird hier direkt als Kennzahl für ein entsprechendes Montageteilsystem definiert. Die im Folgenden als „Transportintensität Materialversorgung“ bezeichnete Kennzahl T6 ergibt sich als Funktion aus den verschiedenen Reichweiten I6 von n Teilen:

$$T6 = f(I5_1, I5_2, I5_3, \dots, I5_n) \quad (6.21)$$

Bei Berücksichtigung der Anzahl Transporte zur Versorgung der Montage wird deutlich, dass eine planerische Abstimmung der Reichweiten der bereitgestellten Teile sinnvoll ist. Transporte können reduziert werden, indem ein Versorgungstakt eingeführt wird und die Teilereichweiten entweder auf diesen Takt oder auf ein

Vielfaches dessen angeglichen werden. Die beiden Kennzahlen T5 und T6 sind gemeinsam zu betrachten, um Verschwendungspotenziale zu realisieren. Im Fall der Verfügbarkeit von Flächen können gegebenenfalls Reichweiten angepasst und somit auch die Anzahl notwendiger Transporte in der Peripherie optimiert werden.

Abbildung 31 zeigt zusammenfassend die Ausprägungen der Verschwendungsart Transporte in Montagesystemen, deren Quantifizierungsmerkmale sowie die definierten Kennzahlen zur Feststellung von Transporten.



**Abbildung 31: Herleitung der Kennzahlen zur Feststellung von Transporten**

### 6.1.6 Kennzahlen zur Feststellung der Verschwendungsart Bearbeitung

Bei Betrachtung der in Abbildung 9 zusammengefassten Ausprägungen der Verschwendungsart „Bearbeitung“ in Montagesystemen sind sowohl über-

dimensionierte Maschinen wie auch ein falscher Grad der Automatisierung planerisch induzierte Ausprägungen. Auch die Nichtverfügbarkeit der Maschinen kann planerisch induziert sein, indem bewusst Automaten mit bekannter begrenzter Verfügbarkeit eingesetzt werden. Treten dagegen unvorhergesehene Störungen im Betrieb auf, ist die eingeschränkte Verfügbarkeit durch ausführende Tätigkeiten induziert. Weitere planerisch induzierte Ausprägungen von Verschwendung sind vorbereitende maschinelle Tätigkeiten sowie das Suchen von Werkzeug. Häufiges Umgreifen bei den Montagetätigkeiten, viele Ausrichtungswechsel des Werkstücks und auch das manuelle Fixieren des Werkstücks zählen ebenfalls zu den planerisch induzierten Ausprägungen. Ausbringungsverluste durch Rüsten sind weitere Ausprägungen der Verschwendungsart Bearbeitung.

Erstes Quantifizierungsmerkmal ist die Überdimensionierung von Maschinen, die höhere Investitionen als notwendig verursacht. Zur Messung der Überdimensionierung von Betriebsmitteln wird die maximal mögliche Taktzeit, für die eine Maschine konzipiert wurde, verwendet. Die Kennzahl B1 errechnet sich aus dem Verhältnis des Montagetakts MT und der maximal möglichen Taktzeit MMTZ eines Automaten i:

$$B1_i = \frac{MT}{MMTZ_i} \quad (6.22)$$

Die Kennzahl B1 wird nicht für alle Betriebsmittel verwendet. Sie ist gültig, wenn Automaten geplant sind, deren Zykluszeit deutlich über der Taktzeit liegt und mehrere Werkstücke parallel bearbeitet werden wie beispielsweise in Prüfständen. In einem zweiten Fall ist die Kennzahl gültig, wenn der geplante automatisierte Prozess mit hohem konstruktivem und kostenseitigem Aufwand beschleunigt wird. Die Kennzahl wird für bereits existierende Betriebsmittel nicht verwendet, da kein Einfluss auf deren Optimierung besteht. Für existierende Automaten, deren Zykluszeit unter dem Montagetakt liegt, würde sonst eine künstliche Verlängerung des automatisierten Prozesses angestrebt werden.

Das zweite Quantifizierungsmerkmal ist das Automatisierungspotenzial. Im Gegensatz zum ersten Quantifizierungsmerkmal, das eine zu hohe Automatisierung betrachtet, ist hier ein zu geringer Automatisierungsgrad im Fokus. Der Automatisierungsgrad beschreibt den Anteil der automatisierten Funktionen an der Gesamtfunktion eines Produktionssystems (vgl. hierzu Kapitel 2.2). Die Ermittlung der optimalen Menge an automatisierten Funktionen gestaltet sich als komplex, da die Automatisierbarkeit der Funktionen zum einen von den technischen Bedingungen der Montageaufgabe im Sinne von einfachen oder komplexen Bewegungsabläufen abhängig ist. Zum anderen sind hier wirtschaftliche Aspekte wie Investitionssummen und Wiederholhäufigkeiten relevant. Beispielsweise ist bei einer Planung von separaten Linien je Enderzeugnis das Automatisierungspotenzial geringer als bei einer vergleichbaren flexiblen Linie, die alle Enderzeugnisse fertigen kann. Die Segmentierung der Montage spielt daher eine bedeutende Rolle und hat großen Einfluss auf den optimalen Automatisierungsgrad des Gesamtsystems.

Aufgrund dieser komplexen Zusammenhänge wird folgende Kennzahl B2 für ungenutztes Automatisierungspotenzial definiert: Kennzahl B2 fasst alle manuellen Montagevorgänge zusammen, die sich technisch eignen und gleichzeitig „wirtschaftlich“ automatisiert werden können. „Wirtschaftlich“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass bei maximaler Stückzahl (also der Planung einer Gesamtlinie mit Einbeziehung aller Enderzeugnisse, die den manuellen Prozess beinhalten) eine Automatisierungsinvestition unter gegebenen Rahmenbedingungen wie Kapitalverzinsung und Nutzungsdauer rentabel ist. Die Kennzahl B2 ist hier die Summe der Teilverrichtungssollzeiten TVZ der n manuellen Teilverrichtungen mit Automatisierungspotenzial TVAP, multipliziert mit dem Personalkostenstundensatz  $K_P$ :<sup>60</sup>

$$B2 = \sum_{i=1}^n TVZ_{TVAP_i} * K_P \quad (6.23)$$

---

<sup>60</sup> Der Personalkostenstundensatz berechnet sich analog der von Hartel (2012) angegebenen Formel in Abbildung 23. Formel 6.23 basiert auf der Berechnung von Personalkosten über die Multiplikation des Personalkostenstundensatzes mit der beanspruchten Sollzeit von ein oder mehreren Mitarbeitern.

Die Kennzahl B2 bezieht sich auf ein Montageteilsystem. Das ungenutzte Automatisierungspotenzial des gesamten Montagesystems errechnet sich aus der Summe der Werte der entsprechenden Teilsysteme. Die Kennzahl B2 quantifiziert somit eine durch die Segmentierung des Montagesystems verursachte Verschwendung an zu geringem Automatisierungsgrad, da sich bei reduzierten Stückzahlen in den einzelnen Teilsystemen die Investitionen eines Automaten nicht mehr rechnen.

Drittes Quantifizierungsmerkmal ist die Nichtverfügbarkeit von Maschinen, die direkt als technische Nichtverfügbarkeit B3 übernommen wird. B3 ist der prozentuale Anteil an der Belegungszeit, für den eine Maschine *i* der Produktion nicht zur Verfügung steht.<sup>61</sup> Er berechnet sich aus der technischen Ausfallzeit TAZ und der verfügbaren Belegungszeit VBZ:

$$B3_i = \frac{TAZ_i}{VBZ} * 100 \quad (6.24)$$

Bezogen auf ein Montageteilsystem errechnet sich die technische Verfügbarkeit als Produkt der einzelnen Verfügbarkeiten der in Reihe angeordneten Automaten eines Teilsystems, wodurch sich die gesamte Nichtverfügbarkeit ableitet.

Viertes Quantifizierungsmerkmal ist das Erfassen von Bearbeitungsrichtungen am Werkstück. Die Kennzahl B4 gibt die Anzahl wechselnder Ausrichtungen des Werkstücks WAW während der Bearbeitung innerhalb eines Montageteilsystems an:

$$B4 = WAW \quad (6.25)$$

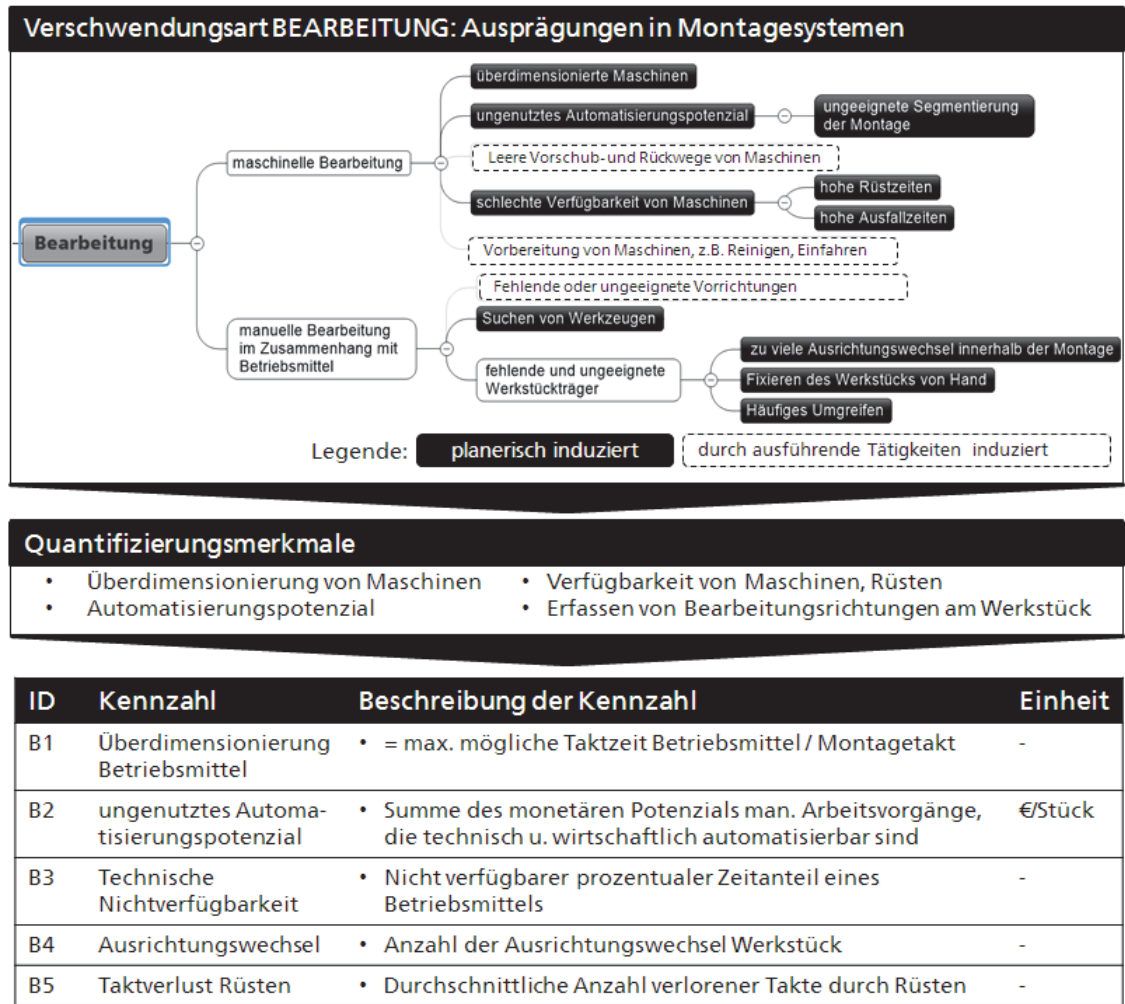
Die Kennzahl Taktverlust Rüsten (B5) quantifiziert den Verlust an Ausbringung durch Rüsten, indem sie der Anzahl verlorener Takte durch die Produktionsunterbrechung entspricht. Die Anzahl der verlorenen Takte errechnet sich aus der benötigten Rüstzeit RZ eines Montageteilsystems, dividiert durch den Montagetak. Es leitet sich folgende Formel zur Berechnung des Taktverlusts durch Rüsten ab:

---

<sup>61</sup> Vgl. hierzu die Ausführungen zur Spezifizierung der technischen Verfügbarkeit in Kapitel 2.2 bei der Verschwendungsart „Bearbeitung“.

$$B5_{MTS} = \frac{RZ_{MTS}}{MT_{MTS}} \quad (6.26)$$

Abbildung 32 fasst die Herleitung der Kennzahlen zur Quantifizierung der Verschwendungsart Bearbeitung zusammen.



**Abbildung 32: Herleitung der Kennzahlen zur Verschwendungsart Bearbeitung**

### 6.1.7 Kennzahlen zur Feststellung von Nacharbeit und Ausschuss

Abbildung 10 zeigt die verschiedenen Ausprägungen der Verschwendungsart „Nacharbeit und Ausschuss“ in Montagesystemen. Die Ausprägungen können sowohl planerisch als auch durch die spätere Ausführung der Tätigkeiten während

des Betriebs induziert sein. Eine schlechte Prozessbeherrschung kann beispielsweise durch zu viele Arbeitsinhalte pro Mitarbeiter oder auch durch unzureichend definierte Arbeitsschritte verursacht werden. Weitere Fehlerbereiche sind die Verwechslungsgefahr beim Greifen ähnlicher Teile sowie qualitätskritische Montageprozesse wie beispielsweise das Stecken von Kabelverbindungen. Werden Gegenmaßnahmen wie Poka Yoke oder Six Sigma nicht eingesetzt, führt das zu Verschwendung in Form von Ausschuss und Nacharbeit (vgl. Kapitel 2.2). In diesen Fällen liegt eine planerische Induktion vor. Dagegen ist die falsche Einstellung von Maschinenparametern oder mangelnde Fehlererkennung nur bedingt planbar, diese Ausprägungen von Verschwendung treten meist unvorhergesehen erst bei der Ausführung in der Serie auf.

Quantifizierungsmerkmale sind die zu erwartende Nacharbeit und der zu erwartende Ausschuss. Trotz der Zielsetzung einer Nullfehlerproduktion ist die Quantifizierung von Ausschuss und Nacharbeit für die Gestaltung von verschwendungsarmen Montagesystemen von Bedeutung, um die Auswirkungen unterschiedlicher Prozessgestaltungen und damit auch Prozessstabilitäten miteinbeziehen zu können.

Die Ausschussquote wird als Kennzahl NA1 definiert, diese errechnet sich aus dem Quotienten des zu erwartenden Ausschuss EA pro Zeiteinheit t in Stück durch die Stückzahlen SZ pro Zeiteinheit t:

$$NA1 = \frac{\frac{EA}{t}}{\frac{SZ}{t}} = \frac{EA}{SZ} \quad (6.27)$$

Bezieht man NA1 auf das gesamte Montagesystem, errechnet sich der Gesamtwert aus der Summe der einzelnen Ausschusszahlen dividiert durch die Gesamtstückzahl.

Der Aufwand für die Nacharbeit NA2 ist der erwartete Montagezeitaufwand für Nacharbeit pro Enderzeugnis des Montageteilsystems. Berechnet wird NA2 durch

die Summe der Zeiten für entstandene Nacharbeit ENAZ im Zeitraum t, dividiert durch die Stückzahl SZ im Zeitraum t:

$$NA2 = \frac{\frac{\sum ENAZ}{t}}{\frac{SZ}{t}} = \frac{\sum ENAZ}{SZ} \quad (6.28)$$

Für die Ermittlung des Nacharbeitsaufwands im Gesamtsystem werden die einzelnen Aufwände der Teilsysteme summiert und durch die Gesamtstückzahl dividiert.

Ein weiteres Quantifizierungsmerkmal ist die Beherrschbarkeit der geplanten Prozesse. Ist die Prozessbeherrschung ungenügend, entstehen Aufwände zur Vermeidung der Instabilitäten. Diese zeitlichen Sonderaufwände werden, sofern in der Planungsphase bekannt, durch die Kennzahl NA3 zusammengefasst. Der Sonderaufwand Prozessbeherrschung NA3 berechnet sich aus der Summe der Multiplikationen der einzelnen Zeitaufwände für Prozessbeherrschung EZAPB mal dem jeweiligen Personalkostenstundensatz  $K_P$ , dividiert durch die Stückzahl SZ:

$$NA3 = \frac{\sum_{i=1}^n EZAPB_i * K_P}{SZ} \quad (6.29)$$

Die Formel basiert auf der Berechnung von Personalkosten analog der Formel 6.23. NA3 erfasst den durchschnittlichen monetären Aufwand pro Stück. Je nach Betrachtungsraum ist NA3 für ein Montageteilsystem sowie auch für das gesamte Montagesystem spezifizierbar. Typische Aufwände sind Prüfvorgänge, Nachjustierungen von Vorrichtungen oder Prozessbeobachtungen. Diese Tätigkeiten werden in der Praxis sinnvollerweise nicht vom Montagearbeiter ausgeführt sondern von zuständigen Prozessoptimierern in der Peripherie, damit die wertschöpfenden Prozesse nicht gestört werden und der Takt erhalten bleibt.

Abbildung 33 zeigt zusammenfassend die Herleitung der Kennzahlen über die verschiedenen Ausprägungen der Verschwendungsart „Nacharbeit und Ausschuss“ sowie deren identifizierte Quantifizierungsmerkmale. Die planerisch induzierten Ausprägungen von Verschwendung in Montagesystemen sind schwarz markiert und die durch ausführende Tätigkeiten induzierten in grauer Farbe dargestellt.



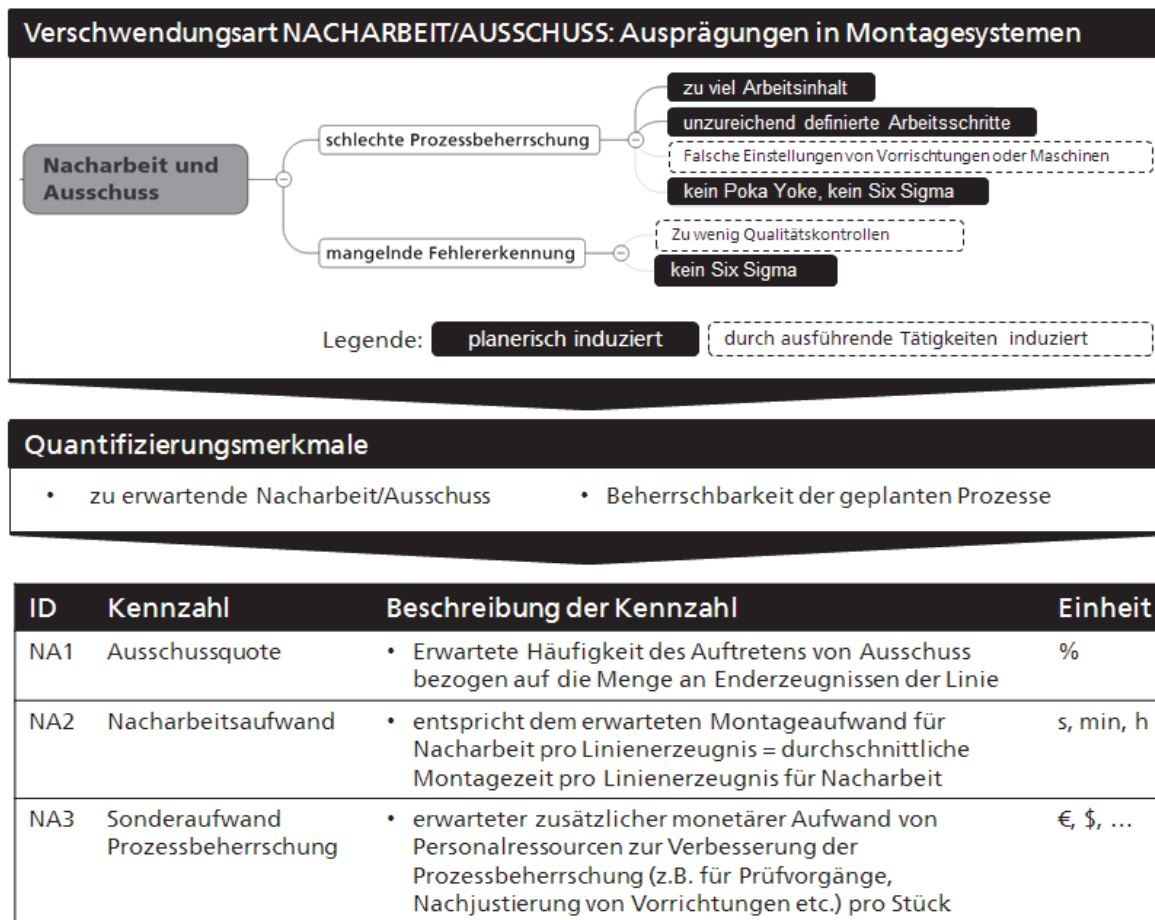


Abbildung 33: Herleitung der Kennzahlen für Nacharbeit und Ausschuss

### 6.1.8 Kennzahlenbezogene Anforderungen an das Verfahren und an das Montagemodell

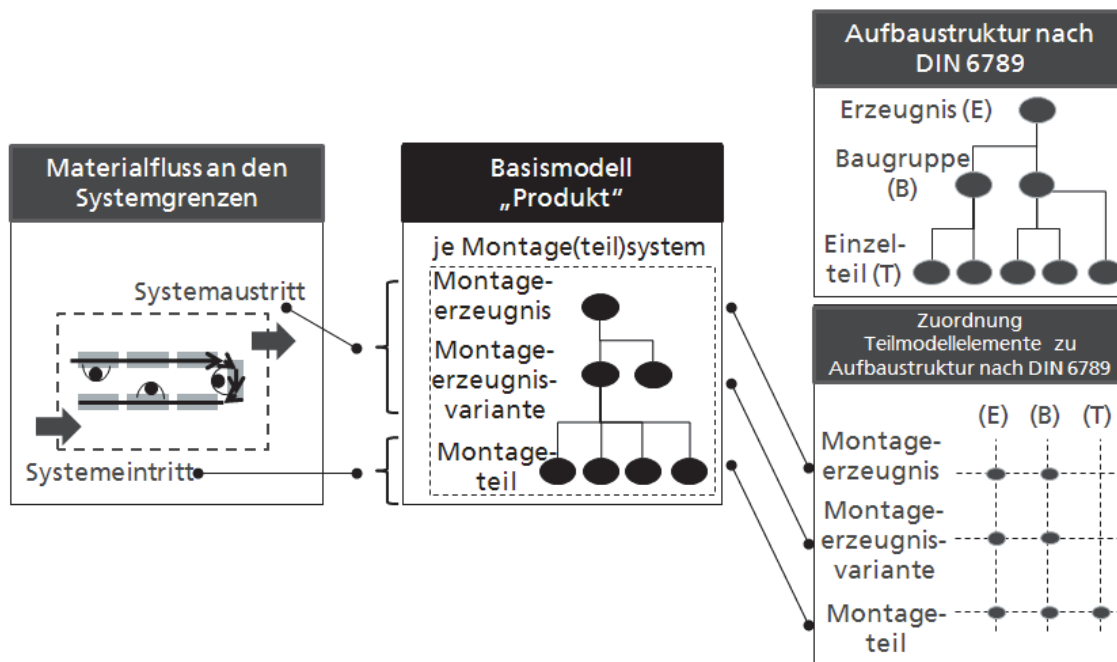
Die Definitionen der Kennzahlen zur Feststellung der 7 Verschwendungsarten erheben neue Detailanforderungen an das Planungsverfahren verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen sowie an dessen Montagemodell, also die Basismodelle „Produkt“, „Montageprozess“ und „physisches Montagesystem“. Die folgende Abbildung gibt eine Übersicht über die Detailanforderungen und gliedert diese je nach Ursprung der Quantifizierung von Verschwendungsarten.

	Anforderungen an das Montagemodell	Anforderungen an das Verfahren
<b>Bestand</b>	Abbildung standardisierter Puffer	(keine kennzahlenbezogenen Detailanforderungen an das Verfahren)
	Erfassung Wert der Zwischерzeugnisse	
	Erfassung Wert der Montageteile	
	Abbildung Menge bereitgestellte Montageteile	
	Abbildung Puffer zwischen MTS	
<b>Überproduktion</b>	Abbildung Teilverrichtungssollzeiten im Basismodell Prozess	Sollzeitbestimmung der TV mit System vorbestimmter Zeiten
	Erfassung geplante Stückzahlen	interaktive rechnerunterstützte Festlegung des Montagetakts
	Abbildung Schichtmodell	
	Bestimmung Montagetakts aus Planzeiten TV	
<b>Wartezeiten</b>	Zuordnung von Mitarbeitern zu TV, Erfassung der Auslastung	(keine kennzahlenbezogenen Detailanforderungen an das Verfahren)
	Abbildung unterschiedlicher Zuordnungen abhängig von Anzahl MA je MTS	
	Erfassung Anlagenverfügbarkeit	
	Erfassung Lohnvereinbarung bzgl. Produktionsstopps	
<b>Bewegung / Transport</b>	Basismodell Prozess: Attribut wertschöpfend	Klassifizierung von wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Tätigkeiten
	Basismodell Prozess: Attribut Laufweg/ Materialpick/ Werkstück	Variantenbildung bei unterschiedlichen Automatisierungsgraden von Werkstückbewegungen
	Abbildung Flächenbedarfe und -angebot je Arbeitsplatz	automatisierter Ablauf zur schnellen Erkennung von (nicht) wertschöpfenden Teilverrichtungen
	Berücksichtigung von Behältern inklusive Füllgrade und Reichweiten bzw. Anzahl bereitgestellter Behälter	Vergleich Flächenbedarf zu Flächenangebot Ermittlung der Anzahl notwendiger Materialversorgungsvorgänge
<b>Bearbeitung</b>	Basismodell Prozess: Erfassen der Bearbeitungsrichtung	Miteinbeziehung des Automatisierungsgrads
	Abbildung unterschiedlicher Segmentierungsvarianten	Identifizierung des monetären ungenutzten Automatisierungspotenzials manueller Vorgänge
	Erfassung der maximalen Taktzeit von Maschinen	
	Erfassen von Werkzeugen	
<b>Nacharbeit und Ausschuss</b>	optionale Erfassung der Ausschussquote	(keine kennzahlenbezogenen Detailanforderungen an das Verfahren)
	optionale Erfassung Nacharbeitsaufwand	
	optionale Erfassung Sonderaufwände für Prozessbeherrschung	

Abbildung 34: Kennzahlenbezogene Detailanforderungen

## 6.2 Basismodell „Produkt“

In dieser Arbeit wird das zu verwendende Basismodell „Produkt“ aus der in Kapitel 2.3 beschriebenen Definition der Aufbaustruktur eines Erzeugnisses gemäß der DIN-Norm 6789 abgeleitet. Erzeugnisse bestehen demnach aus Baugruppen, Einzelteilen und Rohstoffen. Diese Bestandteile des Erzeugnisses werden im Hinblick auf den Systemein- und -austritt des Montagesystems analysiert.



**Abbildung 35: Herleitung und Spezifikation des Basismodells „Produkt“**

Mit der in Kapitel 2.1 definierten Festlegung des Systemeintritts an den Bereitstellpunkt folgt daraus, dass der Zustand eines Teils bei der Bereitstellung maßgebend für die Deklaration eines Montageteils ist. Wird demnach eine Baugruppe als Montageteil bereitgestellt, so erfolgt keine weitere Unterteilung in deren Einzelteile, da innerhalb des Montagesystems diese Baugruppe nicht weiter unterteilt wird. Es erfolgt während der fortschreitenden Planung auch keine konstruktive Produktumgestaltung gemäß der in Kapitel 3.1 beschriebenen Abgrenzung zur montagegerechten Produktgestaltung, was eine Unterteilung notwendig machen würde. Das Objekt „Montageteil“ enthält das Attribut

„Stücklistenkoeffizient“ zur Bestimmung der Häufigkeit der Verwendung in der Montageerzeugnisvariante.

Analog der Deklaration von Montageteilen als Zustand bei Systemeintritt erfolgt die Deklaration der Montageerzeugnisse als Zustand bei Systemaustritt. Montageerzeugnisse sind demnach die Produktzustände am Übergabepunkt an die interne Logistik.<sup>62</sup> Da in Montagesystemen häufig eine Vielzahl von Montageerzeugnissen produziert wird, diese jedoch ähnliche Produktmerkmale aufweisen, wird im Basismodell „Produkt“ eine Untergliederung der Montageerzeugnisse in Montageerzeugnisvarianten durchgeführt.

Die 3 Hierarchiestufen Montageerzeugnis, Montageerzeugnisvariante und Montageteil beziehen sich auf jeweils ein definiertes Montage- oder Montageteilsystem. Damit stellt ein Montageerzeugnis oder eine Variante in Anlehnung an die Strukturierung nach DIN 6789 ein Erzeugnis oder eine Baugruppe dar, ein Montageteil kann sowohl Einzelteil, Baugruppe oder auch ein komplettes Erzeugnis<sup>63</sup> vorgelagerter Wertschöpfungsstufen darstellen (vgl. die Zuordnung der Teilmodellelemente zur Aufbaustruktur nach DIN 6789 in Abbildung 35).

### **6.3 Basismodell „Montageprozess“**

Die Montageablaufplanung wurde in Kapitel 3.1 als eine für die Reduzierung von Verschwendung relevante Planungsphase identifiziert.<sup>64</sup> Die Phase der Montageablaufplanung enthält u.a. die Planung der Montageablaufstruktur<sup>65</sup>, die die Reihenfolge von Teilaufgaben der Montage verdeutlicht und durch die Konstruktionsweise des Erzeugnisses bestimmt ist. Der Vorranggraph stellt die

---

<sup>62</sup> vgl. hierzu die Definition der Systemgrenze in Kapitel 2.1

<sup>63</sup> erzeugt durch interne oder externe Lieferanten

<sup>64</sup> vgl. Abbildung 14

<sup>65</sup> vgl. Planungsschritt 3.2 in Abbildung 12

Abhängigkeiten der Reihenfolge von Montageprozessen grafisch dar. In diesem Stadium der Planung enthält der Vorranggraph jedoch ausschließlich Fügeprozesse, da nur diese für die Konstruktion zur Sicherstellung der Montierbarkeit relevant sind. Erst zu einem späteren Zeitpunkt werden beim Planungsschritt der Bildung von Arbeitsinhalten<sup>66</sup> die weiteren Montageprozesse Handhaben, Justieren, Kontrollieren und diverse Sonderoperationen<sup>67</sup> ergänzt. Diese Montageprozesse entstehen aus der Kapazitätsteilung und den sogenannten Aufgaben im Umfeld, die auf Basis von bestimmten Ausführungsbedingungen entstehen. Das hier zu entwerfende Basismodell muss die dargestellte Anforderung der fortschreitenden Detaillierung der Montageprozesse unterstützen.

Die Gestaltung des Basismodells „Montageprozess“ erfolgt in Anlehnung an die in Kapitel 2.3 in Abbildung 11 dargestellte „Aufgabengliederung“ nach Bullinger. Das gewählte hierarchische Modell umfasst beginnend von der höchsten Detaillierungsstufe die Teilverrichtungen. Diese beschreiben sowohl wertschöpfende wie nicht wertschöpfende Vorgänge, die sinnvoll nicht weiter teilbar sind analog der Definition nach Holle (vgl. Kapitel 2.3). Die Teilverrichtungen enthalten konstruktionsbedingte Fügeprozesse aber auch Prozesse, die erst durch die Gestaltung des physischen Montagesystems wie z.B. „Werkstück bewegen“ oder „Startknopf betätigen“ ausgeführt werden müssen. Die nächsthöhere Stufe bilden die Fügevorgänge, die konstruktiv durch die Gestaltung der Teile und Baugruppen vorbestimmt sind. Es folgt die nächsthöhere Stufe Teilprojekt, die eine Zusammenfassung von Fügevorgängen innerhalb eines Montageteilsystems darstellt. Die letzte Stufe ist das Projekt, es beschreibt die gesamthafte Montageaufgabe des zu planenden Montagesystems.

---

<sup>66</sup> vgl. Planungsschritt 4.6 in Abbildung 12

<sup>67</sup> vgl. Abbildung 7 in Kapitel 2.1

Abbildung 36 zeigt das verwendete 4-stufige Basismodell der zu modellierenden Montageprozesse für die Gestaltung verschwendungsarmer Fließmontagen.

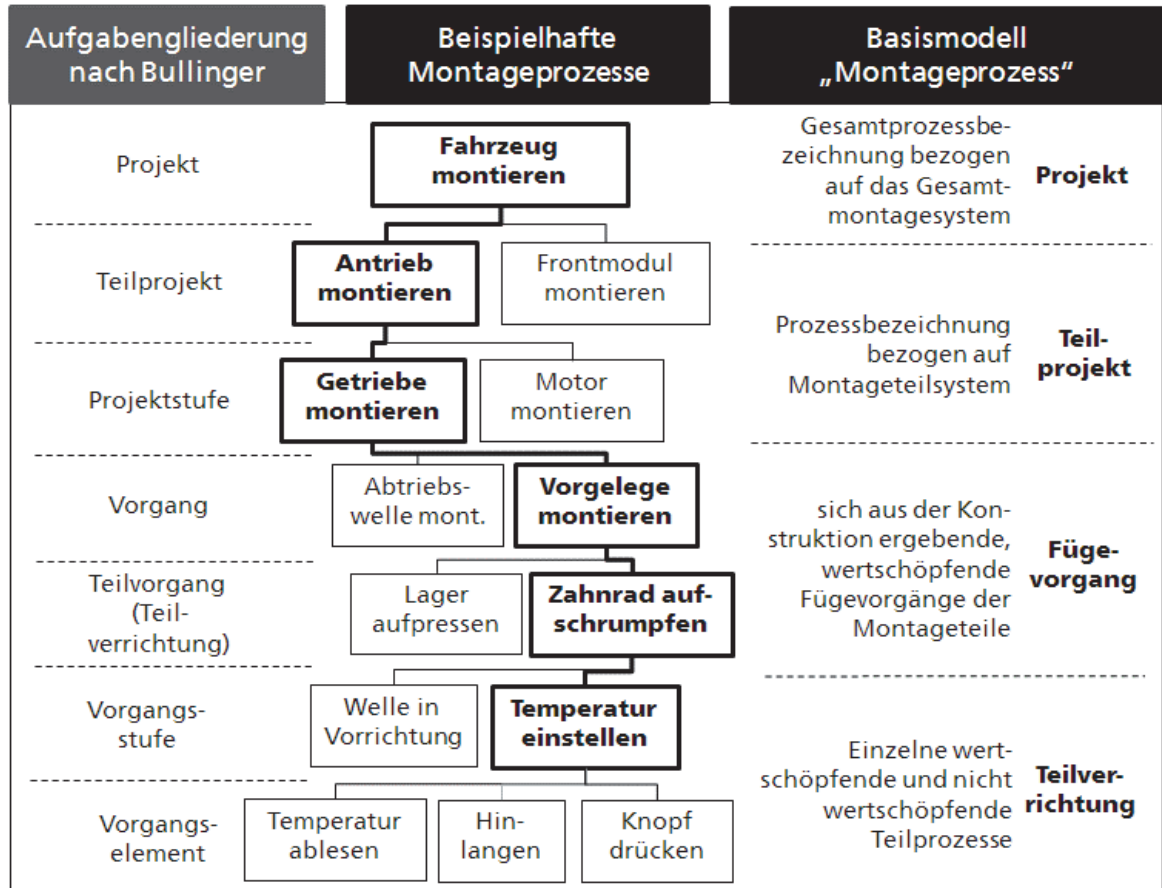


Abbildung 36: Basismodell „Montageprozess“ in Anlehnung an Bullinger

#### 6.4 Basismodell „physisches Montagesystem“

Das Basismodell „physisches Montagesystem“ hat während der Planungsphasen des Verfahrens die Aufgabe, ein Abbild des zu gestaltenden Montagesystems zu erzeugen. Das Modell des „physischen Montagesystems“ konzentriert sich als beschreibendes Konstrukt<sup>68</sup> auf die strukturellen Komponenten der nach Realisierung sichtbaren Betriebsmittel und Ressourcen der Montage.

<sup>68</sup> vgl. Kapitel 2.4 und 3.3

Abbildung 37 zeigt die Aufbaustruktur des Basismodells „physisches Montagesystem“. Unter Verwendung des hierarchischen Ansatzes von Westkämper im Stuttgarter Unternehmensmodell<sup>69</sup> enthält das Montagesystem auf oberster Ebene verschiedene Montageteilsysteme und Montageteilsystemverkettungen<sup>70</sup>. Eine Montageteilsystemverkettung modelliert eine materialflusstechnische Verbindung zwischen Montageteilsystemen durch die Angabe des Vorgängers und Nachfolgers. Die Montageteilsystemverkettung ist hier durch asynchrone Prozessabläufe charakterisiert, deshalb enthält es das Objekt „Puffer“ zur Abbildung von Beständen<sup>71</sup> zwischen den Teilsystemen.

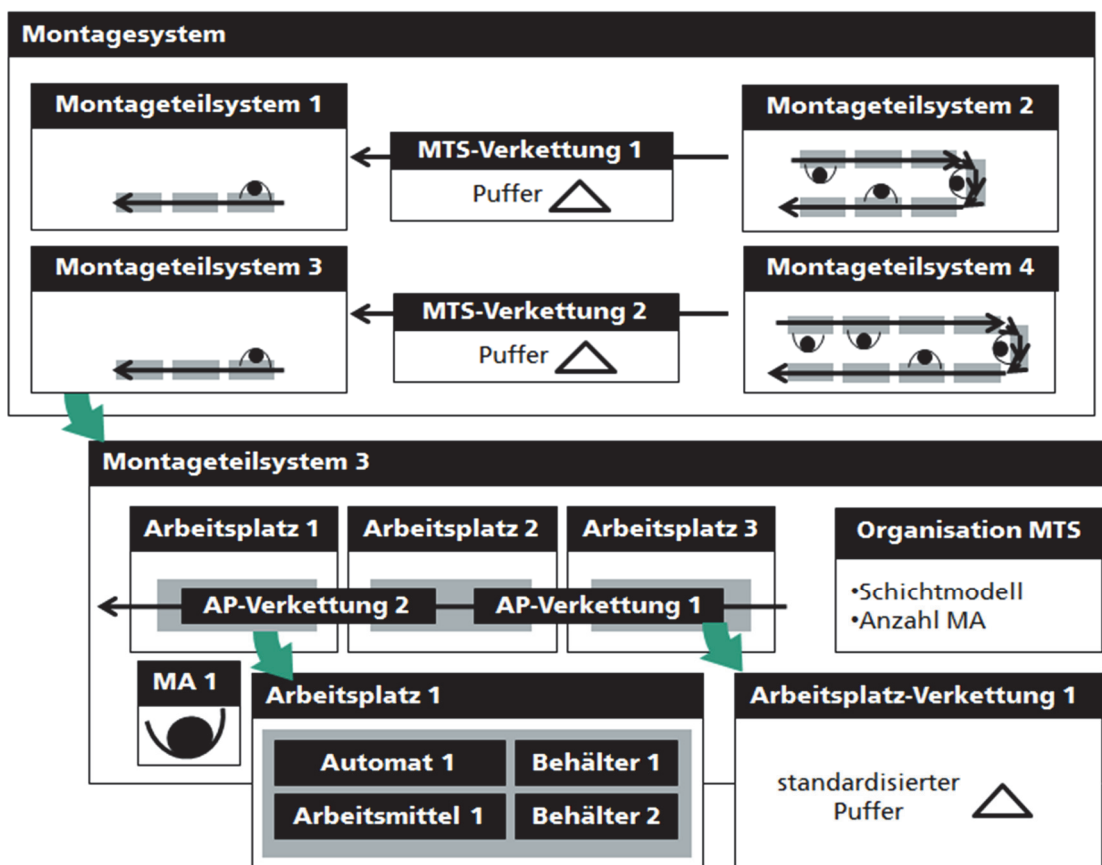


Abbildung 37: Basismodell physisches Montagesystem

<sup>69</sup> vgl. Kapitel 2.1

<sup>70</sup> Die Montageteilsystem-Verkettung wurde in Abbildung 37 als MTS-Verkettung abgekürzt

<sup>71</sup> vgl. die Anforderungen in Abbildung 34

Auf der nächsten hierarchischen Ebene wird das Montageteilsystem durch die Objekte „Arbeitsplatz“, „Arbeitsplatzverkettung“, „Montagemitarbeiter“ und die „Montageteilsystem-Organisation“ modelliert. Das Objekt der „Arbeitsplatzverkettung“ beschreibt die Verbindung unmittelbar angrenzender Arbeitsplätze mit eindeutig definierter Materialflussrichtung durch die Angabe des Vorgängers und Nachfolgers. Das Objekt „Arbeitsplatzverkettung“ bildet hier synchronisierte Arbeitsplätze mit unmittelbar aufeinander folgenden Teilverrichtungen ab. Die Arbeitsplatzverkettung enthält gemäß den Anforderungen aus den definierten Kennzahlen in Abbildung 34 das Objekt „standardisierter Puffer“.<sup>72</sup> Das Objekt „Montageteilsystem-Organisation“ fasst die Planung des Ressourceneinsatzes zusammen, mit der das Montageteilsystem betrieben werden soll. Es besteht aus den Elementen „Schichtmodell“ und der „Anzahl Mitarbeiter“ im Montageteilsystem.

Auf der Ebene „Arbeitsplatz“ werden die Elemente „Automat“, „Arbeitsmittel“ und „Behälter“ definiert. Die Elemente dienen zur Modellierung der am jeweiligen Arbeitsplatz befindlichen Montage-Betriebsmittel wie z.B. Speicher-, Ordnungs- und Zuführeinrichtungen, Handhabungsgeräte, Fügeeinrichtungen und Steuerungseinheiten sowie bereitgestellte Behälter.<sup>73</sup> Das Objekt „Automat“ unterscheidet sich vom Objekt „Arbeitsmittel“ dadurch, dass der Automat Montageprozesse ausführt, die entweder teil- oder vollautomatisiert sind.

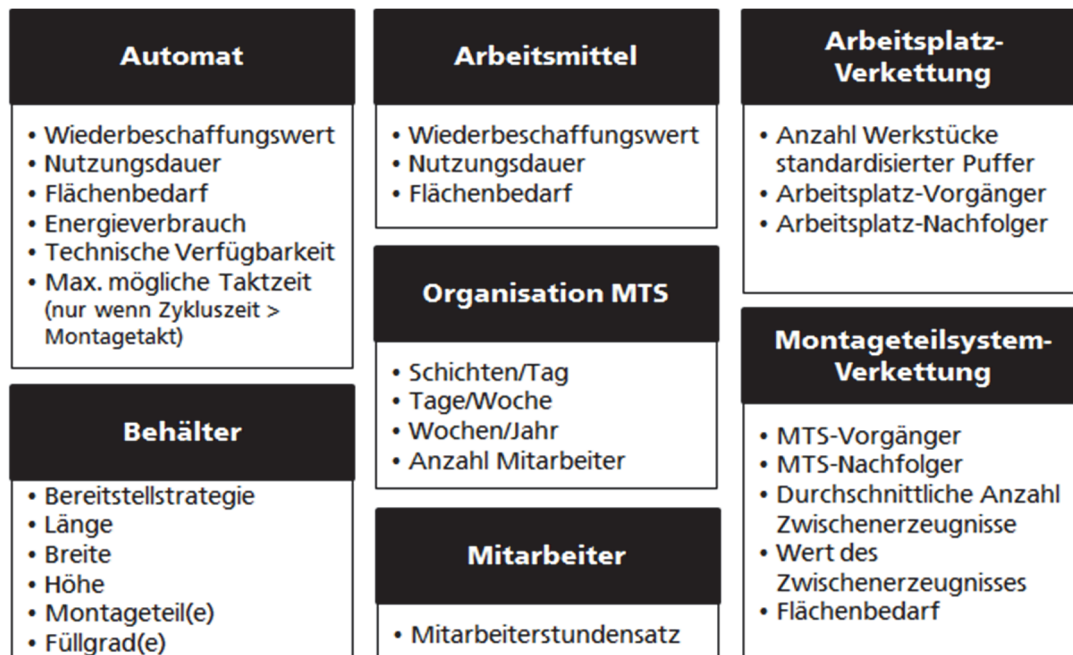
Die in Abbildung 37 gezeigten Objekte des physischen Montagesystems enthalten Attribute zur näheren Spezifikation, die während des Planungsverfahrens Verwendung finden, siehe hierzu zusammenfassend die folgende Abbildung 38.

---

<sup>72</sup> zur Vermeidung von Wartezeiten bei der Übergabe des Werkstücks zwischen Montagemitarbeitern, vgl. Kapitel 2.2

<sup>73</sup> vgl. den Arbeitssystemansatz nach REFA, angewandt auf die Montage in Kapitel 2.1





**Abbildung 38: Attribute der Objekte des physischen Montagesystems**

## 6.5 Modellierung der Beziehungen zwischen den Basismodellen

Zur vollständigen Modellierung eines Montagesystems sind neben der Beschreibung des Produkts, der Montageprozesse und des physischen Montagesystems in den jeweils dafür erstellten Basismodellen<sup>74</sup> die Beziehungen der verschiedenen Elemente zueinander von Bedeutung. Im Einzelnen sind Beziehungen zwischen Produkt und Prozess, sowie Prozess und physischem Montagesystem zu untersuchen.

### 6.5.1 Beziehung Produkt zu Prozess

Um die eindeutige Zuordnung der Montageinhalte zu Montageerzeugnissen abzubilden, wird eine Beziehung zwischen den beiden Basismodellen Produkt und Prozess definiert. Die Montageprozesse werden nach der Zuordnung zu teilespezifischen Prozessen, deshalb werden an dieser Stelle die 2 Objekte „produkt-

<sup>74</sup> vgl. Kapitel 6.2 bis 6.4 und Kapitel 5.2, Abbildung 25

spezifischer Fügevorgang“ und „produktspezifische Teilverrichtung“ eingeführt. Zur Spezifikation der beiden Objekte sind neben dem Identifikator (in der Folge als ID bezeichnet) weitere Attribute notwendig, die eine solche Beziehung beschreiben, wie der Name des zugeordneten Montageerzeugnisses bzw. der -variante, für die der Prozess ausgeführt wird. Weiter charakterisieren den produktspezifischen Fügevorgang bzw. Teilverrichtung die Attribute Montagezeit, Automatisierungsstufe (manuell oder automatisch) und die bei der Ausführung des Prozesses zu verwendenden Montageteile.

Es wird ausschließlich bei produktspezifischen Teilverrichtungen zusätzlich zwischen „wertschöpfend“ und nicht „wertschöpfend“ unterschieden bzw. zwischen „verschwendungsminimal“ und „nicht verschwendungsminimal“.<sup>75</sup> Dabei ist es möglich, dass wertschöpfende Teilverrichtungen entweder verschwendungsminimal oder nicht verschwendungsminimal sind. Durch die vereinfachte Modellierung des Montageprozesses bis maximal zur Stufe der Teilverrichtung können damit Vorgangselemente enthalten sein, die Verschwendung bedeuten, obwohl die Teilverrichtung wertschöpfend ist. Ein Beispiel stellt ein wertschöpfender Fügeprozess dar mit dem Vorgangselement „Fügeteil an Fügepunkt bringen“.<sup>76</sup>

Fügevorgänge besitzen zusätzlich die Attribute „Technologie“ des Fügens sowie die Fügerichtung, um während der Planung eine Kategorisierung bezüglich Automatisierungspotenzialen zusammengefasster Vorgänge sowie Ausrichtungswechsel des Werkstücks erfassen zu können. Für die produktspezifischen Teilverrichtungen ist zu diesen Zwecken das der Fügerichtung entsprechende Attribut der Bearbeitungsrichtung zugeordnet. Füge- und Bearbeitungsrichtungen referenzieren auf ein initial festgelegtes, 3-dimensionales kartesisches Koordinatensystem in der Explosions-

---

<sup>75</sup> Bei produktspezifischen Fügevorgängen wird davon ausgegangen, dass diese wertschöpfend sind. Da das Verfahren die montagegerechte Produktgestaltung nicht beinhaltet, wird von einer idealen montagegerechten Konstruktion und damit von ausschließlich wertschöpfenden Fügevorgängen ausgegangen, die zu einem Mehrwert des Produkts für den Kunden führen.

<sup>76</sup> vgl. hierzu die Erläuterungen zum Attribut „verschwendungsminimal“ in Kapitel 2.2 und die Definition der Kennzahl M2 in Kapitel 6.1.4

zeichnung des Montageerzeugnisses. Die Richtungsangabe erfolgt mit der Achse (x, y, oder z) und einem Vorzeichen je nach Richtung vom Nullpunkt aus.

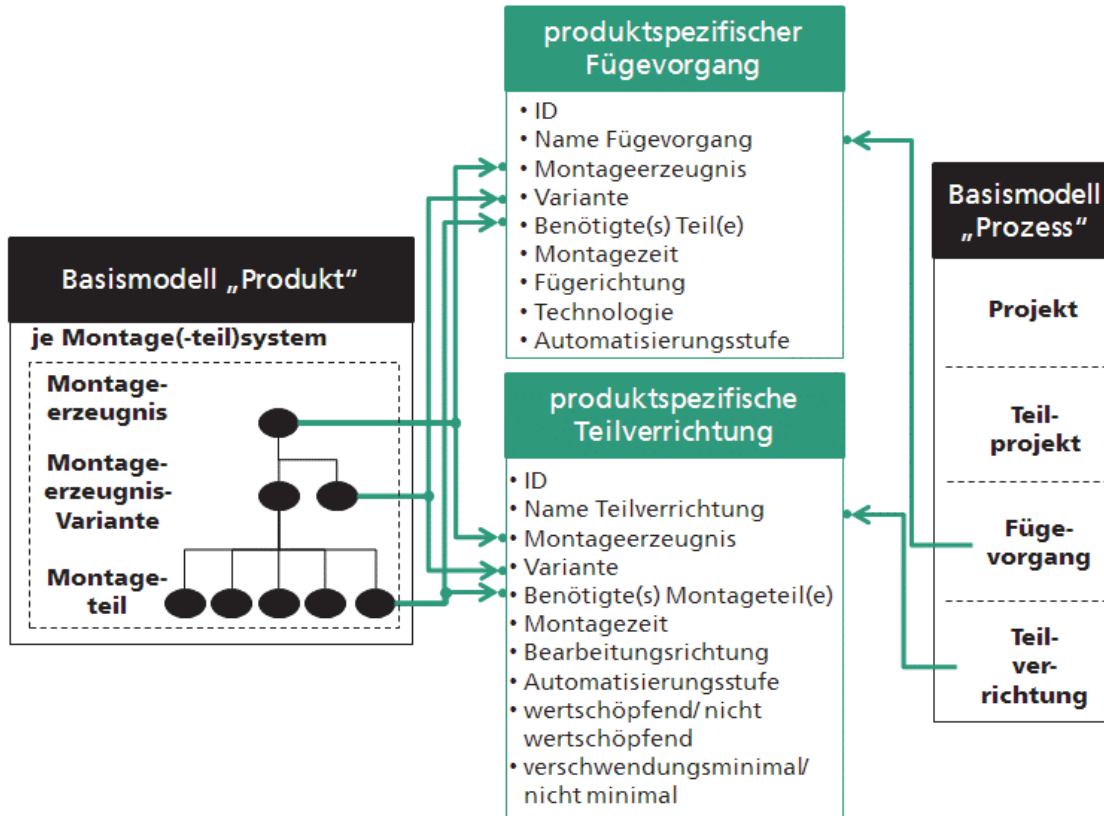
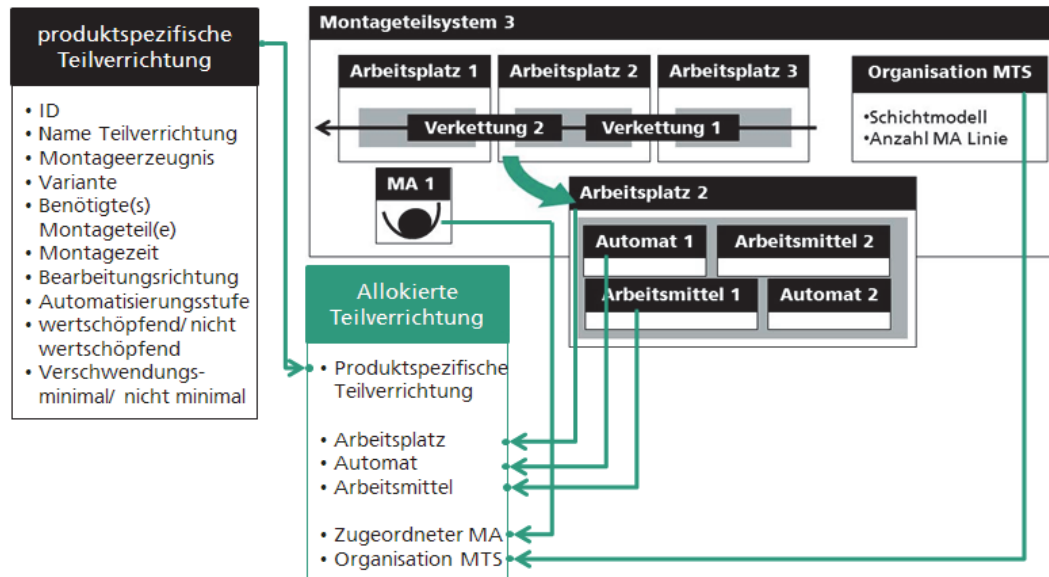


Abbildung 39: Beziehungen zwischen Produkt und Prozess

Abbildung 39 zeigt zusammenfassend die Beziehungen zwischen dem Basismodell Produkt (vgl. Kapitel 6.1) und dem Basismodell Prozess (vgl. Kapitel 6.2), sowie die Attribute zur Spezifikation. Mit dieser Beschreibungsform wird es möglich, sowohl den Ablauf der Fügeprozesse je Erzeugnis als auch die Teilverrichtungen je Erzeugnis bei der Planung von Montagesystemen zu modellieren.

### 6.5.2 Beziehung Prozess zu physischem Montagesystem

Die Beziehung Prozess zu physischem Montagesystem ordnet den auszuführenden Teilverrichtungen im Montagesystem Arbeitsplätze zu, deshalb wird das neue Objekt als „allokierte Teilverrichtung“ bezeichnet. Die folgende Abbildung 40 zeigt die Charakteristika dieser Beziehung zwischen Prozess und physischem Montagesystem.



**Abbildung 40: Beziehungen zwischen Prozess und physischem Montagesystem**

Eine allokierte Teilverrichtung spezifiziert neben der Angabe der produkt-spezifischen Teilverrichtung und dem Arbeitsplatz den verwendeten Automat bzw. die verwendeten Arbeitsmittel an diesem Arbeitsplatz. Weiter werden bei einer manuellen bzw. teilmanuellen Teilverrichtung der ausführende Mitarbeiter und das Schichtmodell zugeordnet. Der zugeordnete Mitarbeiter und die Anzahl Mitarbeiter pro Schicht als Spezifikationswert des Schichtmodells stehen in enger Beziehung zueinander, beispielsweise kann sich die Zuordnung zu den Mitarbeitern bei unterschiedlicher Mitarbeitergesamtzahl ändern.

Analog der allokierten Teilverrichtung wird der allokierte Fügevorgang definiert. Der allokierte Fügevorgang enthält die entsprechenden Attribute analog des in Abbildung 40 dargestellten Objekts der allokierten Teilverrichtung. Mithilfe der allokierten Teilverrichtung und dem allokierten Fügevorgang lassen sich die Beziehungen zwischen den auszuführenden Prozessen und dem physischem Montagesystem vollständig und eindeutig beschreiben. Da die produkt-spezifische Teilverrichtung bzw. der produkt-spezifische Fügevorgang wiederum die Verbindung

von Produkt und Prozess impliziert (vgl. Kapitel 6.5.1), erfolgt durch die Allokation eine Verbindung von sowohl Produkt, Prozess und physischem Montagesystem.<sup>77</sup>

### 6.6 Modellbasierte Bewertung der Montagestückkosten

Eine ausschließliche Bewertung der Verschwendung reicht nicht aus, um unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten eines Montagesystems zu vergleichen.<sup>78</sup> Der Nachweis der Wirtschaftlichkeit erfolgt über die Berechnung der Montagestückkosten. Dieser Teil der Herstellkosten ist relevant für die Bewertung, da die Materialkosten als der andere Teil der Herstellkosten bei definierter Montageaufgabe trotz unterschiedlicher Gestaltung des Montagesystems konstant bleiben. Für die Bewertung der Montagestückkosten als Summe der Montageeinzel- und -gemeinkosten wird das Kalkulationsschema nach Hartel<sup>79</sup> verwendet. Das Kalkulationsschema nutzt die Maschinenstundensatzrechnung zur Verrechnung der Gemeinkosten.<sup>80</sup> Die Montagestückkosten  $K_{st}$  in €/Stück ergeben sich aus der in Abbildung 23 dargestellten Formel nach Hartel:

$$K_{st} = \frac{(K_{MH} + K_P)}{N_L} \quad (6.30)$$

mit

$K_{MH}$  = Maschinenstundensatz in €/h

$K_P$  = Personalkostensatz in €/h

$N_L$  = Nettoleistung in Stck/h

Löst man den Maschinenstunden- und Personalkostensatz nach den Formeln von Hartel weiter auf, ergeben sich die Montagestückkosten folgendermaßen:

---

<sup>77</sup> vgl. in Kapitel 3.1 die Feststellungen von Holle, der die Montageplanung im Wesentlichen als ein „Zuordnungsproblem“ von Produkt, Prozess und Montagesystem betrachtet

<sup>78</sup> vgl. hierzu die Abgrenzung der Begriffe „Verschwendung“ und „Kosten“ in Kapitel 3.4

<sup>79</sup> vgl. das Verfahren von Hartel auf Basis von Lotter in Kapitel 4.1

<sup>80</sup> Alternativ können die Gemeinkosten über Zuschläge verrechnet werden.

$$K_{st} = \frac{\left( \frac{K_A + K_E + K_R + K_Z + K_I}{T_N} \right) + (L_K * MA_{direkt} + G_K * MA_{indirekt})}{N_L} \quad (6.31)$$

mit

$K_A$  = kalkulatorischer Abschreibung in €/Jahr

$K_E$  = Energiekosten in €/Jahr

$K_R$  = Raumkosten in €/Jahr

$K_Z$  = kalkulatorischen Zinsen in €/Jahr

$K_I$  = Instandhaltungskosten in €/Jahr

$T_N$  = Nutzungszeit in h/Jahr

$L_K$  = Lohnkosten inklusive Lohnnebenkosten in €/h

$MA_{direkt}$  = Anzahl Mitarbeiter in der Montage

$G_K$  = Gehaltskosten inklusive Gehaltsnebenkosten in €/h

$MA_{indirekt}$  = Anzahl Vorarbeiter in der Montage

Als Bezugsobjekt für die Ermittlung der Montagestückkosten wird zunächst das Montageteilsystem gewählt. Die Stückkosten des gesamten Montagesystems ergeben sich nachfolgend aus der Summe der einzelnen Montagestückkosten der Montageteilsysteme.

Die modellspezifische Berechnung der Montagestückkosten erfolgt über die Verwendung der zuvor definierten Basismodelle, deren Elemente und deren jeweilige relevante Attribute. In der Folge werden Formeln zur modellbasierten Berechnung der Kostenparameter hergeleitet.

Die kalkulatorische Abschreibung innerhalb eines Montageteilsystems  $K_{A\_MTS}$  ergibt sich aus der Division der einzelnen Wiederbeschaffungswerte  $K_{WB}$  der  $m$  Automaten und Betriebsmittel des MTS in € geteilt durch deren jeweilige Nutzungsdauer  $n$  in Jahren und deren anschließende Summenbildung:

$$K_{A\ MTS} = \sum_{i=1}^m \frac{K_{WB\ i}}{n_i} \quad (6.32)$$

Die Energiekosten eines Montageteilsystems  $K_{E\ MTS}$  ergeben sich aus der Summe der einzelnen Jahres-Energieverbrauchswerte  $EV$  der insgesamt  $m$  einzelnen Automaten und Betriebsmittel innerhalb des Montageteilsystems in der Einheit kWh, multipliziert mit dem Energiepreis  $P_{Energie}$  in €/kWh:

$$K_{E\ MTS} = \left( \sum_{i=1}^m EV_i \right) * P_{Energie} \quad (6.33)$$

Die Raumkosten eines Montageteilsystems  $K_{R\ MTS}$  ergeben sich aus dem Flächenbedarf  $FB_{MTS}$  in m<sup>2</sup>/Jahr multipliziert mit Flächenverrechnungssatz  $FVS_{Gebäude}$  in €/m<sup>2</sup>:

$$K_{R\ MTS} = FB_{MTS} * FVS_{Gebäude} \quad (6.34)$$

Die kalkulatorischen Zinsen eines Montageteilsystems  $K_{Z\ MTS}$  in €/Jahr ergeben sich aus der Summe der Hälften der Wiederbeschaffungswerte  $K_{WB}$  einzelner Automaten und Arbeitsmittel, multipliziert mit dem kalkulatorischen Zinssatz  $p$ :<sup>81</sup>

$$K_{Z\ MTS} = \left( \sum_{i=1}^m K_{WB\ i} \right) * p * 0,5 \quad (6.35)$$

Die Instandhaltungskosten eines Montageteilsystems  $K_{I\ MTS}$  in €/Jahr ergeben sich aus der Summe der Wiederbeschaffungswerte  $K_{WB}$  der  $m$  Automaten und Arbeitsmittel, multipliziert mit dem Instandhaltungs-Verrechnungssatz  $IVS$  für ein Jahr:

$$K_{I\ MTS} = \left( \sum_{i=1}^m K_{WB\ i} \right) * IVS \quad (6.36)$$

Die Nutzungszeit eines Montageteilsystems  $T_{N\ MTS}$  in h/Jahr entspricht der theoretisch verfügbaren Anzahl Betriebsstunden im Jahr, die sich aus dem verwendeten

---

<sup>81</sup> vgl. die Formel für kalkulatorische Zinsen nach Hartel in Abbildung 23, Hartel setzt eine lineare Abschreibung voraus, wodurch die Hälfte des Wiederbeschaffungswerts genommen wird.

Schichtmodell mit den Parametern  $x$  h/Schicht,  $y$  Schichten/Woche und  $z$  Arbeitswochen/Jahr ergeben, multipliziert mit dem Nutzungsfaktor  $NF_{MTS}$ :<sup>82</sup>

$$T_{N_{MTS}} = f(\text{Schichtmodell}) = x * y * z * NF_{MTS} \quad (6.37)$$

Die Lohn- und Gehaltskosten des Montageteilsystems  $L_{K_{MTI}}$  und  $G_{K_{MTI}}$  beinhalten die Lohn- bzw. Gehaltsnebenkosten und entsprechen den Mitarbeiterstundensätzen des direkten und indirekten Personals, das dem Montageteilsystem zugeordnet ist. Die Anzahl der jeweiligen Mitarbeiter wird in der obigen Formel für die Montagestückkosten mit den entsprechenden Mitarbeiterstundensätzen multipliziert.

Die Nettoleistung eines Montageteilsystems  $N_{L_{MTS}}$  in Stck/h entspricht der Ausbringungsmenge des Montageteilsystems in einer Stunde unter der Annahme, dass kein Ausschuss erzeugt wird. Leitet man die Ausbringungsmenge von der Taktzeit und der Produktivzeit (Nutzungszeit ohne Unterbrechungszeitanteile) ab, so berechnet sich aus dem Montagetak  $MT_{MTS}$  in s und dem Nutzungsfaktor  $NF_{MTS}$  die Nettoleistung folgendermaßen:

$$N_{L_{MTS}} = \frac{3600}{MT_{MTS}} * NF_{MTS} \quad (6.38)$$

Werden die Formeln 6.30 bis 6.36 in die Formel 6.29 eingesetzt, so ergeben sich die Montagestückkosten des Montageteilsystems  $K_{ST_{MTS}}$  nach folgender Formel:

$$K_{ST_{MTS}} = \left( \frac{\sum_{i=1}^m \frac{K_{WB_i}}{n_i} + (\sum_{i=1}^m EV_i) * P_{Energie} + FB_{MTS} * FVS_{Gebäude} + (\sum_{i=1}^m K_{WB_i}) * p + (\sum_{i=1}^m K_{WB_i}) * IVS}{x * y * z * \frac{3600}{MT_{MTS}} * NF_{MTS}^2} \right) + \frac{L_K * MA_d + G_K * MA_{ind.}}{\frac{3600}{MT_{MTS}} * NF_{MTS}} \quad (6.39)$$

Zur Berechnung der gesamten Montagestückkosten  $K_{ST_{MS}}$  sind die Kosten der einzelnen Montageteilsysteme zu addieren. Zusätzlich zu den angefallenen Kosten

<sup>82</sup> Der Nutzungsfaktor berücksichtigt somit die Unterbrechungen gemäß der Gliederung der Betriebsmittelzeit nach REFA (2002, S.233 f.)



innerhalb der einzelnen Montageteilsysteme sind auch die Kosten für den Zwischenerzeugnis-Transport zwischen diesen Teilsystemen zu berücksichtigen. Die Berechnung der Kosten für die Transporte innerhalb eines Montagesystems  $K_{ST\ Tr}$  erfolgt über die Verwendung der Formel 6.31 mit ausschließlicher Berücksichtigung von transportrelevanten Betriebsmitteln und Personalaufwänden:

$$K_{ST\ Tr} = \frac{\left( \frac{K_{A\ Tr} + K_{E\ Tr} + K_{R\ Tr} + K_{Z\ Tr} + K_{I\ Tr}}{T_{N\ Tr}} \right) + (L_{K\ Tr} * MA_{Tr\ dir.} + G_{K\ Tr} * MA_{indir.})}{N_L} \quad (6.40)$$

mit

$K_{A\ Tr}$  = kalkulatorischer Abschreibung für Transportbetriebsmittel in €/Jahr

$K_{E\ Tr}$  = Energiekosten der Transportbetriebsmittel in €/Jahr

$K_{R\ Tr}$  = transportspezifische Raumkosten in €/Jahr

$K_{Z\ Tr}$  = kalkulatorischen Zinsen für den Invest der Transportbetriebsmittel in €/Jahr

$K_{I\ Tr}$  = Instandhaltungskosten der Transportbetriebsmittel in €/Jahr

$T_{N\ Tr}$  = Nutzungszeit in h/Jahr

$L_{K\ Tr}$  = Lohnkosten inklusive Lohnnebenkosten der direkten MA in €/h

$MA_{Tr\ dir.}$  = Anzahl direkte MA für den Transport

$G_{K\ Tr}$  = Gehaltskosten inklusive Gehaltsnebenkosten der indirekten MA in €/h

$MA_{Tr\ indir.}$  = Anzahl Vorarbeiter für den Transport

$N_L$  = Nettoleistung in Stück/h

Nach Berechnung der Kosten für die Transporte zwischen den Teilsystemen können die Montagestückkosten des Gesamtsystems bestimmt werden: bei n Montageteilsystemen errechnen sich die Montagestückkosten  $K_{ST\ MS}$  aus der Summe der einzelnen Montagestückkosten der jeweiligen Teilsysteme (Berechnung siehe Formel 6.39) und den Kosten für das Transportieren der Zwischenerzeugnisse  $K_{ST\ Tr}$  (Berechnung siehe Formel 6.40):

$$K_{ST\ MS} = K_{ST\ Tr} + \sum_{i=1}^n K_{ST\ MTS\ i} \quad (6.41)$$

Die Formel (6.41) ist unter der Prämisse gültig, dass kein Ausschuss erzeugt wurde. Werden defekte Montageerzeugnisse produziert und vollständig durch Nacharbeit wiederaufbereitet, ist die Formel (6.41) durch die Nacharbeitsstückkosten  $K_{ST\ Nach}$  zu ergänzen. Unter Berücksichtigung des Sonderaufwands zur Prozessbeherrschung (vgl. die Kennzahlen zur Quantifizierung von Nacharbeit und Ausschuss in Kapitel 6.7.7) ergibt sich:

$$K_{ST\ MS} = K_{ST\ Tr} + \sum_{i=1}^n K_{ST\ MTS\ i} + K_{ST\ Nach} + NA3_{MS} \quad (6.42)$$

In flexiblen Montagesystemen variiert der Mitarbeiterereinsatz pro Schicht oder sogar innerhalb einer Schicht, vor allem die Anzahl direkter Montagemitarbeiter wird entsprechend dem aktuellen Kundentakt angeglichen, um die gewünschte Ausbringungsmenge je Montageerzeugnis zu produzieren. Damit variiert der Personalkostensatz je Stunde nach der Besetzungsquantität. Der Maschinenstundensatz dagegen bleibt konstant, wenn die Automaten und Betriebsmittel zur Produktion aller zugeordneten Montageerzeugnisvarianten eingesetzt werden. Ist letzteres nicht der Fall, muss beim Maschinenstundensatz eine verursachergerechte Kostenaufteilung der Automaten und Betriebsmittel auf die entsprechenden Kostenträger (Montageerzeugnisvarianten) erfolgen.

## 6.7 Modellbasierte Kostenbewertung von Verschwendung

Die definierten Kennzahlen des Basismodells zur Bewertung von Verschwendung quantifizieren die 7 Verschwendungsarten durch messbare physikalische Größen. Diese Größen erhöhen die Montagestückkosten in unterschiedlicher Intensität. Um der Forderung der Reduzierung von Verschwendung nachzukommen, ist der gesamthafte Einfluss der 7 Verschwendungsarten auf die Montagestückkosten von Bedeutung (vgl. Kapitel 5.2.1). Deshalb wird das erste Basismodell zur Bewertung von Verschwendung erweitert, indem die entwickelten Kennzahlen für eine Kostenbewertung der 7 Verschwendungsarten herangezogen werden.

Die Bewertung je Verschwendungsart erfolgt in den folgenden Unterkapiteln jeweils in Stückkosten. Anschließend wird die finale Summenbildung durchgeführt. Doppelt berechnete Kosten werden vermieden, indem nicht eindeutig zuordenbare Kosten wahlweise einer Verschwendungsart zugeordnet werden und bei den anderen Verschwendungsarten unberücksichtigt bleiben.

Durch die Bestimmung der Summe der Verschwendungsstückkosten im Montagesystem und die Berechnung der Montagestückkosten (vgl. Kapitel 6.6) ist es möglich, anhand dieser beiden zusammenfassenden Kennzahlen Planungsszenarien gesamthaft zu bewerten und zu vergleichen.

### **6.7.1 Kostenermittlung für die Verschwendungsart Bestand**

Bestände binden Kapital, benötigen zusätzlichen Flächenbedarf und machen weitere logistische Arbeitsschritte und logistische Ressourcen notwendig (vgl. Kapitel 2.2). Die Verschwendungsstückkosten Bestand  $VK_{\text{Best}}$  setzen sich demnach aus den Kostenarten Flächenkosten, Kapitalbindungskosten und den Kosten für die Lagerbewegungen zusammen.

$I1$  ist die WIP-Bestandsreichweite (vgl. Kapitel 6.1.1), die Kapitalbindungskosten verursacht. Zusätzlich zu den Kapitalbindungskosten entstehen Flächenkosten.

Der Zwischenerzeugnis-Bestandswert  $I3$  wird kostenseitig analog  $I1$  bewertet. Zusätzlich ist der monetäre Aufwand  $K_{\text{ST Tr}}$  für die Transporte der Zwischenerzeugnisse zwischen den Montageteilsystemen zu berücksichtigen (vgl. Formel 6.41).

Der Montagebestandswert  $I5$  wird entsprechend der Kennzahl  $I1$  mit Kapitalbindungs- und Flächenkosten bewertet.

Zusammenfassend ergeben sich die Verschwendungsstückkosten Bestand eines Montagesystems  $VK_{\text{Best MS}}$  aus der Summe der Bestandskapitalbindungskosten eines Montagesystems  $K_{\text{KB Best}}$ , der Summe der Flächenkosten für Bestände  $K_{\text{Fl Best}}$  und des

Kostenaufwands  $K_{ST\,Tr}$  für die Transporte der Zwischenerzeugnisse eines Montagesystems:

$$VK_{Best\,MS} = \sum K_{KB\,Best} + \sum K_{Fl\,Best} + K_{St\,Tr} \quad (6.43)$$

Unter Anwendung der Formel (6.35) für Kapitalbindungskosten<sup>83</sup>, der Formel (6.34) für die Flächenkosten<sup>84</sup> und der Formel (6.40)<sup>85</sup> für die Kosten des Transportaufwands ergibt sich:

$$\begin{aligned} VK_{Best.MS} = & \frac{(\sum I_{1\,MTS} + \sum I_3 + \sum I_{5\,MTS}) * p}{T_N * N_L * 2} + \\ & \frac{(\sum FB_{WIP\,MTS} + \sum FB_{MB\,MTS} + \sum FB_{ZE}) * FVS_{Gebäude}}{T_N * N_L} + \\ & \frac{\left(\frac{K_{ATr} + K_{ETr} + K_{RTr} + K_{ZTr} + K_{ITr}}{T_{NTr}}\right) + (L_{KTr} * MA_{Tr})}{N_L} \end{aligned} \quad (6.44)$$

### 6.7.2 Kostenermittlung für die Verschwendungsart Überproduktion

Die Bewertung erfolgt über Feststellung kostenverursachender Größen, die bei einer Überproduktion abweichend dimensioniert werden müssen als im Vergleich zu einem Montagesystem, dessen Montagetakt bzw. -takte exakt dem Kundentakt entsprechen. Ein Montagetakt unterhalb des Kundentakts löst folgende kostenverursachende Veränderungen im Montagesystem aus:

- Aufbau von zusätzlichem Fertigwarenbestand, der von der Produktionsperiodendauer  $Per_{Prod}$  abhängt, wie lange unterhalb des Kundentakts produziert wird, ohne dass der Fertigwarenbestand abgebaut wird. Dieser

---

<sup>83</sup> Die Berechnung der kalkulatorischen Zinsen eines Bestands entspricht hier den Kapitalbindungskosten für den Bestand.

<sup>84</sup> Raum- und Flächenkosten entsprechen sich vor dem Hintergrund der Projektion des Raums auf die 2 Dimensionen der Fläche, wie bereits von Hartel (vgl. Kapitel 4.1) in der Formel 6.34 durch den Flächenverrechnungssatz angedeutet.

<sup>85</sup> Formel 6.43 berücksichtigt vereinfacht nur direkte MA, was erfahrungsgemäß in den meisten Anwendungsfällen gültig ist.

zusätzliche Fertigwarenbestand erzeugt zusätzliche Kapitalbindungs- und Flächenkosten.

- Aufbau von zusätzlichem Montagebestandwert in Höhe der Montagetaktabweichung  $\ddot{U}2$  (vgl. Kapitel 6.1.2). Der zusätzliche Montagebestandwert erzeugt Kapitalbindungskosten und bei Layout-Relevanz der Bereitstellung auch Flächenkosten.
- Aufbau von zusätzlichem Zwischenerzeugnis-Bestandwert in der Höhe von der Montagetaktabweichung  $\ddot{U}2$ . Der zusätzliche Montagebestandwert erzeugt Kapitalbindungs- und Flächenkosten.
- Aufbau zu vieler bzw. nicht notwendiger Takte. Die als Taktverschwendung bezeichnete Kennzahl  $\ddot{U}3$  definiert die Anzahl nicht notwendige Takte. Die nicht notwendigen Takte erzeugen Kapitalbindung durch den erhöhten WIP sowie Flächenkosten. Zusätzlich sind die Investitionskosten bzw. Wiederbeschaffungswerte von Arbeitsmitteln innerhalb der unnötigen Takte  $K_{WBUT}$  zu berücksichtigen, wie beispielsweise Fördertechnik oder Stationen und Vorrichtungen, die bei einer geringeren Taktanzahl eingespart werden können. Diese vermeidbaren Investitionen bzw. Wiederbeschaffungswerte unnötiger Takte werden mit Kapitalbindungs- und Abschreibungskosten bewertet.

Die Verschwendungsstückkosten eines Montagesystems  $VK_{\ddot{U}berpr. MS}$  setzen sich somit zusammenfassend aus Kapitalbindungs- und Flächenkosten sowie Kosten für Abschreibung zusammen:

$$VK_{\ddot{U}berpr. MS} = \sum K_{KB \ddot{U}berpr.} + \sum K_{Fl \ddot{U}berpr.} + \sum K_A \ddot{U}berpr. \quad (6.45)$$

Unter Anwendung der Formel (6.35) für Kapitalbindungskosten, der Formel (6.34) für die Flächenkosten und der Formel (6.32) für die Abschreibungen ergibt sich:

$$VK_{\ddot{U}berpr. MS} = \quad (6.46)$$

$$\begin{aligned} & \frac{[(\sum_{i=1}^m K_{WBuT\ i}) + \sum(\ddot{U}3_{MTS} * TW_{WIP\ MTS}) + \sum((I3 + I5_{MTS}) * \ddot{U}2_{MTS})] * p}{T_N * N_L * 2} \\ & + \frac{[\sum FB_{uT\ MTS} + (\sum FB_{MB\ MTS} * \ddot{U}2_{MTS} + \sum FB_{ZE} * \ddot{U}2_{MTS})] * FVS_{Geb.}}{T_N * N_L} \\ & + \frac{\sum_{i=1}^m \frac{K_{WBuT\ i}}{n_i}}{T_N * N_L} \end{aligned}$$

Innerhalb der Formel (6.46) bezieht sich der Zwischenerzeugnis-Bestandswert I3 auf den unmittelbar vorgelagerten Puffer des jeweiligen Montageteilsystems. Für die externen Verschwendungsstückkosten Bestand  $VK_{\text{Überpr. ext.}}$ <sup>86</sup> ergeben sich aus der Erhöhung des Fertigwarenbestands folgende Kapitalbindungs- und Flächenkosten:<sup>87</sup>

$$\begin{aligned} VK_{\text{Überpr. ext.}} = & \frac{Per_{Prod} * \ddot{U}2_{MTS} * TW_{FW} * p}{MT * T_N * N_L * 2} + \\ & \frac{FB_{\Delta FW} * FVS_{Gebäude}}{T_N * N_L} \end{aligned} \quad (6.47)$$

Die in der Formel (6.47) angegebene Montagetaktabweichung  $\ddot{U}2_{MTS}$  bezieht sich auf das unmittelbar vor dem Fertigwarenlager vorgelagerte Montageteilsystem.

### 6.7.3 Kostenermittlung für die Verschwendungsart Wartezeiten

Die kostenseitige Bewertung von Wartezeiten erfolgt durch die Berechnung der entsprechenden Personalkosten, die durch Untätigkeit verschwendet werden. Die Formel zur Berechnung der durch Wartezeiten verursachten Verschwendungsstückkosten eines Montagesystems  $VK_{\text{Wart. MS}}$  leitet sich aus den Formeln (6.30) und (6.31) ab. Reduziert man die Formel (6.30) auf den Personalkostensatz und setzt den Maschinenstundensatz auf null, so ergibt sich für die Verschwendungsstückkosten

<sup>86</sup> Kosten, die außerhalb des Montagesystems nach der Abgrenzung aus Kapitel 2.1 anfallen, vgl. hierzu auch das Basismodell „physisches Montagesystem“ aus Kapitel 6.4

<sup>87</sup> Die Kapitalbindungskosten werden über den Fertigwarenmehrbestand berechnet, der abgebildet werden muss, wenn mit einem bestimmten Montagetaktabweichung unterhalb des Kundentakts montiert wird.

durch Wartezeiten unter Verwendung des Abtaktungsverlusts  $W1$  und der Mitarbeiterausfallquote  $W2$ :

$$VK_{Wart. MS} = \frac{L_K * \sum MA_{direkt MTS} * (W1_{MTS} + W2_{MTS})}{\sum N_L} \quad (6.48)$$

### 6.7.4 Kostenermittlung für die Verschwendungsart Bewegung

Nicht wertschöpfende manuelle Teilverrichtungen erzeugen Personalaufwand. Die durch Bewegung induzierten Verschwendungsstückkosten  $VK_{Bew. MS}$  eines Montagesystems berechnen sich unter Verwendung der Formeln (6.30)<sup>88</sup> und (6.31)<sup>89</sup> und dem Anteil an Bewegungsverschwendung der Mitarbeiter als Kennzahl  $M1$ :

$$VK_{Bew. MS} = \frac{L_K * \sum MA_{direkt MTS} * M1_{MTS}}{\sum N_L} \quad (6.49)$$

### 6.7.5 Kostenermittlung für die transportinduzierte Verschwendung

Der Transportaufwand reduziert sich auf die bewegungsinduzierten Verschwendungen innerhalb der einzelnen Montageteilsysteme und die Transporte der Zwischenerzeugnisse mit der in Kapitel 2.1 definierten Abgrenzung eines Montagesystems zur innerbetrieblichen Logistik. Die bewegungsinduzierten Transporte innerhalb der Montageteilsysteme wurden bereits im vorigen Kapitel 6.1.4 behandelt und hinsichtlich der Kosten bewertet. Der Transportaufwand der Zwischenerzeugnisse von Montageteilsystem zu Montageteilsystem wurde bereits bei den Verschwendungsstückkosten Bestand in Kapitel 6.1.1 berücksichtigt. Mit dieser gewählten Zuordnung verbleiben keine weiteren Transportaufwände innerhalb des Montagesystems, die bewertet werden.

Die in Kapitel 6.1.5 entwickelten Kennzahlen  $T5$  und  $T6$  quantifizieren die Verschwendungsart Transporte in der Peripherie. Die als Transportintensität

---

<sup>88</sup> Der Maschinenstundensatz wird gleich null gesetzt, sodass nur die Personalkosten in die Stückkostenberechnung einfließen.

<sup>89</sup> mit der Vereinfachung ohne indirekte Mitarbeiter

Materialversorgung deklarierte Kennzahl T6 beschreibt gemäß Abbildung 31 die Anzahl notwendiger Materialversorgungsvorgänge pro Zeiteinheit, abhängig von den Reichweiten der Montageteile. Diese Materialversorgungsvorgänge erzeugen Personalaufwand, der durch die entsprechenden Personalkosten bewertet wird. Die notwendige Anzahl Mitarbeiter zur Materialversorgung  $MA_{Mat.vers.MTS}$  errechnet sich als Funktion aus T6 und weiteren logistischen Parametern  $Log_x$  außerhalb des Betrachtungsbereichs wie beispielsweise verwendete Transportmittel oder Entfernungen zum Abholort:

$$MA_{Mat.vers. MTS} = f(T6, Log_1, Log_2, \dots) \quad (6.50)$$

Damit ergeben sich die externen transportinduzierten Verschwendungsstückkosten des Montagesystems  $VK_{Transp.ext.}$  aus den Personalkosten für die Materialversorgung:

$$VK_{Transp. ext.} = \frac{L_{K Log.} * \sum MA_{Mat.vers. MTS}}{N_L} \quad (6.51)$$

### 6.7.6 Kostenermittlung für die Verschwendungsart Bearbeitung

Überdimensionierte Betriebsmittel stellen eine Ausprägung von Verschwendung in der Bearbeitung dar (vgl. Kapitel 2.2). Die Kennzahl B1 drückt den Grad der Überdimensionierung in Bezug auf die maximal mögliche Taktzeit relativ zur geforderten Montagezeit aus. Sie ist gültig unter den in Kapitel 6.1.6 angegebenen Bedingungen für neu zu gestaltende Betriebsmittel. Die Verschwendungskosten entstehen durch den Mehraufwand eines höheren Beschaffungswerts an Betriebsmittelkomponenten und –teilen  $MK_{Besch.Betr.}$  um die Taktzeit zu erreichen, die nicht gefordert ist. Der höhere Beschaffungswert erzeugt sowohl Abschreibungs- als auch Kapitalbindungskosten bzw. kalkulatorische Zinsen.

Das als Kennzahl B2 definierte ungenutzte Automatisierungspotenzial beschreibt eine durch die Segmentierung des Montagesystems verursachte Verschwendung an zu geringem Automatisierungsgrad aufgrund reduzierter Stückzahlen in der Einheit



Kosten pro Stück.<sup>90</sup> Damit wurde durch diese Kennzahl bereits implizit eine Kostenbewertung vollzogen.

Die technische Nichtverfügbarkeit von Betriebsmitteln B3 wird nicht mit Kosten bewertet, da in der Praxis mit einem kürzeren Montagetakt unterhalb des Kundentakts reagiert wird, um durch Rüsten oder Stillstände verursachte verlorene Ausbringungsmengen durch schnellere Produktion wieder aufzuholen. Damit ist die Nichtverfügbarkeit von Betriebsmitteln in der Verschwendungsart Überproduktion repräsentiert. Es muss gewährleistet sein, dass die verfügbare Betriebszeit mit der Produktion im Montagetakt einer Produktion im Kundentakt entspricht:

$$\ddot{U}_{2_{MTS}} \geq B3_{MTS} \quad (6.52)$$

Die Anzahl Ausrichtungswechsel B4 wurde bereits bei der Verschwendungsart Bewegung mit Kosten bewertet, da die Ausrichtungswechsel Personalaufwand zur Ausführung nicht wertschöpfender Teilverrichtungen auslösen.

Taktverluste durch Rüsten verringern die Ausbringung  $N_L$ . Deshalb werden die Verschwendungskosten durch Rüsten über die Differenz aus den Stückkosten eines Montageteilsystems mit einer um den Taktverlust B5 höheren Ausbringung als die aktuell gültige Ausbringung bewertet.

Aus Formel (6.31), (6.32), (6.35) und den aus den Kennzahlen abgeleiteten Kostenbewertungsansätzen leitet sich zusammenfassend die Berechnung der durch Bearbeitung induzierten Verschwendungsstückkosten des Montagesystems  $VK_{Bearb.MS}$  ab:

$$VK_{Bearb. MS} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{MK_{Besch.Betr. i}}{n_i} + (\sum_{i=1}^m MK_{Besch.Betr. i}) * p * 0,5}{T_N * N_L} + B2 \quad (6.53)$$

---

<sup>90</sup> vgl. Kapitel 6.1.6, Kennzahl B2

$$+ \sum \frac{K_{St\ MTS} * B5_{MTS}}{N_L + B5_{MTS}}$$

### 6.7.7 *Kostenermittlung für Verschwendung durch Nacharbeit und Ausschuss*

Die Ausschussquote NA1 definiert den Anteil an defekten Montageerzeugnissen an der Gesamtstückzahl. Zur Ermittlung der Verschwendungskosten ist von Bedeutung, ob die als defekt eingestuften Montageerzeugnisse in der Nacharbeit unter wirtschaftlichen Aspekten wiederaufbereitet werden können, oder ob die defekten Erzeugnisse ohne Wertersatz entsorgt werden müssen. Es wird an dieser Stelle die Annahme getroffen, dass alle defekten Montageerzeugnisse in der Nacharbeit wiederaufbereitet werden können, da dieser Zustand bei der Planung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen durch vorbereitende Qualitätsmanagement-Maßnahmen angestrebt werden soll. Damit erfolgt die Kostenbewertung der Verschwendungsstückkosten durch Nacharbeit und Ausschuss ausschließlich durch die Nacharbeitsstückkosten  $K_{ST\ Nach}$ . Ausschusskosten bleiben unberücksichtigt, da keines der Montageerzeugnisse gemäß der Prämisse entsorgt werden muss.

Der Nacharbeitsaufwand NA2 entspricht der durchschnittlichen Montagezeit pro Montageerzeugnis für Nacharbeit. Zur Kostenbewertung der Nacharbeit ist von Bedeutung, ob zusätzliche Betriebsmittel eingesetzt werden, wie beispielsweise an separaten, von den Montagelinien getrennten Nacharbeitsplätzen, oder ob die Montagelinien selbst beispielsweise in Sonderschichten für die Nacharbeit verwendet werden. Im ersten Fall muss ein Montageteilsystem für Nacharbeit unter Verwendung der in Kapitel 6.4 beschriebenen Aufbaustruktur modelliert werden. Für den zweiten Fall, der hier als Prämisse verwendet werden soll, ergeben sich die Verschwendungsstückkosten durch Nacharbeit aus der Multiplikation von NA2 und dem Personalkostensatz  $L_K$ .<sup>91</sup> Der Sonderaufwand zur Prozessbeherrschung pro Stück NA3 ist bereits mit Kosten bewertet.

---

<sup>91</sup> entspricht  $K_{ST\ Nach}$ , vgl. Formel (6.42)

Damit ergibt sich für die Verschwendungsstückkosten Nacharbeit und Ausschuss  $VK_{NA\ MS}$  zusammenfassend folgende Formel:

$$VK_{NA\ MS} = \sum NA2_{MTS} * L_K + \sum NA3_{MTS} \quad (6.54)$$

### 6.7.8 Ermittlung der Verschwendungsstückkosten des Montagesystems

Aus den angegebenen Formeln für die Berechnung der Verschwendungsstückkosten je Verschwendungsart in den Kapiteln 6.7.1 bis 6.7.7 folgt durch Summenbildung zusammenfassend die Berechnung der Verschwendungsstückkosten des gesamten Montagesystems  $VK_{MS}$ :

$$VK_{MS} = VK_{Best.\ MS} + VK_{Überpr.\ MS} + VK_{Wart.\ MS} + VK_{Bew.\ MS} \\ + VK_{Bearb.\ MS} + VK_{NA\ MS} + VK_{Transp.\ ext.} + VK_{Überpr.\ ext.} \quad (6.55)$$

Der Anteil an externen Verschwendungsstückkosten  $VK_{MS\ ext.}$ , der außerhalb der in Kapitel 2.1 definierten Systemgrenze eines Montagesystems wirkt, ergibt sich aus den externen Anteilen der Formel (6.55):

$$VK_{MS\ ext.} = VK_{Transp.\ ext.} + VK_{Überpr.\ ext.} \quad (6.56)$$

---

## **7 Verfahrensablauf zur Gestaltung verschwendungsarmer Fließmontagen**

Nach der Gestaltung der Basismodelle zur Beschreibung, Bewertung und Analyse verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen in Kapitel 6 erfolgt in Kapitel 7 die Beschreibung des Vorgehens zur Gestaltung dieser Montagen. Bei der Beschreibung des Lösungsansatzes eines Verfahrensablaufs in Kapitel 5.2.2 wurden die insgesamt 8 einzelnen Phasen (vgl. hierzu Abbildung 25) benannt und deren Funktionen charakterisiert. In diesem Kapitel erfolgt die detaillierte Beschreibung in Form von einer weiteren Untergliederung der Phasen in Planungsschritte und einer Konkretisierung der jeweils durchzuführenden Planungsprozesse.

Inhaltlich basiert das Verfahren auf dem in Kapitel 4 dargestellten Stand der Technik und erweitert diesen um den Ansatz der Reduzierung von Verschwendung. Das Basismodell zur Bewertung von Verschwendung (vgl. Kapitel 6.1) enthält Kennzahlen, die ein Messen der 7 Verschwendungsarten ermöglicht. Innerhalb des Verfahrens sind diese Kennzahlen zu verwenden, um das Ziel der Verschwendungsreduzierung sicherstellen zu können. Da während der Durchführung des Verfahrensablaufs sukzessive das Modell eines Montagesystems entsteht und dadurch verschiedene Parameter erst nach und nach dimensioniert werden, diese aber zur Berechnung der Kennzahlen erforderlich sind, ist eine Bestimmung bzw. Berechnung erst bei Erreichen einer bestimmten Planungsphase möglich. Den Zusammenhang der Verfügbarkeit von Kennzahlen ab einer jeweiligen Planungsphase zeigt die folgende Abbildung 41 als Ergebnis einer ersten groben Analyse. Die dort dargestellte Matrix stellt weiterführend die Phasen je Kennzahl dar, die einen Haupteinfluss auf deren Ausprägung haben, ebenso zeigt sie potenzielle Anwendungsmöglichkeiten der Kennzahlen auf, in welcher Phase aus inhaltlicher Sicht eine Verwendung zur verschwendungsarmen Gestaltung von Montagesystemen sinnvoll ist.

		Kennzahlen des Bewertungsmodells		Schritte des Verfahrens							
		ID	Kennzahl	1	2	3	4	5	6	7	8
		Legende:									
		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Haupteinfluß auf Kennzahl</li> <li>□ früheste Verfügbarkeit der Kennzahl</li> <li>x potenzielle Anwendung der Kennzahl</li> </ul>									
Bestand	I1	WIP-Bestandswert			○		○ □ x				x
	I2	WIP-Reichweite			○		○ □ x				x
	I3	Zwischenerzeugnisbestandswert			○		□				x
	I4	Zwischenerzeugnisreichweite			○		□				x
	I5	Montagebestandswert			○				○ □ x		x
	I6	Montagebestandsreichweite			○				○ □ x		x
Überproduktion	Ü1	Überproduktionszeit					○ □ x				x
	Ü2	Montagetaktabweichung					○ □ x				x
	Ü3	Taktverschwendung					○ □ x				x
	Ü4	Zwischenerzeugnisbestandswert = I2			○		□				x
	Ü5	Zwischenerzeugnisreichweite = I3			○		□				x
Wartezeiten	W1	Abtaktungsverlust			○		○ □ x				x
	W2	MA-Ausfallquote Störungen			○		○ □ x				x
Bewegung	M1	Anteil Bewegungsverschwendung MA					○ □ x				x
	M2	Anteil Bew.verschwendung Materialpick					○ □ x				x
	M3	Anteil Bew.verschwendung Laufwege							○ □ x		x
	M4	Anteil Bew.verschwendung Werkstück					○ □ x				x
Transport	T1	Anteil Bew.verschw. MA = M1					○ □ x				x
	T2	Anteil Bew.verschw. Materialpick = M2					○ □ x				x
	T3	Anteil Bew.verschw. Laufwege = M3							○ □ x		x
	T4	Anteil Bew.verschw. Werkstück = M4					○ □ x				x
	T5	Verfügbarer Bereitstellplatz			○		○		□ x		
	T6	Transportintensität Materialversorgung			○				○ □ x		
Bearbeitung	B1	Überdimensionierung Betriebsmittel			○	○ □ x					x
	B2	ungenutztes Automatisierungspotenzial			○	○ □ x					x
	B3	technische Nichtverfügbarkeit				○ □ x					x
	B4	Ausrichtungswechsel				○	□ x				x
	B5	Taktverlust Rüsten			○	○	○	○			□ x
Nacharbeit / Ausschuss	NA1	Ausschussquote				○	□ x				x
	NA2	Nacharbeitsaufwand				○	□ x				x
	NA3	Sonderaufwand Prozessbeherrschung				○	□ x				x

Abbildung 41: Kennzahlenverfügbarkeit und -verwendung je Planungsphase

Die folgenden Unterkapitel zeigen die einzelnen Schritte der 8 Phasen der Planung.<sup>92</sup>

### 7.1 Planungsbasis ermitteln

Phase 1 ermittelt die Planungsbasis, indem ausgewählte grundlegende Eingangsgrößen spezifiziert werden. Die folgende Beschreibung der einzelnen Schritte charakterisiert diese Eingangsgrößen.

Schritt 1 benennt das Projekt.<sup>93</sup> Es empfiehlt sich eine Bezeichnung nach der Funktion des zu betrachtenden Montagesystems, z.B. „Elektrowerkzeug montieren“.

Schritt 2 ermittelt die Montageerzeugnisse und deren Montageerzeugnisvarianten. Letztere werden dann verwendet, wenn Montageerzeugnisse ähnliche Produktmerkmale aufweisen und einer übergeordneten Montageerzeugnis-Bezeichnung zugeordnet werden können.<sup>94</sup>

Schritt 3 analysiert die im Montagesystem bereitzustellenden Montageteile. Wie bei der Beschreibung der Elemente des Basismodells „Produkt“ bereits deklariert, ist ein Montageteil entweder ein Einzelteil oder eine Baugruppe, die bei Systemeintritt als solches existiert. Die Feststellung der Montageteile und deren jeweilige Stücklistenkoeffizienten erfolgt durch die Analyse der Produktstruktur mit Hilfe von Stücklisten der Montageerzeugnisse bzw. deren Montageerzeugnisvarianten. Der Zustand bei Systemeintritt erfolgt durch prozessuale Betrachtung vorgelagerter Wertschöpfungsprozesse in der eigenen Produktion sowie im Beschaffungsnetz.

Schritt 4 ermittelt die zu produzierenden Planstückzahlen je Montageerzeugnis pro Zeiteinheit. Die Zahlen basieren entweder auf Vergangenheitswerten und/oder erwarteten Werten im Rahmen von durchgeführten Marktanalysen.

---

<sup>92</sup> vgl. die Darstellung der 8 Phasen in Kapitel 5.2.2, siehe auch Abbildung 25

<sup>93</sup> vgl. die oberste Ebene des Basismodells „Montageprozess“ in Abbildung 36

<sup>94</sup> vgl. das Basismodell „Produkt“ in Abbildung 35

Schritt 5 erfasst die im Unternehmen existierenden Schichtmodelle, also der Anzahl Schichten pro Woche, der verfügbaren Stunden pro Schicht und der Arbeitstage bzw. Arbeitswochen pro Jahr.

Nach Abschluss dieser Phase ist das Basismodell „Produkt“ vollständig erstellt und bleibt während der folgenden Planungsphasen unverändert.<sup>95</sup> Abbildung 42 zeigt zusammenfassend die 5 Schritte der Phase 1.



**Abbildung 42: Verfahrensschritte der Phase „Planungsbasis ermitteln“**

### 7.2 Ablauf Fügeprozesse

Phase 2 umfasst die Eingabe und Verarbeitung des Ablaufs der Fügeprozesse und deckt die planerischen Inhalte der Montageablaufplanung ab. Abbildung 43 zeigt die 3 Planungsschritte, die das Planen des Ablaufs der Fügeprozesse beschreiben.

Schritt 1 ermittelt die im Montagesystem auszuführenden Fügevorgänge unter Verwendung der Stückliste und der Konstruktionszeichnung des Montageerzeugnisses bzw. der Montageerzeugnisvariante, die den technischen Aufbau darstellt.

---

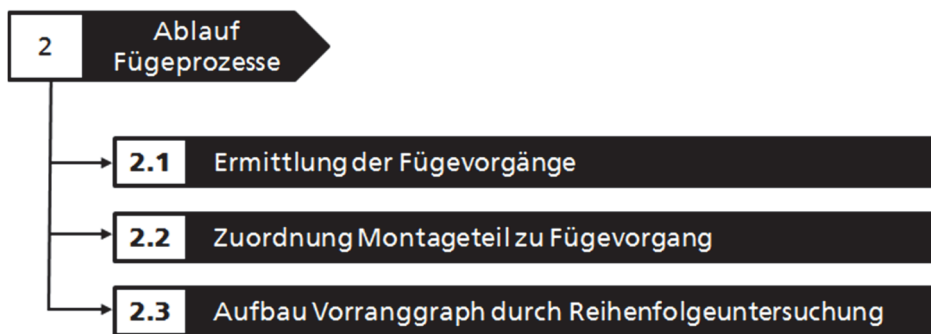
<sup>95</sup> vgl. die Anmerkungen zur montagegerechten Produktgestaltung in Kapitel 3.1

Schritt 2 ordnet den Fügeprozessen das jeweilige Montageteil zu, das für die Ausführung des Fügevorgangs notwendig ist. Die Mehrfachzuordnung von Montageteilen zu Fügevorgängen sowie von Fügevorgängen zu Montageteilen ist dabei möglich. Da jedes Montageteil zwingend einen Fügevorgang zugeordnet haben muss, sofern beiliegende Teile hier unberücksichtigt bleiben, erfolgt die Zuordnung IT-unterstützt durch eine geeignete Oberfläche mit transparenter Überprüfung, ob jeweils eine Zuordnung pro Montageteil existiert. Die IT-Oberfläche stellt auf der einen Seite die Menge der enthaltenen Montageteile dar, auf der anderen Seite die identifizierten Fügevorgänge aus Schritt 1 und ermöglicht eine schnelle Eingabe der Beziehungen. Durch die Zuordnungen entstehen die produktspezifischen Fügevorgänge als Beziehung zwischen den Basismodellen „Produkt“ und „Montageprozess“, wie in Kapitel 6.5.1 beschrieben.

Schritt 3 beinhaltet den Aufbau des Vorranggraphen durch systematische Untersuchung von Reihenfolgerestriktionen der Fügevorgänge bei der Montage des Erzeugnisses. Es werden zunächst die Montageteile anhand der Konstruktionszeichnung zu Montagebaugruppen aggregiert. Diese Montagebaugruppen wie beispielsweise auf einer Welle montierte Montageteile sind nach Abarbeitung der Fügevorgänge Zwischenerzeugnisse während der Montage. Darauf folgen paarweise Vergleiche der Fügevorgänge entsprechender zugeordneter Montageteile innerhalb einer Montagebaugruppe, um deren Restriktion hinsichtlich der Reihenfolge der Montage zu identifizieren. Ist dieser Vorgang innerhalb jeder Montagebaugruppe abgeschlossen, erfolgt die Ermittlung der Restriktionen auf der Ebene der Montagebaugruppen untereinander. Dieses zweistufige Vorgehen kann beliebig je nach Komplexität der Montageerzeugnisstruktur zu weiteren Stufen erweitert werden. Die Eingabe des Vorranggraphen erfolgt innerhalb einer geeigneten IT-Oberfläche, die den beschriebenen Vorgang entsprechend unterstützt und eine benutzerfreundliche Eingabe der Vorgänger-/Nachfolgerbeziehungen ermöglicht. Das IT-Werkzeug überprüft die Eingabe der Relationen auf Vollständigkeit.



Zusammenfassend zeigt Abbildung 43 die Verfahrensschritte der Phase 2.



**Abbildung 43: Verfahrensschritte der Phase „Ablauf Fügeprozesse“**

### 7.3 Segmentierung durchführen

In Phase 3 werden alle planerischen Tätigkeiten ausgeführt, die die Montagestruktur auf der Ebene Gesamt- und Teilsystem festlegen, wie in Kapitel 3.1 als Anforderung definiert. Die 3 zugehörigen Schritte erfolgen in Anlehnung an die Methodik nach Trautsch und Zeile.<sup>96</sup>

In Schritt 1 werden Ähnlichkeiten von Montageerzeugnissen bzw. deren Varianten untersucht. Je ähnlicher die zu produzierenden Erzeugnisse, desto wirtschaftlicher ist deren Herstellung, da Skaleneffekte<sup>97</sup> genutzt werden können. Hierzu wird das durch Trautsch modifizierte und vereinfachte Verfahren von Zeile verwendet, da es mit geringem Aufwand anzuwenden ist und die interaktive Miteinbeziehung des Planers aufgrund der geringeren Komplexität unterstützt. Folgende Eigenschaften begünstigen nach Trautsch eine Zusammenfassung von Erzeugnissen innerhalb desselben Montageteilsystems (vgl. Abbildung 18):

- Funktionsgleiche Baugruppen, wegen des Montageablaufs
- Gleichteile, wegen des Aufwands der Bereitstellung

---

<sup>96</sup> vgl. hierzu das Verfahren nach Zeile und die Anmerkungen zur Vereinfachung des Verfahrens durch Trautsch in Kapitel 4.1

<sup>97</sup> vgl. hierzu die Lernkurve in Kapitel 1 und das Automatisierungspotenzial in Kapitel 2.2

- dieselben Montagetechnologien, wegen der benötigten Betriebsmittel
- beherrschbarer Montageumfang, wegen der Komplexität der Montageaufgabe
- beherrschbare Abmessungen/Gewicht, wegen des Materialflusses und der Handhabung

Die Ermittlung der Ausprägungen einzelner Kriterien erfolgt entweder durch Abschätzen oder genauer durch die Berechnung der partiellen Distanzen mit Hilfe der Formeln in Abbildung 18.

In Schritt 2 erfolgt die Berechnung der Gesamtdistanz der Erzeugnisse untereinander. Sie berechnet sich durch die Summe der einzelnen partiellen Distanzen unter Anwendung der Formel (4.1).

Auf Basis der Gesamtdistanzen werden in Schritt 3 die Segmentierungsgruppen gebildet. Dieser Schritt der Bildung von Segmentierungsgruppen beeinflusst eine Vielzahl der Kennzahlen zur Ermittlung der Verschwendung (vgl. Abbildung 41). Gründe hierfür sind einerseits die mit der Definition von Segmentierungsgruppen einhergehende Festlegung der Stückzahlen je Montageteilsystem, die wiederum viele der Kennzahlen beeinflussen. Abbildung 41 zeigt auf, dass die Kennzahlen innerhalb dieser Planungsphase noch nicht berechnet werden können, da die benötigten montageteilsystemspezifischen Parameter noch nicht bestimmt sind. Deshalb wird innerhalb dieses Schritts die Bildung mehrerer Planungsszenarien zugelassen. Die Planungsszenarien werden gemäß der Systemstrukturierung nach Pawellek in Kapitel 2.4 Abbildung 13, nach dem Prinzip der mehrstufigen Variantenbildung<sup>98</sup> in den folgenden Phasen einzeln weiterbetrachtet.

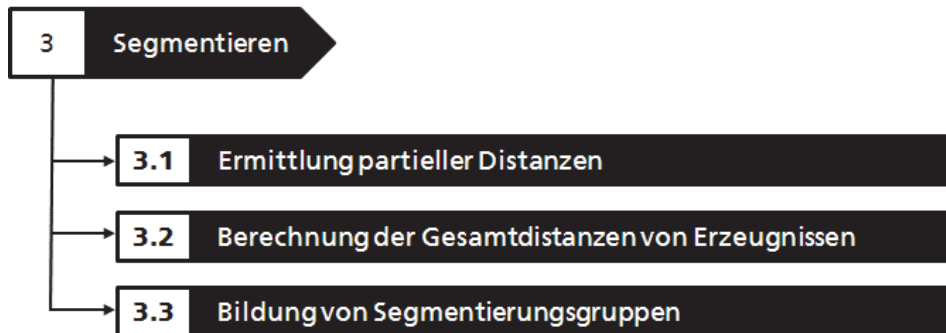
Durch Anwendung des vereinfachten Verfahrens von Trautsch zur Bestimmung von Distanzen auf Montageerzeugnis-Ebene ist durch den Planer zu prüfen, ob eine Segmentierung der Montageinhalte aufgrund ähnlicher Produktstrukturen in Betracht zu ziehen ist. Durch Analyse der erzeugnisspezifischen Vorranggraphen

---

<sup>98</sup> Variantenbildung ist hier gleichzusetzen mit der Bildung von Planungsszenarien

sind Baugruppen zu erkennen, die ähnlich oder identisch sind und daher innerhalb einer oder mehrerer Vormontagen zusammengefasst werden können.

Abbildung 44 veranschaulicht zusammenfassend die 3 beschriebenen Verfahrensschritte der Phase 3:



**Abbildung 44: Verfahrensschritte der Phase „Segmentieren“**

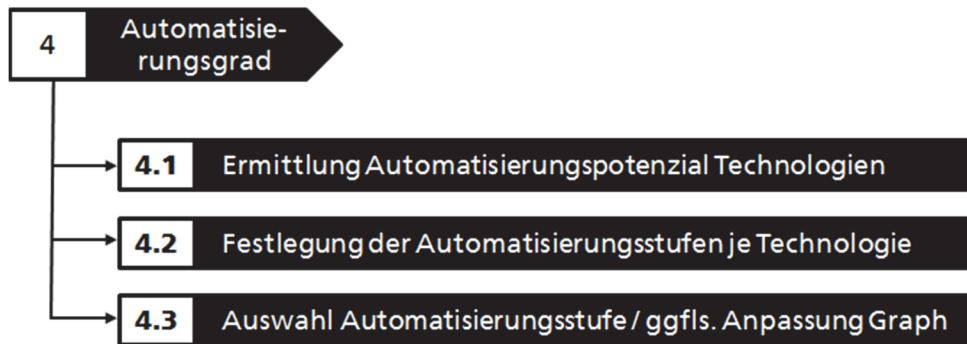
### 7.4 Automatisierungsgrad bestimmen

Phase 4 dient der Bestimmung des Automatisierungsgrads.<sup>99</sup> Die in den Vorranggraphen definierten Fügevorgänge enthalten in diesem Planungsstadium noch keine Aussage über die manuelle oder automatisierte Verrichtung. Die teilweise sehr komplexe Entscheidung muss für jeden einzelnen Fügevorgang getroffen werden. Die Einflussfaktoren der technischen Machbarkeit bei gleichzeitiger Forderung ökonomischer Lösungen sind je Technologie zu prüfen.

Die Bestimmung des Automatisierungsgrads erfolgt in 3 Schritten, deren Sequenz in Abbildung 45 dargestellt ist.

---

<sup>99</sup> Definition und Erläuterung der Optimierungsproblematik siehe Kapitel 2.2



**Abbildung 45: Verfahrensschritte der Phase „Automatisierungsgrad bestimmen“**

Schritt 1 ermittelt das Automatisierungspotenzial je Technologie und teilt sich in 4 weitere Unterschritte:

- Untersuchung der technischen Automatisierbarkeit
- Clustern der Fügevorgänge nach verwendeten Montagetechnologien
- Parallelisieren von Fügevorgängen im Vorranggraphen
- Zusammenfassung zu Gruppen von integriert automatisierbaren Fügevorgängen

Grundvoraussetzung für eine Automatisierung ist die technische Machbarkeit, die von einer Vielzahl von objekt- und prozessbezogenen Kriterien abhängt.<sup>100</sup> Deshalb werden zunächst die Fügevorgänge bestimmt, die aus technischer Sicht automatisierbar sind.

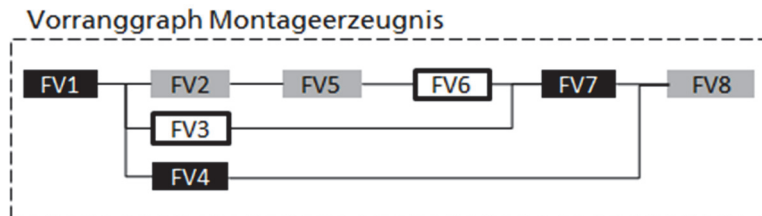
Diese technisch automatisierbaren Fügevorgänge werden in einem nächsten Unterschritt nach deren Fügetechnologie (z.B. Kleben, Stecken oder Schrauben) kategorisiert.<sup>101</sup> Von besonderer Bedeutung ist hier die Berücksichtigung der Fügerichtung. Sind im Vorranggraphen beispielsweise Schraubvorgänge mit derselben Fügerichtung enthalten, besteht die Möglichkeit einer Integration innerhalb eines Automaten, was das eigentliche Ziel der Untersuchung darstellt. Können Fügevorgänge mit technisch einfachen Bewegungen integriert innerhalb eines Betriebsmittels automatisiert werden, so ist einerseits die Investitionssumme

---

<sup>100</sup> hierzu bietet Kratzsch eine Checkliste in Form eines morphologischen Kastens an (2000, S.69)

<sup>101</sup> vgl. die Funktionen der Montage nach Lotter in Abbildung 7

vergleichsweise gering und gleichzeitig die eingesparte manuelle Bearbeitungszeit maximiert. Auch unterschiedliche Technologien wie beispielsweise das Einpressen von Lagern und das Verschrauben von Teilen können prinzipiell innerhalb eines Automaten integriert werden, sofern die Fügerichtung übereinstimmt.



Legende:

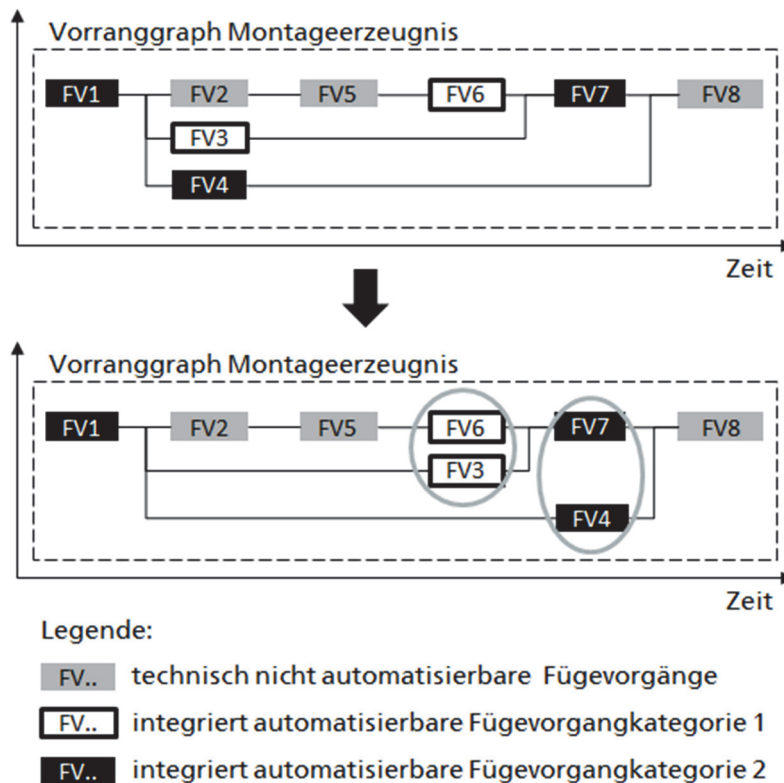
- FV.. technisch nicht automatisierbare Fügevorgänge
- FV.. integriert automatisierbare Fügevorgangskategorie 1
- FV.. integriert automatisierbare Fügevorgangskategorie 2

**Abbildung 46: Vorranggraph mit integriert automatisierbaren Fügevorgangskategorien**

In einem weiteren Unterschritt werden die zuvor definierten Kategorien einzeln im Vorranggraphen untersucht, ob deren zugeordneten Fügevorgänge zeitlich parallel bearbeitbar sind.

Zu diesem Zweck wird der Vorranggraph in einer abgewandelten Form verwendet: per Definition stellt ein Vorranggraph die Abhängigkeiten der Vorgänge untereinander dar. Wird in x-Richtung die Dimension der Zeit ergänzt, so kann der Vorranggraph die tatsächliche Abfolge der Fügevorgänge von links nach rechts visualisieren. Diese Erweiterung des Vorranggraphen wird hier benutzt und der neue Graph in der Folge als Montagesequenzdiagramm bezeichnet.

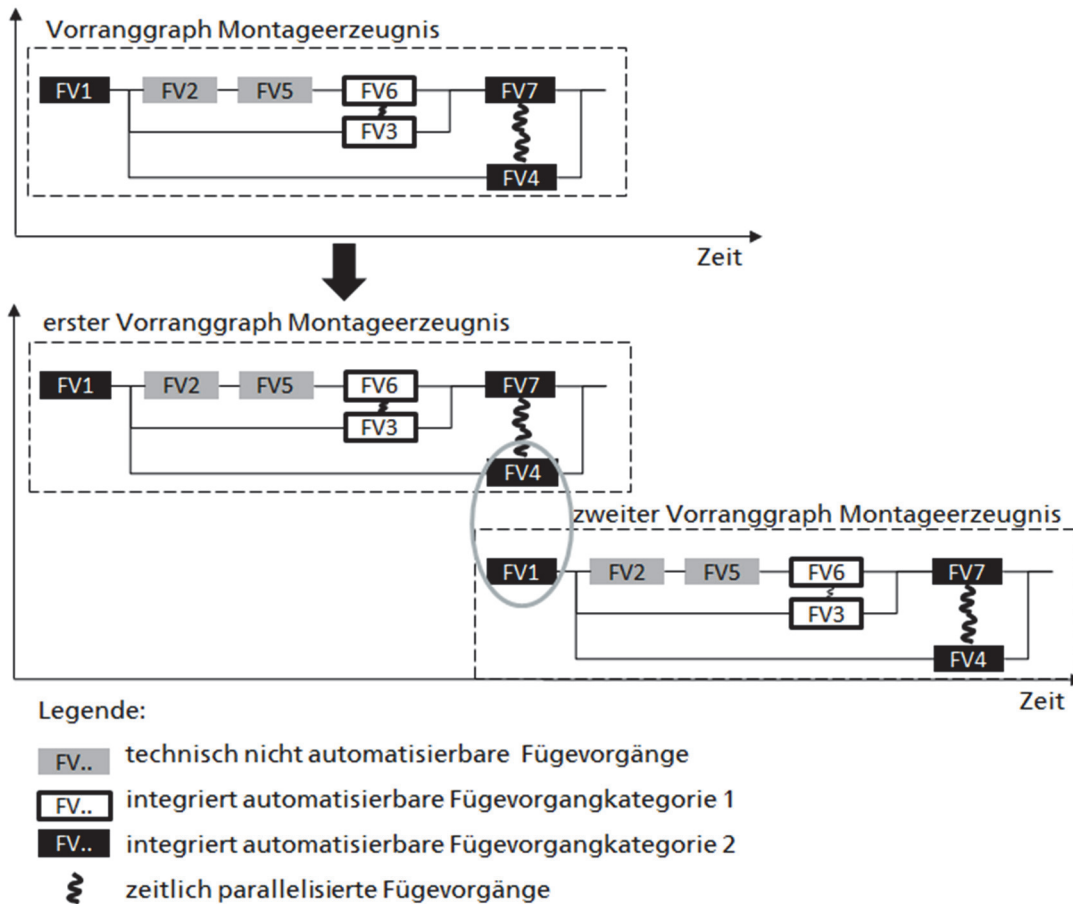
Das zeitliche Parallelisieren kann auf 2 unterschiedliche Arten erfolgen. Die einfachere Form der zeitlichen Parallelisierung kategorisierter Fügevorgänge ist die Verwendung von Fügevorgängen desselben Werkstücks bzw. Montageergebnisses, also die Parallelisierung innerhalb eines Montagesequenzdiagramms. Hier werden am selben Werkstück beispielsweise Schraubvorgänge gleichzeitig ausgeführt.



**Abbildung 47: Zeitliches Parallelisieren von Fügevorgängen – Möglichkeit 1**

Die zweite Form der zeitlichen Parallelisierung ist die Verwendung von 2 Werkstücken bzw. Montageerzeugnissen. Zum Beispiel können 2 Werkstücke innerhalb eines Automaten gleichzeitig geschraubt werden, wobei jeweils unterschiedliche Schraubpositionen an den beiden Werkstücken bedient werden. Es werden 2 Vorranggraphen desselben Erzeugnisses innerhalb eines Montagesequenzdiagramms zeitlich übereinander gelegt und die entsprechenden Fügevorgänge zeitlich parallelisiert.

Die folgende Abbildung 48 verdeutlicht eine solche zeitliche Parallelisierung, im gezeigten Beispiel wird der Fügevorgang 1 zeitlich zu den Fügevorgängen 4 und 7 parallelisiert, wodurch prinzipiell eine gemeinsame Automatisierung der Fügevorgänge 1, 4 und 7 möglich wird.



**Abbildung 48: Zeitliches Parallelisieren von Fügevorgängen – Möglichkeit 2**

Nach Feststellung der zeitlichen Parallelisierung werden im letzten Unterschnitt die verbleibenden Gruppen von Fügevorgängen festgeschrieben, damit ist das Automatisierungspotenzial der Technologien ermittelt.

In Schritt 2 erfolgt die Festlegung der Automatisierungsstufen je Gruppe von Fügevorgängen mit Automatisierungspotenzial. Die betrieblichen Funktionen der Montageplanung sowie der Betriebsmittelkonstruktion entwerfen gemeinsam technische Lösungen für Automatisierungsstufen. Diese technischen Lösungen werden im Folgenden Automat genannt.<sup>102</sup> Der manuellen Bearbeitung werden dadurch teil- sowie vollautomatisierte Lösungen gegenübergestellt. Es sind von der

<sup>102</sup> siehe die Objektbezeichnung im Basismodell „physisches Montagesystem“ in Kapitel 6.4

Konstruktion technische Konzepte zur Gestaltung entsprechender Automaten zur Teil- bzw. Vollautomatisierung zu entwerfen. Wichtige Eingangsgrößen für die Betriebsmittelkonstruktion sind die zu erreichenden Stückzahlen pro Zeiteinheit<sup>103</sup> sowie die technische Beschreibung der zu automatisierenden Fügevorgänge.

Schritt 3 bewertet die entwickelten Detaillösungen der Automatisierungsstufen je Gruppe von integriert automatisierbaren Fügevorgängen.<sup>104</sup> Neben der prozess-technischen Bewertung im Sinne einer Erfüllung der Konstruktionsaufgabe erfolgt die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer entsprechend zu tätigen Investition unter Verwendung der statischen bzw. bei längerer Nutzungsdauer dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung. Die Kalkulation der Automatisierungsstufen erfolgt rechnergestützt mit grafischer Visualisierung der Break-Even-Punkte innerhalb eines Kosten-Stückzahl-Diagramms, um Entscheidungstransparenz zu schaffen. Abbildung 49 zeigt die Gegenüberstellung der zu einer Gruppe von integriert automatisierbaren Fügevorgängen zuordenbaren Kosten je Automatisierungsstufe in Abhängigkeit der Stückzahl.

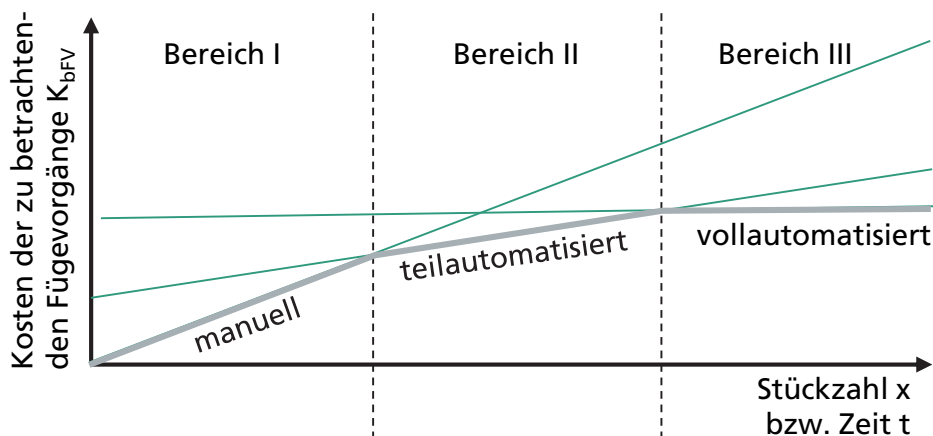


Abbildung 49: Kostenvergleich zur Bestimmung der Automatisierungsstufe

<sup>103</sup> wurde durch die Planungsstufe der Segmentierung definiert

<sup>104</sup> siehe Schritt 1



Der Kostenverlauf je Stufe ergibt sich aus der Summe der variablen Personalkosten und der Investitionssumme als stückzahlunabhängiger Fixkostenanteil:

$$K_{bFV} = I_{BM} + K_P * t * x \quad (7.1)$$

$K_{bFV}$  = einer Gruppe von integriert automatisierbaren Fügevorgängen zugeordnete Kosten

$I_{BM}$  = Investitionssumme der Betriebsmittel für die zu betrachtenden Fügevorgänge

$K_P$  = Personalkostensatz

$t$  = Montagezeit des Mitarbeiters für die betrachteten Fügevorgänge

$x$  = Stückzahl

Die Abbildung 49 zeigt 3 Stückzahlbereiche. Im unteren Stückzahlbereich I ist die manuelle Bearbeitung die kostengünstigste Lösung, während im mittleren Stückzahlbereich II die teilautomatisierte Stufe und im hohen Stückzahlbereich III die vollautomatisierte Stufe die kostengünstigste Lösung darstellt. Die Formel (7.1) stellt eine vereinfachte statische Variante der Wirtschaftlichkeitsberechnung dar. Sind weitere Kostenpositionen wie Instandhaltungs- oder Rüstkosten sowie Kapitalzinsen von Relevanz, muss die Formel entsprechend erweitert werden.

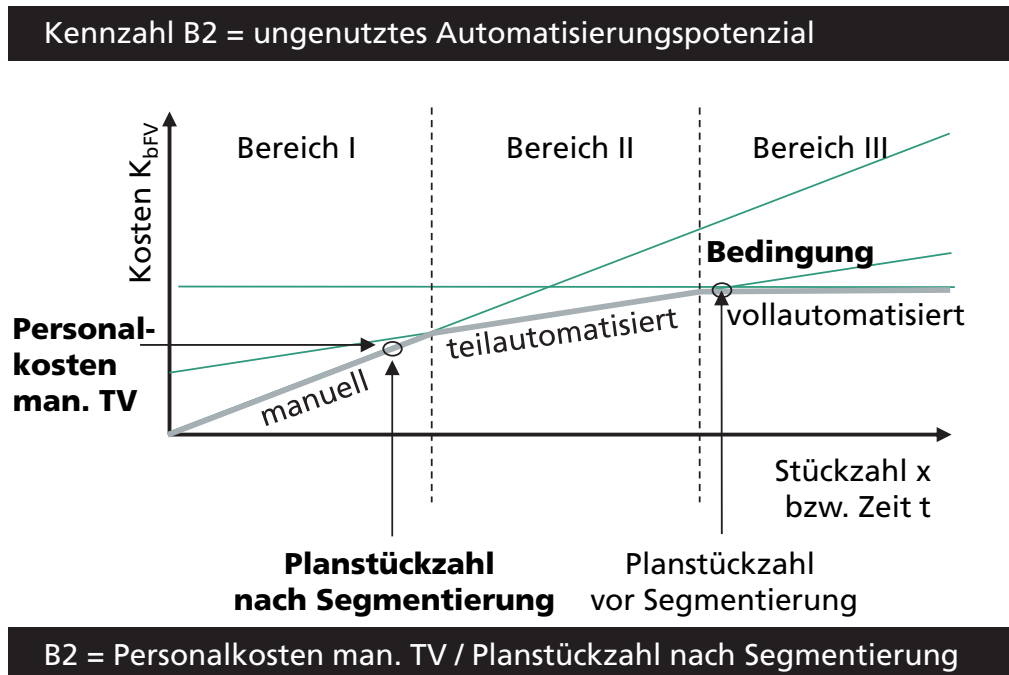
Auf der Abszisse des Diagramms in Abbildung 49 ist mit Hilfe des Produktionsprogramms durch Umrechnen der Stückzahlen in Zeiteinheiten ein visuelles Ablesen der Amortisationsdauer möglich. Die Amortisationsdauer ist ein zusätzlicher Faktor bei der Entscheidung für oder gegen eine Investition, eine kurze Amortisationsdauer sichert die Liquidität.

Eine erste Kennzahl zur Feststellung der Verschwendungsart Bearbeitung wird dem Planer im Schaubild des Kosten-Stückzahl- bzw. des Kosten-Zeit-Diagramms aus Abbildung 49 zur Verfügung gestellt. Die Kennzahl B2 beschreibt das ungenutzte Automatisierungspotenzial.<sup>105</sup> Da die Segmentierung in der vorherigen Phase ausschließlich auf Ähnlichkeitsuntersuchungen der Produkte basierte, wird beim aktuellen Planungsschritt ergänzend überprüft, ob dies nachteilige Auswirkungen

---

<sup>105</sup> vgl. Kapitel 6.1.6

auf die Automatisierungsmöglichkeiten hat, da durch die Segmentierung gleichzeitig eine Stückzahlreduzierung erfolgt und Skaleneffekte verloren gehen können. Die folgende Abbildung zeigt die grafische Herleitung der Kennzahl B2 im Schaubild.



**Abbildung 50: Ermittlung des ungenutzten Automatisierungspotenzials**

Das ungenutzte Automatisierungspotenzial ist dann zu prüfen, wenn die Planstückzahl nach der Segmentierung in Bereich I liegt und die ursprünglichen Gesamtstückzahlen vor der Segmentierung in Bereich II oder III liegen. Bei hohem ungenutztem Automatisierungspotenzial sind durch den Planer alternative Planungsszenarien mit veränderter Segmentierung zu betrachten und in den folgenden Schritten zu detaillieren.

Nach Entscheidung für bestimmte Automatisierungsstufen je Gruppe von Fügevorgängen werden die Montagesequenzdiagramme entsprechend angepasst. Das Montagesequenzdiagramm enthält zu diesem Planungszeitpunkt einerseits Restriktionen zwischen den Fügevorgängen durch die zusammengefassten Automatisierungen, andererseits enthält es die Freiheitsgrade der zeitlichen Einordnung durch horizontales Verschieben entlang der Beziehungskanten. Die

Darstellung im Montagesequenzdiagramm berücksichtigt die parallelisierten Fügevorgänge durch Kennzeichnung anhand einer Verbindungslinie (siehe Abbildung 48). Die im Montagesequenzdiagramm enthaltenen Fügevorgänge sind produktspezifisch. Nach Festlegung der Automatisierungsstufe wird der Automatisierungsgrad (automatisch/teilautomatisch/manuell) ergänzt.<sup>106</sup>

Nach der Entscheidung für bestimmte Automatisierungsstufen werden die benötigten Automaten als Objekte des Modells eines physischen Montagesystems<sup>107</sup> im IT-System erfasst und durch ihre Attribute näher spezifiziert. Eine Objekteigenschaft des Automaten ist die Kennzahl B3 als technische Nichtverfügbarkeit, die wiederum von der Konstruktion der Betriebsmittel und der Komplexität des auszuführenden Prozesses abhängt. Sind keine Erfahrungswerte vorhanden, werden Zielwerte definiert bzw. wird die technische Nichtverfügbarkeit abgeschätzt. Der Automat wird dem Objekt der allokierten Teilverrichtung (vgl. Kapitel 6.5.2) zugeordnet, um das Betriebsmittel und den dort auszuführenden Prozess miteinander zu verknüpfen.

Es ist zu beachten, dass im Rahmen der Sequenzierung unterschiedliche Montagesequenzdiagramme für dasselbe Montageerzeugnis bzw. für dieselbe Montageerzeugnisvariante entstehen können. Je nach Zuordnung der Erzeugnisse zu Montageteilsystemen entstehen unterschiedliche Stückzahlenszenarien, die wiederum unterschiedliche Automatisierungsstufen auslösen können.

### 7.5 Linie planen

Der Schritt „Linie planen“ widmet sich der Ausgestaltung der durch die Segmentierung entstandenen Montageteilsysteme. Schritt 1 kalkuliert den Kundentakt, indem die verfügbare Produktionszeit  $PZ_{\text{verf.}}$  bezogen auf einen Zeitraum durch die nachgefragte Stückzahl  $STK_{\text{nachfr.}}$  innerhalb dieses Zeitraums dividiert wird (vgl. die Definition von Rother in Kapitel 2.2):

---

<sup>106</sup> siehe die Beschreibung des Objekts „teilespezifischer Fügevorgang“ in Kapitel 6.5.1, Abbildung 39

<sup>107</sup> vgl. das Modell in Kapitel 6.4, Abbildung 37

$$KT = \frac{PZ_{\text{verf.}}}{STK_{\text{nachfr.}}} \quad (7.2)$$

Dabei ist die verfügbare Produktionszeit vom Schichtmodell abhängig, das im Modell des physischen Montagesystems als Teil des Objekts „Montageteilsystem-Organisation“ definiert wurde.<sup>108</sup> Das Schichtmodell wird entweder durch Vergleich der Erfahrungswerte der Ausbringung pro Schicht ähnlicher bereits vorhandener Montageteilsysteme mit der Nachfrage gewählt, oder alternativ durch initiale Verwendung der personalkostengünstigsten Anzahl Schichten, wenn noch keine Vergleichszahlen vorhanden sind. Die Stückzahl errechnet sich aus den in Schritt 1.4 ermittelten Planstückzahlen je Montageerzeugnis. Die hier berücksichtigten Montageerzeugnisse sind Teil der in Schritt 3.3 definierten Segmentierungsgruppe des jeweils behandelten Montageteilsystems.

Schritt 2 definiert Teilverrichtungen auf Basis der in den Montagesequenzdiagrammen vorhandenen produktspezifischen Fügevorgänge. Dieser Schritt detailliert das Basismodell „Montageprozess“ aus Kapitel 6.3 eine Stufe weiter, indem die Fügevorgänge in Teilverrichtungen unterteilt werden. Dabei wird zuerst der jeweilige wertschöpfende Fügevorgang als Teilverrichtung mit identischer Benennung deklariert. Es folgen nicht wertschöpfende,<sup>109</sup> jedoch notwendige Teilverrichtungen, die erst durch die Gestaltung des physischen Montagesystems wie z.B. „Werkstück bewegen“ ausgeführt werden müssen. Diese Teilverrichtungen ergeben sich aus einer Detailbetrachtung der auszuführenden Tätigkeiten in der Peripherie des betrachteten Fügevorgangs wie beispielsweise die Materialzufuhr oder das Benutzen von Werkzeugen. Wenn für den Fügevorgang in der Phase 4 eine Automatisierungsstufe definiert wurde, ergeben sich aus den dort entwickelten technischen Konstruktionen der Betriebsmittel und deren Bedienung weitere Teilverrichtungen, wie beispielsweise die Teilverrichtung „Startknopf be-

---

<sup>108</sup> vgl. Kapitel 6.4, Abbildung 37, das Objekt „Montageteilsystem-Organisation“ ist Teil des Objekts „Montageteilsystem“

<sup>109</sup> vgl. die nicht wertschöpfenden Montagefunktionen nach Jonas in Kapitel 2.2 und Abbildung 7

tätigen“ oder andere vor- und nachbearbeitende Tätigkeiten. Die Montagesequenzdiagramme werden entsprechend erweitert, sodass die substituierten produktspezifischen Fügevorgänge durch deren produktspezifischen Teilverrichtungen inklusive der Reihenfolgerestriktionen abgebildet sind.

Schritt 3 umfasst die Bestimmung der verschwendungsminimalen Sollzeiten der einzelnen Teilverrichtungen. Entsprechend der klassischen Montageplanung aus Kapitel 2.3<sup>110</sup> erfolgt die Ermittlung der Zeiten entweder durch Erfahrungswissen bei bereits vorhandenen ähnlichen Prozessen oder durch ein Abschätzen, wenn der Montageprozess einfach zu beurteilen ist. Entsprechend der Kategorisierung der produktspezifischen Teilverrichtungen in „wertschöpfend“ und „nicht wertschöpfend“<sup>111</sup> leiten sich die Sollzeiten aus unterschiedlichen Parametern ab. Die Sollzeiten der wertschöpfenden Teilverrichtungen, die aus den Fügevorgängen im vorigen Schritt 2 abgeleitet wurden, ergeben sich durch die gewählte Automatisierungsstufe bzw. durch technologische Parameter. Zum Beispiel wird die Sollzeit für das Eindrehen einer Schraube durch die Drehzahl des Automaten- bzw. Handschraubers bestimmt. Da diese Größen in der Regel durch vorhergehende Untersuchungen verfügbar sind, besteht die Herausforderung in der Ermittlung der Sollzeiten nicht wertschöpfender Teilverrichtungen. Bestehen keine Erfahrungswerte und ist zugleich die Prozesszeit schwer abschätzbar, wird in diesem Verfahren das MTM-UAS-System als System vorbestimmter Zeiten verwendet.<sup>112</sup> Es werden die Grundvorgänge „Aufnehmen und Platzieren“ sowie das „Platzieren“ verwendet. MTM-UAS enthält für diese beiden Grundvorgänge vorbestimmte parameterabhängige Sollzeiten. Diese Parameter sind:

- die Entfernung des Greifpunkts zum Fügepunkt
- das Gewicht des zu greifenden Teils

---

<sup>110</sup> entspricht in Abbildung 12 dem Schritt 3.3 Montagezeitermittlung

<sup>111</sup> vgl. die Attribute des Objekts „produktspezifische Teilverrichtung in Abbildung 39

<sup>112</sup> vgl. die Ausführungen zu MTM in Kapitel 2.3

- der Kontrollaufwand beim Greifen des Teils (bereits vereinzelte Teile sind leichter zu greifen als undefiniert positionierte Teile innerhalb eines Behältnisses)
- der Aufwand beim Platzieren des Teils (je ungenauer das Teil platziert werden muss, desto schneller kann der Prozess durchgeführt werden).

Entsprechend den jeweiligen Rahmenbedingungen ist die gegebene Sollzeit den MTM-UAS-Tabellen zu entnehmen. Da die verschwendungsminimale Sollzeit zu ermitteln ist, wird die Entfernung des Greifpunkts zum Fügepunkt zunächst als minimal angenommen. Die minimale Entfernung entspricht in MTM-UAS dem Entfernungsbereich 1 und bedeutet eine Entfernung kleiner 20 cm. Ist zu diesem Zeitpunkt aufgrund örtlicher Rahmenbedingungen diese Entfernung nicht umsetzbar, werden größere Entfernungen angenommen und die Entfernungsbereiche 2 und 3 zugrunde gelegt. Entsprechend wird mit den Parametern des Kontrollaufwands beim Greifen und beim Aufwand für das Platzieren verfahren. Es werden die jeweils günstigsten Parameterkategorien ausgewählt, sofern nicht bereits bekannt ist, dass diese aufgrund bekannter Rahmenbedingungen nicht realisierbar sind. Sind die jeweils günstigsten Parameter realisierbar, so wird die Sollzeit der Teilverrichtung verschwendungsminimal. Dieses Attribut ist der produktspezifischen Teilverrichtung entsprechend zuzuordnen.<sup>113</sup> Damit ist es auf Basis der Sollzeiten aus MTM möglich, die Kennzahl M2 zu berechnen. M2 entspricht der Summe der Differenzzeiten zwischen der geringstmöglichen Sollzeit MTM und der tatsächlichen Sollzeit der Teilverrichtung. Die Differenzzeit wird null, wenn die Teilverrichtung als verschwendungsminimal deklariert wurde.

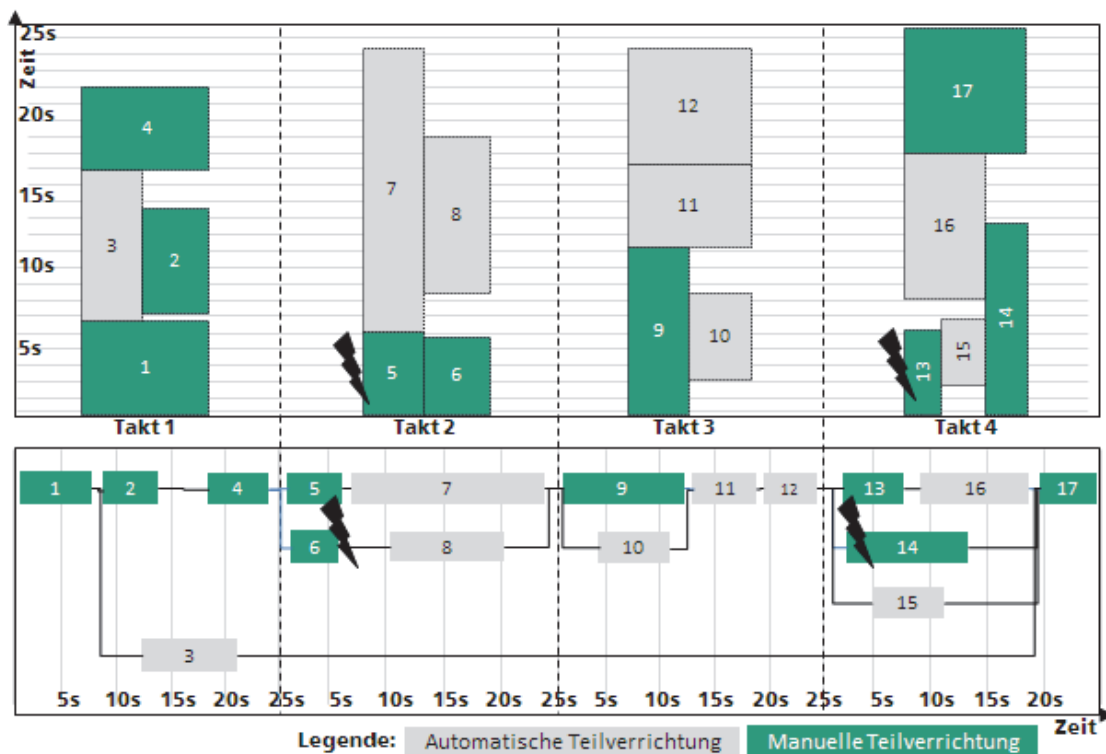
Das Gewicht des zu bewegenden Teils ist unabhängig von einer Minimierung der Verschwendung, es bleibt unverändert, da die montagegerechte Produktgestaltung vom Betrachtungsbereich der verschwendungsrelevanten Planungsschritte ausgeschlossen wurde (vgl. Kapitel 3.1, Abbildung 14). Ist für alle produktspezifischen

---

<sup>113</sup> vgl. die Attribute der produktspezifischen Teilverrichtung in Abbildung 39

Teilverrichtungen mit dieser Vorgehensweise eine Sollzeit bestimmt, so kann mit dem nächsten Schritt fortgefahren werden.

Schritt 4 ordnet die in Schritt 2 definierten produktspezifischen Teilverrichtungen den verschiedenen Takten eines Montageteilsystems zu. Es erfolgt die Zuordnung über die Verwendung des Taktzeitdiagramms (vgl. Phase 4 Schritt 6 in Kapitel 2.3). Mit den in Kapitel 3.5 beschriebenen Anforderungen einer beherrschbaren Komplexität und einer interaktiven Miteinbeziehung des Planers sowie der in Kapitel 3.3 definierten Anforderung von Überprüfungsmechanismen wird zu diesen Zwecken das Taktzeitdiagramm erweitert, indem es mit dem bereits in dieser Arbeit eingeführten Montagesequenzdiagramm kombiniert wird. Dieses kombinierte Diagramm wird im Folgenden als Taktzeit-Montagesequenz-Diagramm (TMS-Diagramm) bezeichnet.



**Abbildung 51: Taktzeit-Montagesequenz-Diagramm**

Das in Abbildung 51 dargestellte TMS-Diagramm zeigt in der oberen Hälfte das Taktzeitdiagramm mit automatischen (grau) und manuellen (grün) produktspezifischen Teilverrichtungen inklusive der maßstabsgerechten Darstellung der

Sollzeiten entsprechend der Balkenlänge nach oben. In der unteren Hälfte ist das Montagesequenzdiagramm dargestellt, das auf der Ordinate die jeweiligen Sollzeiten der verschiedenen Teilrichtungen darstellt. Im dargestellten Beispiel ist der Montagetakt bei 25s, da Takt 4 diesen Maximalwert aufweist. Der Montagetakt muss in jedem Fall gleich oder kürzer als der Kundentakt sein, damit die benötigte Sollmenge erreicht werden kann.

Der Planer hat mit Hilfe des TMS-Diagramms die Möglichkeit, durch Verschieben der Teilrichtungen entlang der waagrechten Linien im Montagesequenzdiagramm eine verschwendungsreduzierte Zuordnung zu erreichen. Überprüfende Algorithmen im später zu entwickelnden IT-System übernehmen an dieser Stelle synchrone Machbarkeitsprüfungen hinsichtlich Montagereihenfolgeverletzungen und weiteren Restriktionen wie gleichzeitig durchzuführende manuelle Teilrichtungen innerhalb eines Takts (siehe Takt 2 und 4 in Abbildung 51) oder ein zeitliches Übertreffen des Montagetakts innerhalb eines Takts. Folgende beide Größen sind im TMS-Diagramm je nach Positionierung der Teilrichtungen veränderbar zu gestalten:

- Anzahl Takte: je nach Parallelisierung der Teilrichtungen können die Anzahl Takte reduziert werden.
- Montagetakt: der maximal belegte Einzeltakt ergibt den Montagetakt, der Planer erhält die Möglichkeit, den Montagetakt grafisch zu verlängern bzw. zu reduzieren. Es verändern sich damit auch die Anzahl Takte bei Über- bzw. Unterschreiten von Schwellwerten.

Bei der Zuordnung der produktspezifischen Teilrichtungen zu den Takten ist auf die Minimierung der Ausrichtungswechsel des Werkstücks zu achten. Unter Verwendung der in Kapitel 6.1.6 definierten Kennzahl B4 erfolgt die Überprüfung der notwendigen Ausrichtungswechsel des Werkstücks. Die Überprüfung erfolgt durch den Planer, wahlweise mit oder ohne Unterstützung überprüfender Algorithmen eines späteren IT-Systems. Durch Verwendung der eingegebenen Fugerichtungen unmittelbar aufeinanderfolgender Teilrichtungen erkennt das zu entwickelnde IT-System potenzielle Ausrichtungswechsel, die dem Planer optional

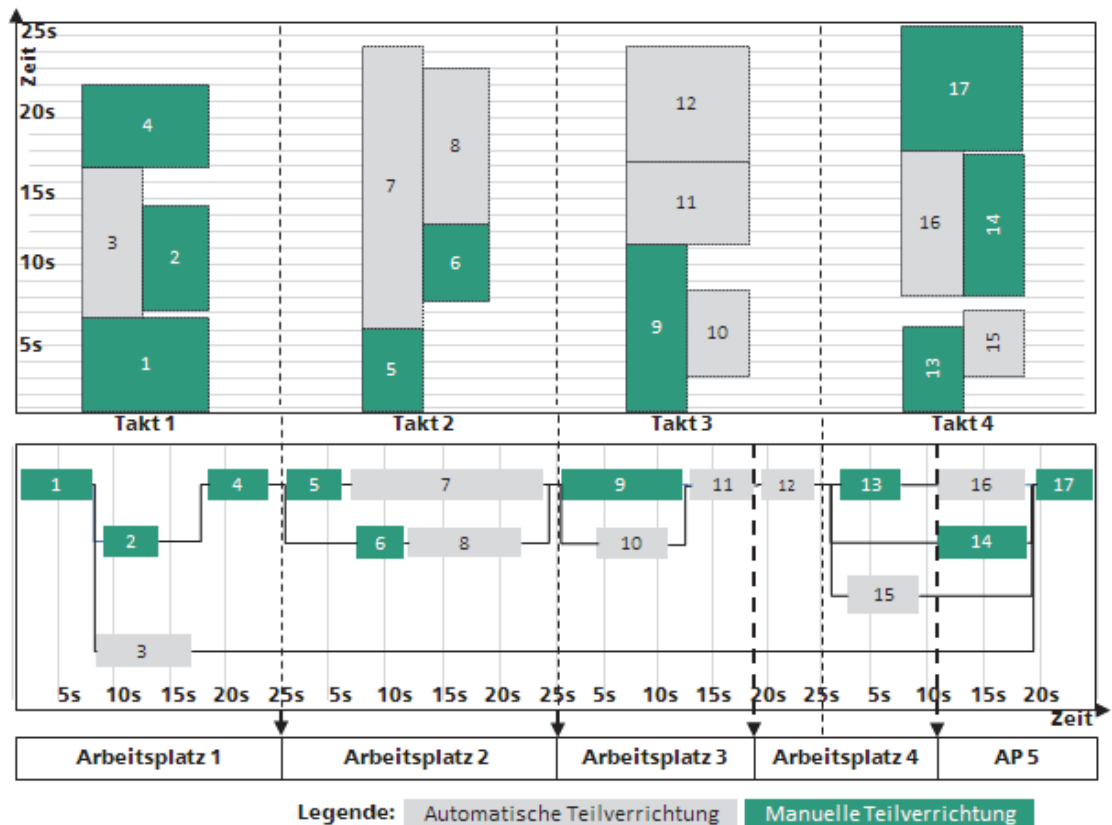


auf Basis der Darstellung im TMS-Diagramm angezeigt werden. Falls notwendige Ausrichtungswechsel in Schritt 2 bei der Eingabe nicht wertschöpfender Teilverrichtungen unberücksichtigt blieben, werden diese Teilverrichtungen an dieser Stelle eingegeben.

In Schritt 5 erfolgt die Zuordnung der Teilverrichtungen zu den Arbeitsplätzen. Dieser Schritt entspricht der Kapazitätsteilung auf der Ebene der Montage-teilsysteme (vgl. Kapitel 2.3, Phase 4, Schritt 4). Hierzu ist aus der Zuordnung der Takte die Zuordnung zu den Arbeitsplätzen abzuleiten. Eine verschwendungs-minimale Gestaltung wird dann erreicht, wenn so wenige Arbeitsplätze wie möglich in kompakter Form und Anordnung definiert werden können, um die Laufwege der Mitarbeiter zu reduzieren. Der Planer überprüft die einzelnen Takte, indem er jeweils den Platzbedarf folgender Komponenten betrachtet bzw. abschätzt:

- Automaten der automatischen Teilverrichtungen, die dem Takt zugeordnet sind
- Arbeitsmittel der produktspezifischen Teilverrichtungen, die dem Takt zugeordnet sind
- die bereitzustellende Menge an Montageteilen, die über die produkt-spezifischen Teilverrichtungen des Takts verknüpft sind.

Die bereitzustellende Menge an Montageteilen wird in der nächsten Phase detailliert geplant, jedoch sind hier bereits Erkenntnisse wie benötigte Großteile oder spezielle Bereitstellgebände im Sinne einer groben Dimensionierung in Betracht zu ziehen. Je nach Platzbedarf werden die Arbeitsplätze bzw. deren Übergänge definiert. Der Planer verwendet hierfür das TMS-Diagramm. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch eine solche Zuordnung der Teilverrichtungen zu Arbeitsplätzen nach Abschätzung der räumlichen Gegebenheiten je Takt.



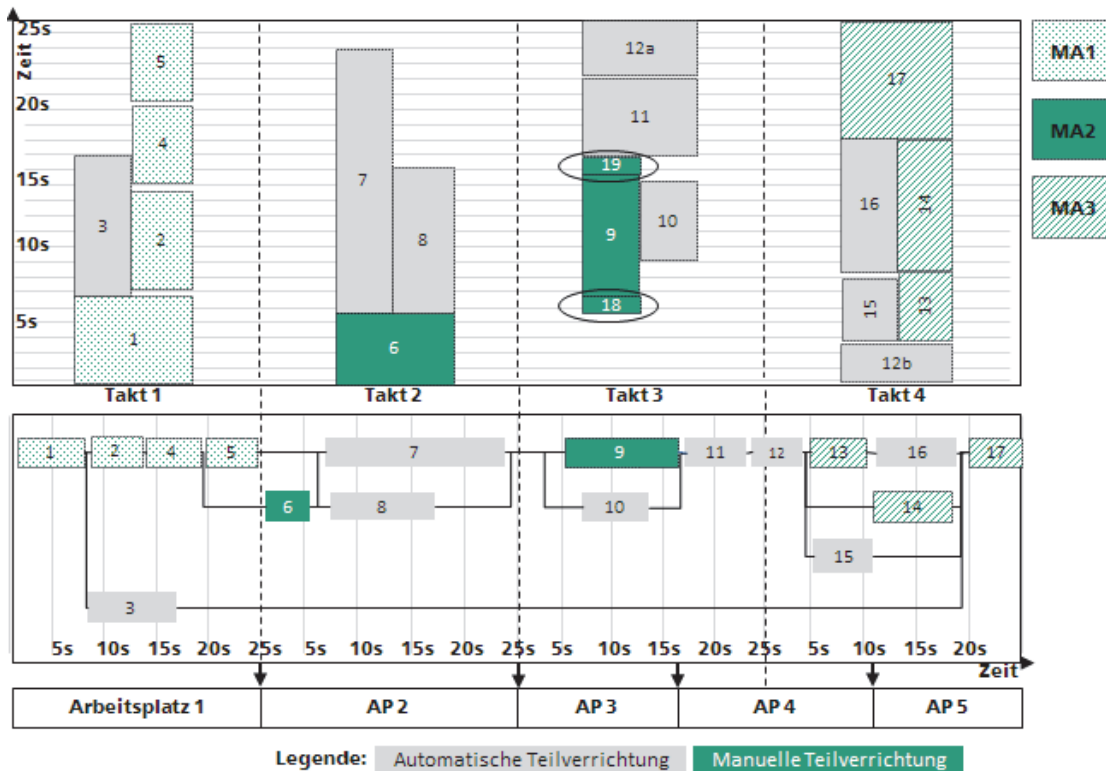
**Abbildung 52: TMS-Diagramm mit Zuordnung Teilverrichtung zu Arbeitsplatz**

Im Beispiel in Abbildung 52 entsprechen die ersten beiden Takte den ersten beiden Arbeitsplätzen, während die Teilverrichtungen der Takte 3 und 4 auf insgesamt 3 Arbeitsplätze aufgeteilt werden. Eine Verdichtung der Abbildung mehrerer Takte auf einen Arbeitsplatz ist ebenso darstellbar, sofern es die räumlichen Gegebenheiten zulassen. Bei einer solchen Verdichtung ist zu prüfen, ob bei mehreren Mitarbeitern innerhalb eines Montageteilsystems eine gegenseitige Behinderung der Teilverrichtungen auftreten kann.

Schritt 6 ordnet die Teilverrichtungen den Mitarbeitern eines Montageteilsystems zu. Die Zuordnung ist von der Anzahl Mitarbeiter im Montageteilsystem abhängig. Die Anzahl Mitarbeiter  $Anz.MA_{MTS}$  errechnet sich aus der Summe manueller Teilverrichtungen  $TV_{man.}$  eines Montageteilsystems dividiert durch den Montagetak  $MT$ :

$$Anz.MA_{MTS} = \frac{\sum TV_{man.}}{MT} \quad (7.3)$$

Das Ergebnis ist aufzurunden, da die Mitarbeiter den Montageteilsystemen vollständig zugeordnet werden. Die Formel leitet sich aus dem Taktzeitdiagramm (vgl. Kapitel 2.3, Phase 4, Schritt 6) ab. Bei einer Reduzierung auf manuelle Teilverrichtungen und einer angenommenen gleichmäßigen Aufteilung in Takte entspricht die Anzahl Takte der Anzahl Mitarbeiter eines Montageteilsystems. Nach Berechnung der Anzahl Mitarbeiter ordnet der Planer grafisch die Teilverrichtungen den Mitarbeitern zu. Die Anzahl Mitarbeiter wird im Objekt Organisation MTS als Attribut hinterlegt.<sup>114</sup> Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der exemplarischen Planung aus den vorigen Abbildungen nach der Zuordnung zu Mitarbeitern.



**Abbildung 53: TMS-Diagramm nach Zuordnung Teilverrichtung zu Mitarbeiter**

Mitarbeiter 1 übernimmt im Beispiel die manuellen Teilverrichtungen des ersten Takts, Takt 1, während Mitarbeiter 2 die Takte 2 und 3 ausführt. Mitarbeiter 3 führt die Teilverrichtungen des vierten Takts aus. Das TMS-Diagramm zeigt, dass nach der

<sup>114</sup> vgl. das Basismodell physisches Montagesystem in Kapitel 6.4, Abbildung 37

Teilverrichtung 6 bei Mitarbeiter 2 ein Wechsel des Arbeitsplatzes notwendig wird. Hierzu entstehen Laufwege, die vor und nach Teilverrichtung 9 ausgeführt werden müssen. Die Entstehung von Laufwegen erfolgt IT-unterstützt, indem das zu entwickelnde System den Wechsel von Arbeitsplätzen bei entsprechender Zuordnung meldet. Es werden die 2 nicht wertschöpfenden Teilverrichtungen 18 und 19 ergänzt, die der Verschwendungsart Bewegung entsprechen.

Schritt 7 generiert das Modell des physischen Montageteilsystems. Die Modellierung erfolgt durch das zu entwickelnde IT-System unter Benutzung der Informationen aus dem TMS-Diagramm und der Objekte des hierfür entwickelten Basismodells aus Kapitel 6.4. Der Planer ergänzt die in Abbildung 38 beschriebenen Attribute der vom IT-System generierten Objekte. Zusätzlich zu den vom IT-System generierten Objekten fügt der Planer die für die Teilverrichtungen benötigten Arbeitsmittel einschließlich der Spezifikation der Attribute hinzu.

In Schritt 8 überprüft der Planer die verschiedenen Verschwendungsarten des geplanten Montageteilsystems. Um die Verschwendung zu reduzieren, wird eine Auswahl der Kennzahlen zur Quantifizierung von Verschwendung<sup>115</sup> genutzt, die auf Basis der Informationen aus dem TMS-Diagramm und der Modellierung bzw. Spezifikation des Montageteilsystems errechnet werden. Die Berechnung der Kennzahlen erfolgt auf Basis der Formeln aus Kapitel 6.1. Ergänzend werden die Montagestückkosten anhand der Formel 6.37 berechnet. Abbildung 54 zeigt die an dieser Stelle verwendeten Kennzahlen zur Quantifizierung von Verschwendung sowie die Montagestückkosten des Teilsystems. Der Planer hat nach Überprüfung der durch die Kennzahlen indizierten Verschwendung bzw. durch die angezeigten Kosten die Möglichkeit, das aktuelle Planungsszenario zu modifizieren oder alternativ weitere Szenarien zu erzeugen, um die Verschwendung bzw. die Montagestückkosten weiter zu reduzieren. Die Schritte 4 bis 6 werden bei Bedarf erneut ausgeführt. Die erzeugten Szenarien werden danach gegenübergestellt und

---

<sup>115</sup> siehe das entwickelte Kennzahlensystem aus Kapitel 6.1

durch den Planer bewertet. Der Planer entscheidet, mit welchen Planungsszenarien des Montageteilsystems weitergearbeitet wird.

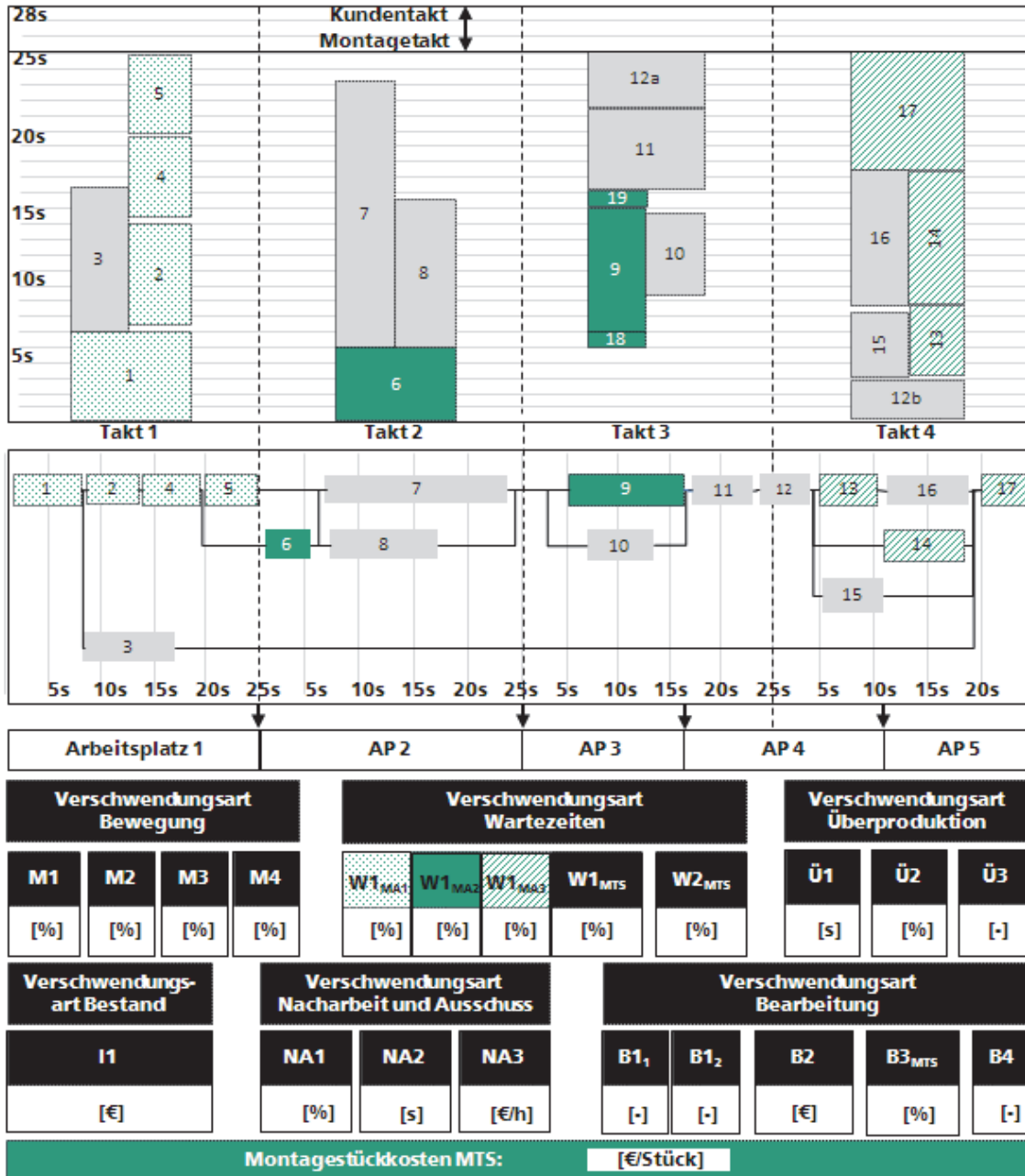
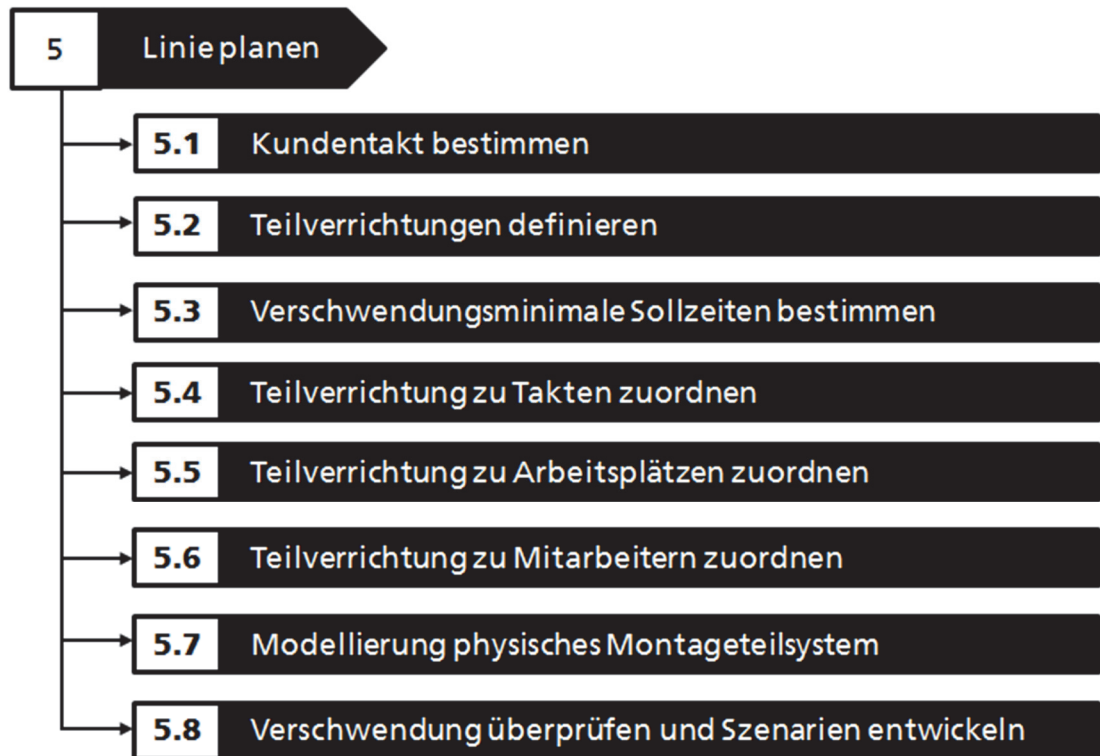


Abbildung 54: TMS-Diagramm und Kennzahlen zur Verschwendungsquantifizierung

Abbildung 55 zeigt zusammenfassend die 8 einzelnen Verfahrensschritte, die je Montageteilsystem ausgeführt werden.



**Abbildung 55: Verfahrensschritte der Phase „Linie planen“**

Die Schritte 1 bis 8 werden für alle definierten Segmentierungsgruppen bzw. für alle definierten Montageteilsysteme nacheinander ausgeführt. Damit ist das Montagesystem auf Teilsystemebene nahezu vollständig bestimmt. Es folgen die Planung der Teilebereitstellung innerhalb der Teilsysteme und die Gestaltung des Montagelayouts, die auch die Planung der Puffer zwischen den Teilsystemen berücksichtigt.

## **7.6 Teilebereitstellung planen**

Die Planung der Teilebereitstellung ergänzt und verfeinert das Modell des physischen Montagesystems, indem den in den Montageteilsystemen bereitzustellenden Montageteilen eine Verpackung zugeordnet wird. Hierfür dient das Objekt

„Behälter“. Die Spezifikation je Montageteil erfolgt über die individuellen Attribute des Objekts.<sup>116</sup>

In Schritt 1 ist das Attribut der Bereitstellstrategie je Montageteil zu bestimmen. Für flexible hybride Fließmontagen sind 2 der insgesamt 5 Bereitstellstrategien nach Röhrig<sup>117</sup> relevant: die „Set-weise“ Bereitstellung und die Bereitstellung mit „Kanban“. Diese beiden Bereitstellstrategien werden um eine dritte ergänzt, die „vereinzelte Bereitstellung“ ist die vollautomatische Bereitstellung eines einzelnen Montageteils in definierter Ausrichtung. Ein Beispiel ist die Bereitstellung von Schrauben über Schraubenrüttler und Zuführung per Schlauch an den Bereitstellort.

Schritt 2 beinhaltet die Spezifikation der Maße des verwendeten Behälters durch den Planer bei Bereitstellung über „Kanban“ und „Set“. Bei der Bereitstellstrategie „vereinzelte Bereitstellung“ erfolgt keine weitere Spezifizierung, da kein Behälter als solcher existiert. Ist die Bereitstellstrategie Kanban, identifiziert der Planer den Füllgrad über Verpackungsversuche, theoretische Volumenberechnungen oder über eine Abschätzung auf Basis der Maße des Montageteils und des Behälters.

In Schritt 3 erfolgt die Kapazitätsanalyse der Bereitstellflächen. Im aktuellen Planungsstadium ist die Konfiguration der Montageteilsysteme hinsichtlich Flächenrestriktionen bei der Bereitstellung noch nicht überprüft. Zu diesem Zweck werden im Folgenden je Arbeitsplatz die verfügbare Bereitstellfläche und die zur Realisierung der Teileversorgung beanspruchte Bereitstellfläche gegenübergestellt. Die Kalkulation des Flächenbedarfs  $FIBed$  je Arbeitsplatz  $AP$  erfolgt über die Anzahl notwendiger Behälter bei einer bestimmten Reichweite  $RW$  der Montageteile, multipliziert mit dem Flächeninhalt der Grundfläche des Behälters. Die Anzahl notwendiger Behälter ergibt sich aus dem aufgerundeten Quotienten aus der Reichweite  $RW$  und dem Produkt aus Montagetak  $MT$  und dem Behälterfüllgrad

---

<sup>116</sup> vgl. das Basismodell des physischen Montagesystems in Kapitel 6.4, Abbildung 37 und Abbildung 38

<sup>117</sup> vgl. die 5 Bereitstellstrategien nach Röhrig in Kapitel 2.3

$FG_{Beh.}$ . Die Reichweite ist definiert als der Quotient aus dem Stückbestand eines Montageteils und dem momentanen Verbrauch ( $1/MT$ ).<sup>118</sup> Damit leitet sich der Flächenbedarf folgendermaßen ab:

$$FlBed_{AP} = \sum_{i=1}^n l_{Beh. i} * b_{Beh. i} * (INT \left( \frac{RW}{MT * FG_{Beh. i}} \right) + 1) \quad (7.4)$$

Diese Formel findet Anwendung bei den Bereitstellstrategien „Set-weise“ und Kanban“. Bei einer „vereinzeltten Bereitstellung“ eines Montageteils wird ein Flächenbedarf kalkulatorisch nicht berücksichtigt.

Aufbauend auf dieser vereinfachten Form der Ermittlung des Flächenbedarfs je Arbeitsplatz erfolgt eine Auswertung der Flächenkapazität, damit der Planer Engpässe erkennt und darauf reagieren kann. Der Flächenbedarf wird dem Flächenangebot des jeweiligen Arbeitsplatzes gegenübergestellt. Das Flächenangebot entspricht hierbei der zugänglichen Bereitstellfläche um die Fügepunkte, sodass ein Transportweg vom Greifen der Bereitstellorte zum Fügepunkt 20 cm nicht überschreitet. Dieser Abstand entspricht dem in MTM-UAS maximalen Abstand für die kleinste Distanz-Kategorie von Greif- zu Fügepunkt. Somit ist gewährleistet, dass die Montageteile verschwendungsminimal (im Rahmen der festgeschriebenen Standard-Sollzeiten von MTM-UAS) um den Fügepunkt angeordnet sind.

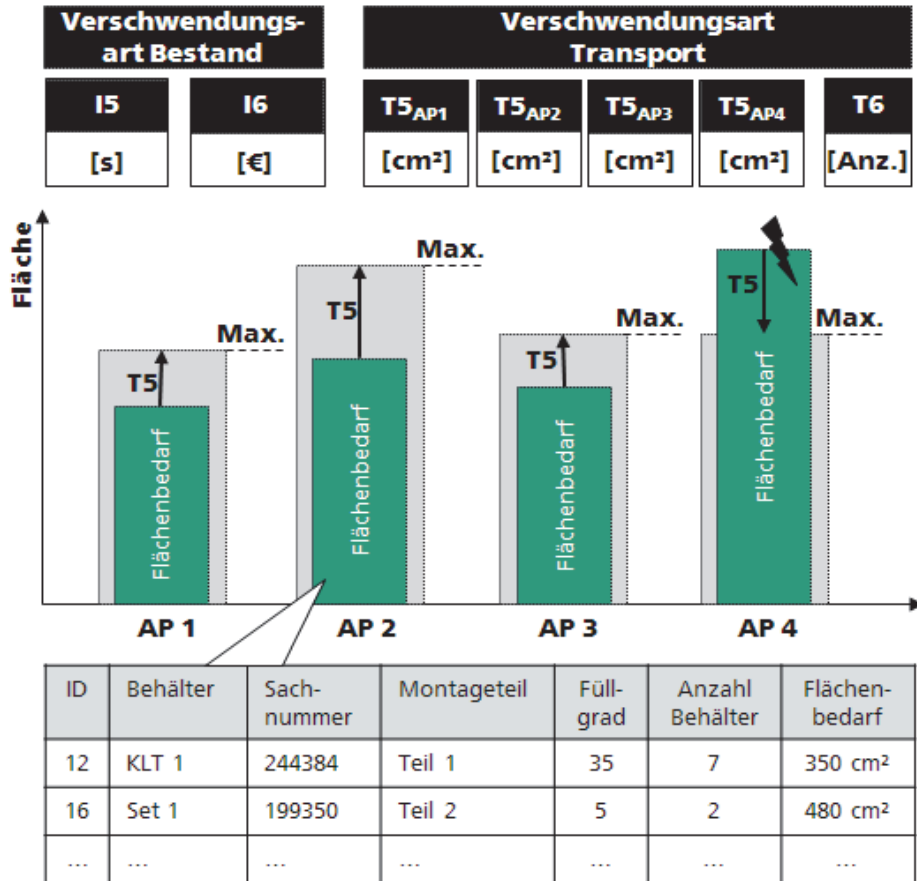
Abbildung 56 zeigt die grafische Aufarbeitung der Gegenüberstellung von Flächenbedarf und Flächenangebot an den jeweiligen Arbeitsplätzen. Die verwendeten Behälter je Montageteil mit Füllgrad, Anzahl Behälter und benötigtem Flächenbedarf sind in tabellarischer Form ergänzt, damit der Planer Flächenengpässe und deren Ursache schnell erkennen kann. Um den Zusammenhang zur Verschwendung anzuzeigen, werden die in dieser Planungsphase relevanten Kennzahlen T5 als verfügbarer Bereitstellplatz, T6 als Transportintensität Material-

---

<sup>118</sup> siehe die Definition von Heidenblut et al. in Kapitel 2.3



versorgung, I5 als Montagebestandswert sowie I6 als Montagebestandsreichweite visualisiert.



**Abbildung 56: Kapazitätsanalyse Bereitstellungsflächen**

Schritt 4 beinhaltet die Optimierung der Teilebereitstellung hinsichtlich der Realisierbarkeit und der Verschwendungsreduzierung unter Verwendung der Kennzahlen T5, T6 I5 und I6 (vgl. Kapitel 6.1). Ist die Kennzahl T5 eines Arbeitsplatzes negativ, lässt sich die geplante Menge an bereitzustellenden Montageteilen an diesem Arbeitsplatz nicht darstellen. Abbildung 56 zeigt beispielhaft einen solchen Fall bei Arbeitsplatz 5. Folgende Optionen zur Korrektur kommen in Betracht:

- Reduzierung des Flächenbedarfs durch Verringerung der Reichweite
- „Umtakten“ der den Montageteilen zugeordneten Teilverrichtungen in Takte, die noch Fläche zur Verfügung haben

- Änderung der Bereitstellstrategie durch Verwendung von Sets
- Erschließen neuer Fläche zur Vergrößerung des Flächenangebots, sofern dies am Arbeitsplatz möglich ist und die Greifwege 20cm<sup>119</sup> nicht überschreiten

Hinsichtlich der Minimierung von Verschwendung zeigt die Kennzahl I6 als Montagebestandsreichweite den Bestand der Montageteile an. Je nach Dimensionierung der Bestände folgt daraus die Anzahl der auszuführenden Materialversorgungsvorgänge T6. Minimale Verschwendung ist dann gegeben, wenn so wenig wie mögliche Versorgungsvorgänge pro Zeiteinheit auszuführen sind und der verfügbare Bereitstellplatz T5 minimal wird. Diese Aussage gilt für den in der Praxis häufig auftretenden Fall, dass die Bedeutung des Teilewerts - und damit die Kapitalbindung – einen geringeren Einfluss hat auf die Gesamtkosten als der Aufwand zur Versorgung des Montageteilsystems. Deshalb ist auf die Kennzahl I5 als Montagebestandswert zu achten, bei einem hohen Wert sind die Kosten der Kapitalbindung dem Aufwand der Versorgung gegenüberzustellen.

Zusammenfassend zeigt Abbildung 57 die Teilebereitstellung in 4 Schritten.



**Abbildung 57: Verfahrensschritte der Phase „Teilebereitstellung“**

---

<sup>119</sup> analog der Anmerkung zur verfügbaren Fläche auf Seite 176 ist der Abstand von 20 cm der in MTM-UAS maximale Abstand für die Kategorie des kleinsten Abstands von Greif- zu Fügepunkt

### 7.7 Montagelayout planen

In Kapitel 3.1 wurde die Anforderung einer Bestimmung des Groblayouts definiert, da ein Einfluss auf die Verschwendung in getakteten Fließmontagen besteht. Das Feinlayout ist Teil der Feinplanungsphase der in Kapitel 2.3 beschriebenen Ablaufstruktur der klassischen Montageplanung, die als nicht relevant für die Gestaltung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen bewertet wurde. Deshalb reduziert sich hier die Gestaltung des Montagelayouts auf die grobe Anordnung der Montageteilsysteme, deren Arbeitsplätze und der Puffer zwischen den Teilsystemen. Die Anordnung ist deshalb von Bedeutung, da die Wege der Mitarbeiter zwischen den Arbeitsplätzen verschwendungsrelevant sind. Auch die bislang in der Vorgehensweise einer Planung von verschwendungsarmen Fließmontagen unberücksichtigten Puffer von Zwischenerzeugnissen sind Teil des Groblayouts, die hier miteinfließen. Die Puffer beeinflussen zum einen die Anordnung des Groblayouts, zum anderen erzeugen sie verschwendungsrelevanten Bestand.

In Schritt 1 wird die verfügbare Fabrikfläche definiert. Sie stellt die Soll-Fläche dar, die im Rahmen der Layoutplanung auf Bereichsebene der Montage zugeordnet ist. Die verfügbare Fabrikfläche enthält Restriktionen hinsichtlich der Fabrikstruktur wie z.B. Außenwände, Säulen oder andere Bauelemente.

Schritt 2 dimensioniert die Puffer zwischen den Montageteilsystemen. Existiert eine Materialflussverbindung zwischen 2 Montageteilsystemen, erfolgt die Modellierung anhand des Objekts der Montageteilsystemverkettung. Die Montageteilsystemverkettungen werden analog der Attribute des Objekts „MTS-Verkettung“ in Abbildung 38 als Element des Basismodells eines physischen Montagesystems aus Kapitel 6.4 spezifiziert. Dabei hat der Planer die durchschnittliche Anzahl der Zwischenerzeugnisse zu definieren. Diese Größe hängt von verschiedenen Faktoren ab. Verkettete Montageteilsysteme treten bei einer Kapazitätsteilung nach

Baugruppen/Varianten auf,<sup>120</sup> z.B. durch Aufteilung in eine Vor- und Endmontage. Generell ist der Puffer an Zwischenerzeugnissen so gering wie möglich zu halten, um die Verschwendungsart Bestand zu minimieren. Der Puffer an Zwischenerzeugnissen leitet sich aus folgenden Faktoren ab:

- Schnellerer Montagetakt in der Vormontage im Vergleich zur Endmontage: je größer die Differenz, desto schneller bauen sich Bestände auf. Dieser Fall tritt in der Praxis dann auf, wenn beispielsweise ein Automat eine deutlich geringere Taktzeit aufweist als der Kundentakt und die Produktion der Vormontageerzeugnisse über einen Supermarkt zur Endmontage entkoppelt ist.
- Prozessinstabilitäten in der Vormontage: der Puffer dient zur Überbrückung von Störungen und Stillständen in der Vormontage und vermeidet so die Beeinflussung der Endmontage.
- Örtliche Trennung von Vor- und Endmontage: der Puffer dient zur Ansammlung von Transportlosen und Überbrückung der Transportzeiten von Vor- zu Endmontage.
- Erzwungene Losgrößen in der Vormontage durch z.B. lange Rüstzeiten oder technisch bedingte Mindestlose.

Aus der Anzahl der darzustellenden Zwischenerzeugnisse kalkuliert der Planer den hierfür benötigten Flächenbedarf, der im nächsten Schritt in die Layoutplanung eingeht.

Schritt 3 folgt den Planungsschritten der klassischen Montageplanung zur Erstellung des Groblayouts. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, erfolgt die Anordnung der einzelnen Layout-relevanten Elemente nach Abstraktion der idealen Anordnung, die in einer Materialflussanalyse ermittelt wurde, in ein reales Bezugsschema. Dieses

---

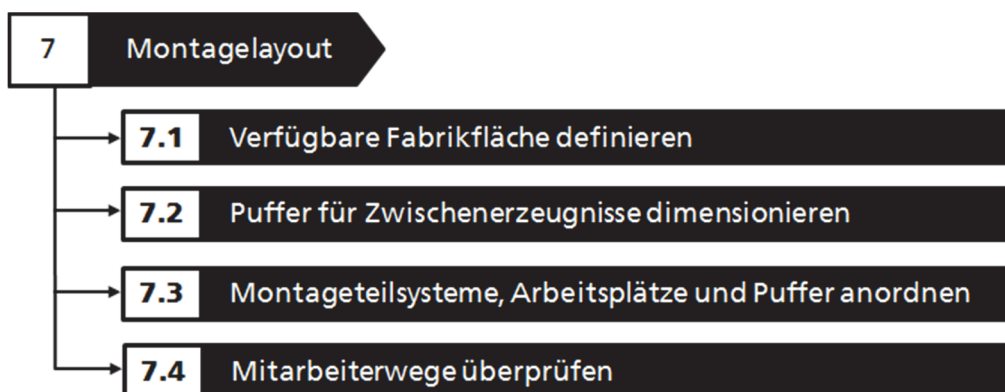
<sup>120</sup> vgl. hierzu die Definition nach Konold in Kapitel 2.3 bei Phase 5 „Grobplanung des Montagesystems“

reale Bezugsschema stellt die in Schritt 1 ermittelte verfügbare Fabrikfläche dar. Die Layout-relevanten Elemente sind:

- Automaten der Montageteilsysteme
- Arbeitsmittel der Montageteilsysteme
- Arbeitsplätze der Montageteilsysteme
- Puffer von Zwischenerzeugnissen

In Schritt 4 werden die Mitarbeiterwege überprüft, die durch die Anordnung der Arbeitsplätze beeinflusst wurden. Die Messung der Entfernungen erfolgt aus dem Groblayout, die als nicht wertschöpfende Teilverrichtung deklarierten Bewegungsprozesse werden im Falle einer Änderung der Sollzeit gegebenenfalls korrigiert. Die Kennzahl M3 (Anteil der Bewegungsverwendung Laufwege) wird erneut berechnet und stellt nun in der Folge einen genaueren Wert dar. Haben die korrigierten Sollzeiten Einfluss auf die gesamthafte Taktung, sind die entsprechenden Planungsphasen und –schritte erneut durchzuführen, um ein verschwendungsreduziertes und realisierbares Montagesystem zu gestalten.

Abbildung 58 zeugt zusammenfassend die Planung des Montagegroblayouts gemäß der 4 definierten Verfahrensschritte.



**Abbildung 58: Verfahrensschritte der Phase „Montagelayout“**

Existieren Abhängigkeiten zwischen dem erstellten Groblayout und der Dimensionierung von Automaten oder Arbeitsmittel, so sind diese kostenseitig zu ermitteln und zu korrigieren. Beispielsweise sind bei Transferkomponenten wie Bändern oder Rollenbahnen zwischen den Arbeitsplätzen die Entfernungen kostenrelevant, damit ändert sich das Attribut des Wiederbeschaffungswerts für die entsprechenden Objekte.

### **7.8 Planungsszenarien bewerten und auswählen**

Während der Phasen 1 bis 7 spezifiziert der Planer sukzessive die Modelle „Produkt“, „Montageprozess“ und „physisches Montagesystem“ sowie deren Objekte.<sup>121</sup> Die Kennzahlen zur Quantifizierung von Verschwendung innerhalb der verschiedenen Montageteilsysteme sind berechnet und werden in diesen Phasen zur Reduzierung der Verschwendung innerhalb dieser Teilsysteme verwendet. In Phase 8 erfolgt die gesamthafte Bewertung des Montagesystems. Diese gesamthafte Bewertung ist charakterisiert durch folgende Merkmale:

- Aggregation der in den verschiedenen Montageteilsystemen verwendeten Kennzahlen zur Quantifizierung von Verschwendung auf die Gesamtebene. Die Berechnung erfolgt auf Basis der in Kapitel 6.1 angegebenen Formeln.
- Verwendung der Kennzahlen zur Quantifizierung von Verschwendung, die sich ausschließlich auf das Gesamtsystem beziehen (I3 und I4, siehe Kapitel 6.1.1)
- Verwendung der Verschwendungskosten auf Ebene Montagesystem nach den in Kapitel 6.7 definierten Formeln
- Aggregation der Montagestückkosten von Teil- auf Gesamtebene nach der Formel (6.41) aus Kapitel 6.6.

---

<sup>121</sup> vgl. die definierten Basismodelle in Kapitel 6.2, 6.3 und 6.4

Alle Berechnungen werden ausgeführt und dem Planer visuell gemäß Abbildung 59 dargestellt. Die Gesamtübersicht zeigt das Montagesystem, seine Montage-teilsysteme als Elemente und deren MTS-Verkettungen als oberste Strukturebene. Das Objekt „Montageteilsystem“ wird in Form der verketteten Arbeitsplätze analog der Darstellung in der Abbildung 59 visualisiert.

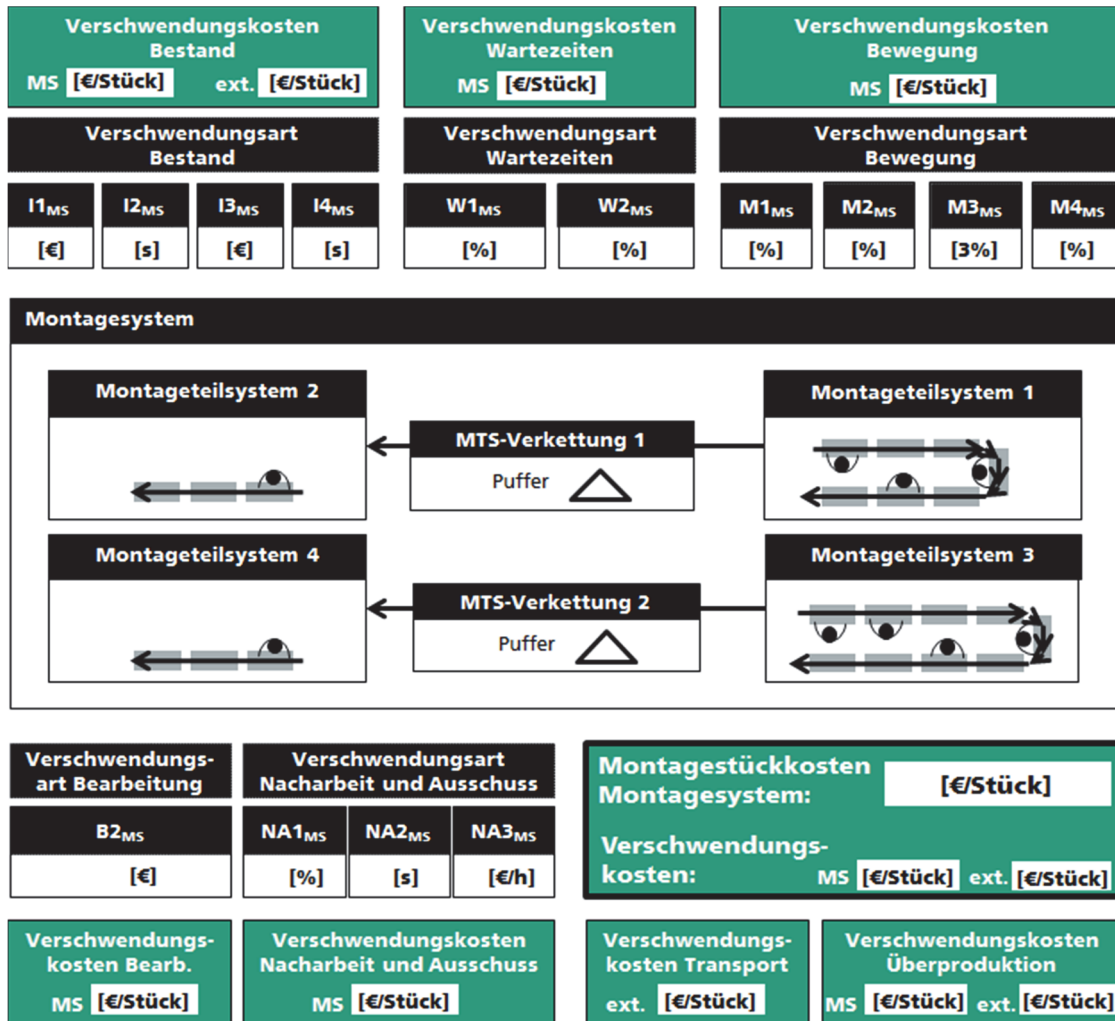


Abbildung 59: Gesamtübersicht der Kennzahlen auf Montagesystemebene

Ober- und unterhalb des Montagesystems sind in der Gesamtübersicht alle relevanten Kennzahlen zur Messung von Verschwendungs- sowie Montagestückkosten dargestellt. Diese Form der Darstellung ermöglicht dem Planer die Lokalisierung von Verschwendung hinsichtlich der Verschwendungsarten. Das schnelle Lokalisieren von Verschwendung hinsichtlich des Auftretens in den

verschiedenen Teilsystemen wird unterstützt, indem das jeweilige TMS-Diagramm auf Montageteilsystemebene analog Abbildung 54 herangezogen wird. Ein später zu entwickelndes IT-System, das das Verfahren zur Planung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen in ein Programm umsetzt, unterstützt das schnelle Navigieren von der Montagesystem- auf Teilsystemebene über entsprechend verbundene Oberflächen. Abbildung 60 fasst die 3 zentralen Visualisierungselemente des Verfahrens zusammen. Neben der „Gesamtübersicht Montagesystem“ (Abbildung 59) und dem „TMS-Diagramm auf Montageteilsystemebene“ (Abbildung 54) ergänzt die Teilebereitstellung auf Teilsystemebene (Abbildung 56) die zentralen Planungsinstrumente.

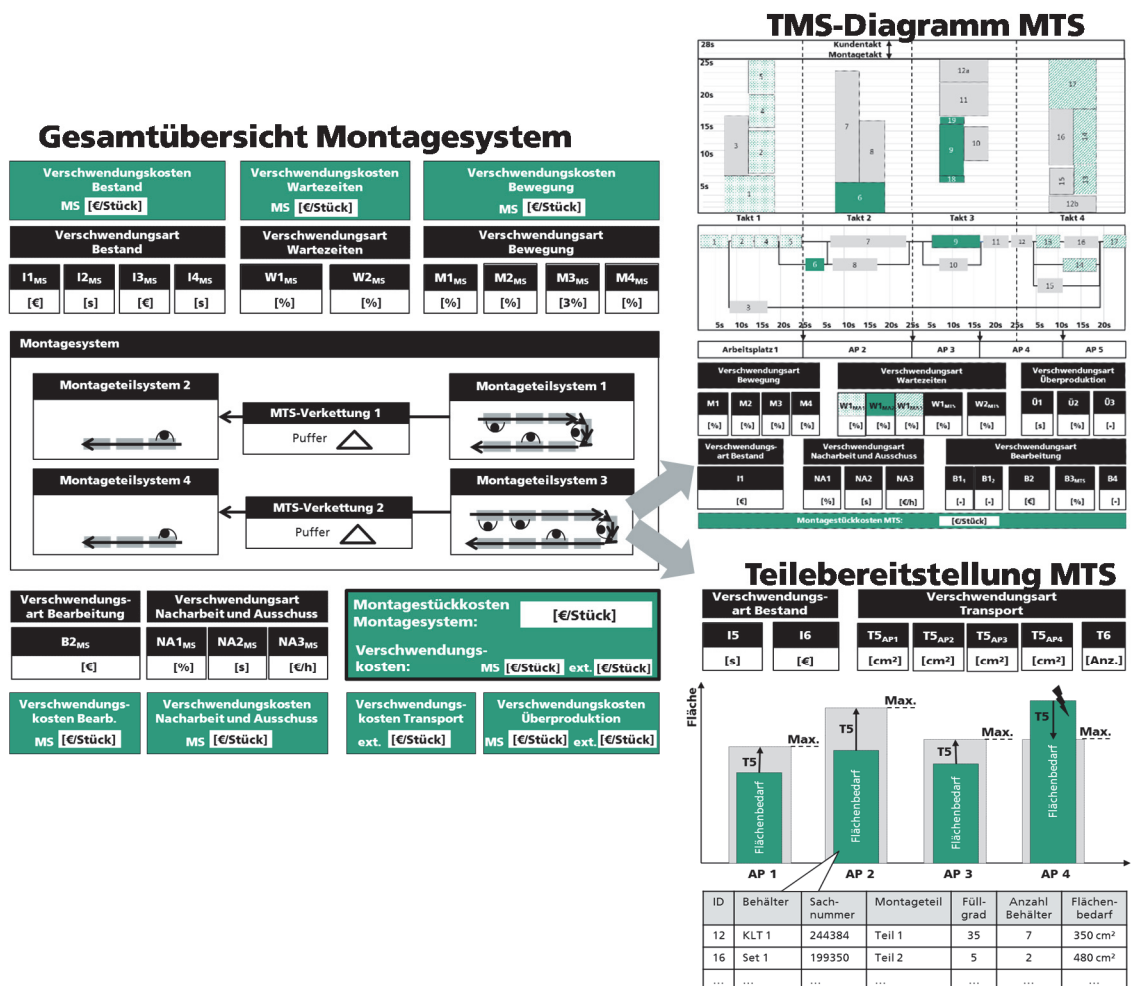


Abbildung 60: Zentrale Visualisierungselemente des Verfahrens



Auf Basis der Kennzahlen werden bereits vorhandene Planungsszenarien gegenübergestellt und miteinander verglichen. Ist das Ergebnis nicht zufriedenstellend, werden neue angepasste Szenarien entworfen und erneut geplant durch Ausführung der entsprechenden Phasen 3 bis 7. Die Bildung von alternativen Szenarien ermöglicht dem Planer die weitere Reduzierung der Verschwendung bei gleichzeitiger Überwachung der Montagestückkosten, da die Veränderungen Rückwirkungen auf die Kosten haben können.

Variiert die Kundennachfrage hinsichtlich Stückzahl und Varianten, so sind entsprechend des Kundentakts Veränderungen in den Montagesystemen zu planen. Diese veränderten Montagesysteme werden innerhalb des Verfahrens durch weitere Planungsszenarien abgedeckt. Ein Beispiel ist die Erhöhung der Anzahl Montage-mitarbeiter in Montageteilsystemen. Der zeitliche Aspekt wird berücksichtigt, indem die Szenarien den Nutzungsperioden zugeordnet werden und entsprechende Gesamtwerte der Stückkosten bzw. Verschwendungskosten berechnet werden.

Bei der Zusammensetzung zeitlicher Szenarien sind im Besonderen Übergänge durch Rüsten charakteristisch. Rüstaufwände werden im Verfahren implizit durch folgende Größen abgedeckt:

- Kennzahl B3 (technische Nichtverfügbarkeit) berücksichtigt die Verfügbarkeit limitierende Faktoren.
- Betriebsmittel wie Behälter oder Arbeitsmittel zum Umrüsten werden bereits in den verschiedenen Planungsszenarien modelliert.
- Kennzahl B5 (Taktverlust Rüsten) bildet die Ausbringungsverluste ab.
- Personalaufwände zum Rüsten werden nicht additiv berechnet, da davon ausgegangen wird, dass verfügbare Kapazität an Montagepersonal in der Stillstandzeit genutzt wird.

---

## 8 Validierung und Bewertung der neuen Methodik

Das in Kapitel 7 entwickelte Verfahren zur Gestaltung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen ist bezüglich verschiedener Aspekte zu prüfen. Zum einen ist die Eignung des Verfahrens hinsichtlich der Zielerreichung<sup>122</sup> zu prüfen, zum anderen ist die Prüfung der inneren Logik und des Aufbaus der Elemente von Bedeutung. Diese beiden Aspekte werden durch weitere an das Verfahren gestellte Anforderungen aus Kapitel 3 ergänzt. Es ergeben sich zusammenfassend folgende zu prüfende Einzelaspekte:

- Zielerreichung einer Gestaltung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen
- Stückkostenreduktion im Vergleich zu den klassischen Planungsverfahren
- Funktionsfähigkeit der Basismodelle
- logische Abfolge von Verfahrensphasen und –schritten, im Besonderen hinsichtlich des sukzessiven Modellaufbaus
- branchenneutrale Anwendbarkeit, Abdeckung von Montagesystemen sowohl für die Montage von Klein- als auch für Großgeräte<sup>123</sup>
- Gestaltung sowohl vollautomatisierter, teilautomatisierter wie auch rein manueller Montagesysteme
- Beherrschbarkeit der Komplexität der Planung
- interaktive Miteinbeziehung des Planers in die Gestaltungs- und Entscheidungsprozesse des Verfahrens

Um den Nachweis der Anwendbarkeit hinsichtlich dieser Einzelaspekte zu erhalten bzw. Restriktionen bezüglich der Anwendbarkeit zu ermitteln, wird ein Praxisbeispiel aus der Elektrowerkzeugbranche gewählt. Die hier übliche Gestaltung teilmanueller Fließmontagen ermöglicht die Abstrahierung rein manueller sowie vollauto-

---

<sup>122</sup> vgl. die Zielsetzung in Kapitel 1.2

<sup>123</sup> vgl. die Anforderungen bezüglich der Anwendbarkeit in Kapitel 3.5 und die Kategorisierung von Montagen nach Lotter in Kapitel 3.5

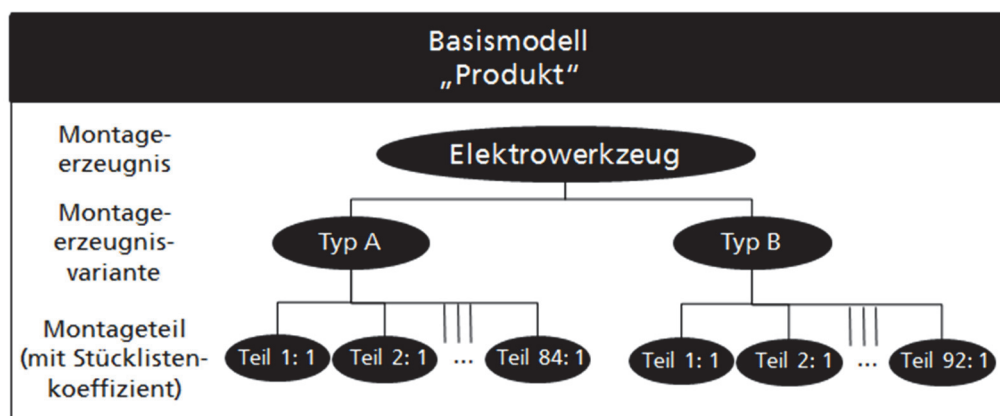
matisierter Fließmontagen. Die Montage von Elektrowerkzeugen repräsentiert den Bereich der Kleingeräte, jedoch weist das ausgewählte Produkt im Praxisbeispiel bereits eine Volumendimension auf, die Ableitungen hinsichtlich der Montage von Großgeräten im Besonderen bezüglich Layout, Fläche und Betriebsmittelkosten zulässt.

Um die Gültigkeit hinsichtlich der Eignungsaspekte zu erbringen, wurde die Planungslogik inklusive der Berechnungen innerhalb eines Tabellenkalkulationsprogramms umgesetzt. Ergänzend erfolgte innerhalb eines Visualisierungsprogramms die interaktive graphische Planung der Montageteilsysteme mit Hilfe von Montagesequenz- und TMS-Diagrammen.

Die Ausgangssituation besteht in der Planung eines Montagesystems für die Montage zweier Enderzeugnis-Varianten für ein Elektrowerkzeug. Dabei weist die Montageerzeugnisvariante vom Typ A mit 12.000 Stück/Monat einen deutlich höheren Bedarf als Typ B mit 2000 Stück/Monat auf. Es soll deshalb untersucht werden, ob eine Montage innerhalb einer Linie oder 2 getrennter Linien wirtschaftlicher ist, bzw. welches Planungsszenario ein besseres Ergebnis hinsichtlich der Stückkosten und der Reduzierung von Verschwendung liefert. Das Montageerzeugnis vom Typ A verfügt über 84 Montageteile und Typ B besteht aus 92 Montageteilen, die zum Großteil unterschiedlicher Geometrie sind, da sich die Enderzeugnisse vorwiegend in der Größe und Leistungsparametern unterscheiden, jedoch einen ähnlichen Produktaufbau haben.

Zur Erstellung des Basismodells Produkt wurden in Phase 1 („Planungsbasis ermitteln“) Stücklisten und Konstruktionszeichnungen der Montageerzeugnisse verwendet. Die Transformation dieser Informationsquellen gestaltete sich als einfach und leicht nachvollziehbar, es zeigte sich, dass montagegerecht aufgebaute Stücklisten den Prozess erleichtern, da in die Montage eingehende Baugruppen bzw. Zwischenerzeugnisse bereits als solche in der Stückliste abgebildet sind. Das

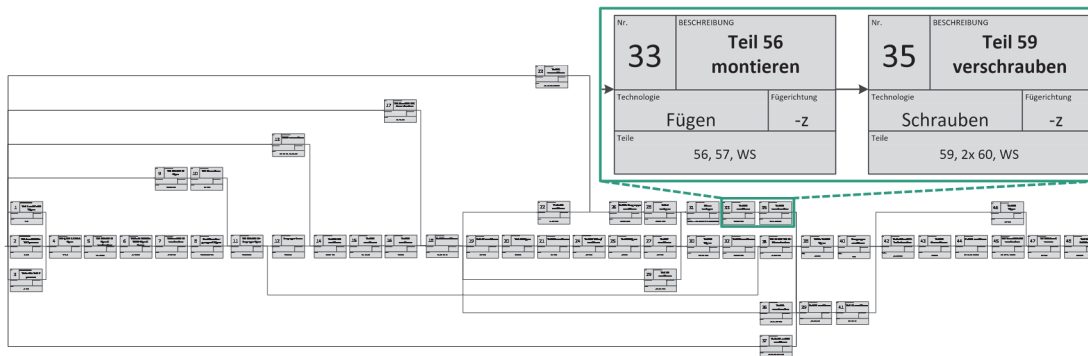
Schichtmodell umfasst die in Formel (6.37) verwendeten Parameter  $x = 7$  Stunden pro Schicht,  $y = 5$  Schichten pro Woche und  $z = 47,2$  Arbeitswochen im Jahr unter Berücksichtigung der Feiertage und der geplanten Produktionsunterbrechungen.<sup>124</sup> Nach Abarbeitung der Planungsschritte aus Phase 1 war das Basismodell Produkt vollständig erfasst. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis in vereinfachter Form.



**Abbildung 61: Basismodell Produkt des Praxisbeispiels**

Das Ergebnis von Phase 2 beschreibt den Ablauf der Fügeprozesse je Montageerzeugnisvariante im Vorranggraphen. Die jeweiligen produktspezifischen Fügevorgänge für Typ A und B wurden definiert und deren Restriktionen hinsichtlich der Montagereihenfolge im Vorranggraphen visuell dargestellt. Abbildung 62 zeigt exemplarisch den schematischen Vorranggraphen für die Montageerzeugnisvariante vom Typ A.

<sup>124</sup> vgl. Abbildung 38, Objekt „Organisation MTS“ und dessen Attribute)



**Abbildung 62: schematischer Vorranggraph Fügevorgänge Typ A**

Die Darstellung der produktspezifischen Fügevorgänge<sup>125</sup> beinhaltet neben der Identifikationsnummer die Bezeichnung des Vorgangs, die Fügetechnologie inklusive der Fügerichtung, sowie die benötigten Montageteile. Die beiden Vorranggraphen stellen das Ergebnis von Phase 2 dar, die Tabelle in Anhang A gibt ergänzend einen Überblick über die insgesamt 48 produktspezifischen Fügevorgänge des Montageerzeugnisses Typ A.

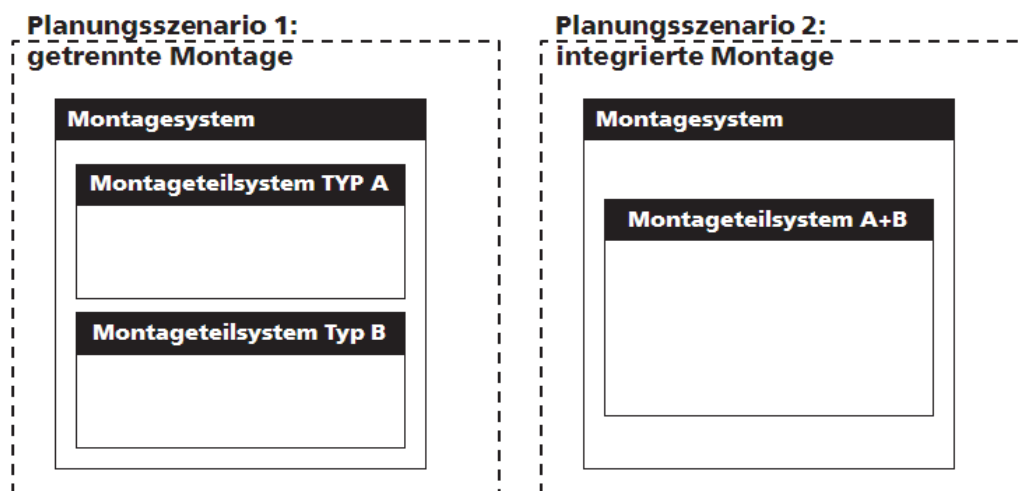
Es zeigte sich im Fallbeispiel, dass bei der Erstellung der Vorranggraphen zur Abbildung zweier Montageerzeugnisvarianten mit jeweils ca. 90 Montageteilen ein zeitlicher Aufwand von einem halben Arbeitstag benötigt wird. Die Erstellung der Vorranggraphen erfolgte durch einen Montageprozess-Experten mit Unterstützung eines weiteren Mitarbeiters zur Erstellung der Graphen. Der Vorranggraph von Typ B konnte aufgrund der ähnlichen Aufbaustruktur zu Typ A durch Kopieren und Modifizieren der Unterschiede abgeleitet werden. Die Komplexität der Erstellung von Vorranggraphen steigt mit zunehmender Anzahl Montageteile und Montageerzeugnisvarianten.

Phase 3 segmentiert die zu betrachtenden Montageerzeugnisse. Da innerhalb des Praxisbeispiels die Segmentierungsszenarien in der Aufgabenstellung bereits

<sup>125</sup> vgl. die Beziehung Produkt und Prozess in Kapitel 6.5.1

vorgegeben waren, wurden die 2 Planungsszenarien einer gemeinsamen und getrennten Montage der Typen A und B übernommen und auf eine detaillierte Abarbeitung der 3 Planungsschritte verzichtet. Da Phase 3 die Vorarbeiten von Zeile verwendet, ist eine Validierung dieser Schritte nicht mehr notwendig, da dies bereits in der Arbeit von Zeile erfolgte.<sup>126</sup>

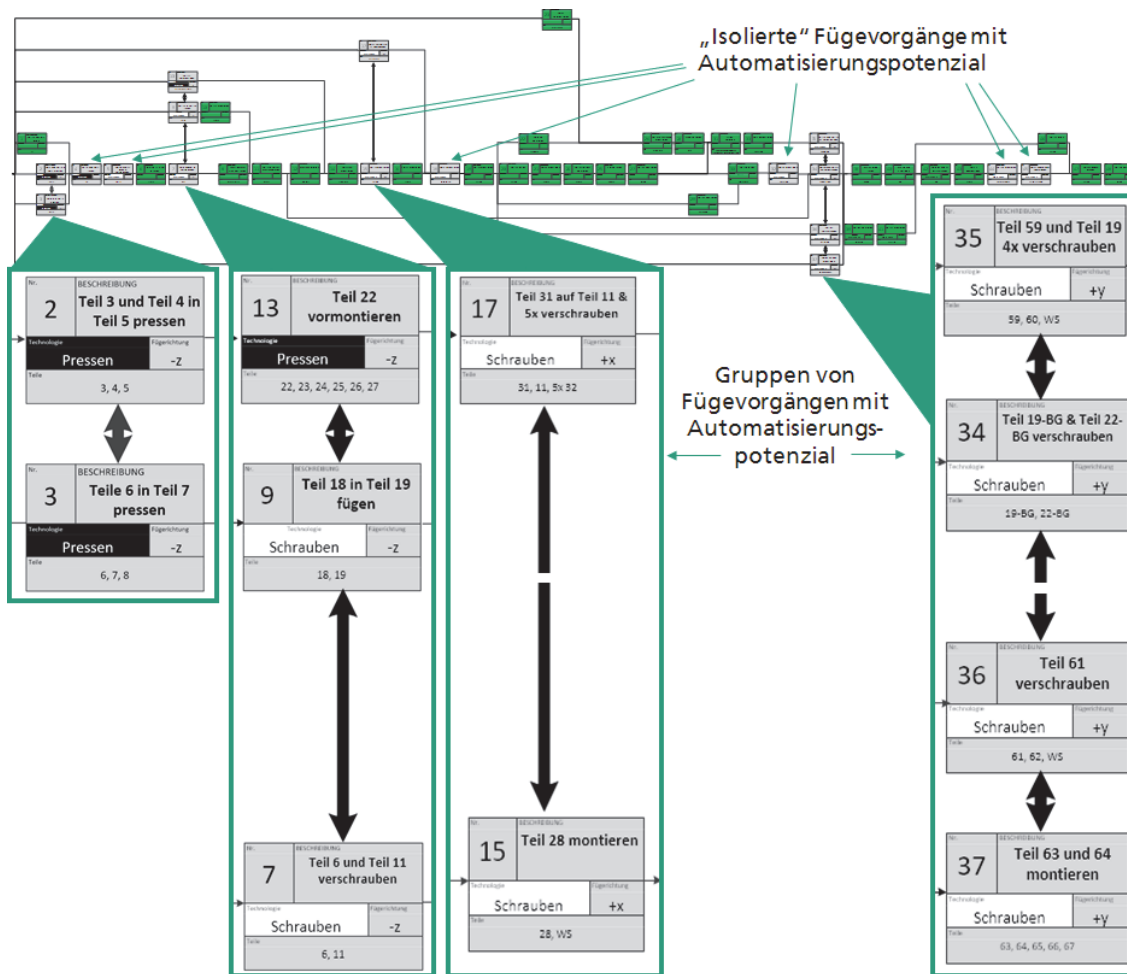
Abbildung 63 zeigt die Planungsszenarien des Fallbeispiels nach der Segmentierung in Phase 3. Das Montagesystem des Planungsszenarios 1 enthält die beiden Montageteilsysteme von Typ A und von Typ B, während in Planungsszenario 2 das Montagesystem aus einem Montageteilsystem A+B besteht. Die in der Abbildung 63 dargestellte Segmentierung der Montageerzeugnisse zu Montageteilsystemen je Planungsszenario stellt das Ergebnis von Phase 3 dar.



**Abbildung 63: Planungsszenarien nach der Segmentierung in Phase 3**

Phase 4 bestimmt in Schritt 1 das Automatisierungspotenzial der Technologien. Die Untersuchung der technischen Automatisierbarkeit der Vorgänge ermöglichte die Unterscheidung der Fügevorgänge in potenziell automatisierbare und manuelle Fügevorgänge. Abbildung 64 zeigt das Montagesequenzdiagramm mit den farblich gekennzeichneten manuellen Fügevorgängen in grün. Die grauen Fügevorgänge stellen technisch automatisierbare Vorgänge dar, die weiter in die Fügevorgangskategorien „Pressen“ und „Schrauben“ unterteilt wurden.

<sup>126</sup> vgl. das Verfahren von Zeile in Kapitel 4.1



**Abbildung 64: Montagesequenzdiagramm Typ A**

Das zeitliche Parallelisieren ergab bei Typ A insgesamt 4 verschiedene Gruppen aus entweder reinen Pressvorgängen (siehe Fügevorgang 2 und 3 in Abbildung 64), reinen Schraubvorgängen (Fügevorgang 15 und 17 sowie 34 bis 37 in Abbildung 64) oder einer Kombination aus Schraub- und Pressvorgängen (Fügevorgang 7, 9 und 13 in Abbildung 64). Innerhalb einer Gruppe von Fügevorgängen befinden sich Vorgänge, deren Bearbeitung aus derselben Richtung möglich ist. Etwaige notwendige Ausrichtungsveränderungen der Werkstücke wurden beachtet. In einem Fall musste eine Baugruppe um 180 Grad gedreht werden, was beim späteren Planungsschritt der Festlegung von Arbeitsinhalten (siehe Planungsschritt 5.2) durch die Eingabe der entsprechenden Teilverrichtung berücksichtigt wurde. Zudem wurde eine neue Aufnahme des Werkstücks notwendig, was im späteren

Planungsschritt 5.7 durch die Modellierung zusätzlicher Betriebsmittel abgebildet wurde. Außer den 4 Gruppen von integriert automatisierbaren Fügevorgängen wurden 6 weitere Fügevorgänge identifiziert. Diese isolierten Fügevorgänge sind in Abbildung 64 ebenfalls in grauer Farbe dargestellt.

Im zweiten Schritt der Festlegung von Automatisierungsstufen wurden sowohl die 4 Gruppen von Fügevorgängen als auch die 6 isolierten Fügevorgänge untersucht. Bei den 6 isolierten Fügevorgängen entsprechen 5 davon Schraubprozessen, ein Fügevorgang ist ein Pressvorgang. Beim Schrauben wurde das Eindrehen der Schrauben mit dem Handschrauber als teilautomatische Lösung und das vollautomatisierte Eindrehen mit einer entsprechenden Vorrichtung als Automatisierungsstufen definiert. Das Pressen muss aus Qualitätsgründen automatisiert erfolgen. Für die 4 Gruppen wurden entsprechende teil- bzw. vollautomatisierte Lösungen erarbeitet, wobei in der teilautomatischen Variante bei den Schraubvorgängen Handschrauber und bei den Pressvorgängen isolierte Pressvorrichtungen konzipiert wurden mit sequenzieller Abarbeitung der Fügevorgänge. Die automatische Lösung entsprach bei den Gruppen einer vollintegrierten Lösung, wodurch eine parallele Bearbeitung möglich wird.

Im dritten Schritt wurden die definierten Automatisierungsstufen hinsichtlich deren Wirtschaftlichkeit untersucht. Die Wirtschaftlichkeit wurde für jedes Montageteilsystem der beiden zu untersuchenden Planungsszenarien aus Abbildung 63 berechnet. Dabei zeigte sich bei den isolierten Schraubprozessen, dass die Lösung mit der geringsten Automatisierungsstufe die wirtschaftlichere ist, sowohl für MTS Typ A, für MTS Typ B und für das MTS A+B. Bei den Gruppen zeigte sich, dass für das MTS Typ A und auch für das MTS Typ A+B die vollautomatische Lösung wirtschaftlicher ist. Nur bei MTS Typ B ist die Stückzahl zu gering. Für eine nicht maximale Automatisierung existiert die Kennzahl B2 (nicht genutztes Automatisierungspotenzial). B2 für MTS Typ B ergibt sich aus der Summe der einzelnen manuellen Bearbeitungszeiten mal dem Personalkostensatz. Im Beispiel ergab die Kennzahl B2 bei Gruppe 34 bis 37 mit insgesamt 12 einzelnen



Schraubvorgängen einen Wert von 0,62 €/Stück. Man beachte, dass B2 für die isolierten Schraubvorgänge nicht gültig ist, da auch im Falle einer integrierten Montage die Stückzahl für eine vollautomatisierte Lösung nicht ausreicht.

Die Schritte in Phase 4 zeigten eine schlüssige, in sich logische und für den Planer sehr einfache, verständliche Vorgehensweise zur interaktiven Bestimmung des Automatisierungsgrads, da mit Hilfe des Montagesequenzdiagramms visuell Automatisierungspotenziale erarbeitet werden können. Das zeitliche Parallelisieren gelingt durch horizontales Verschieben der Fügevorgänge im Montagesequenzdiagramm und erleichtert auf diese Weise das Auffinden verschiedener Automatisierungslösungen. Komplexer umsetzbar ist das zeitliche Parallelisieren innerhalb von 2 Vorranggraphen desselben Erzeugnisses (vgl. Abbildung 48). Diese Art der Konzentration von Fügevorgängen erzeugt zeitlich parallelisierte Bearbeitungen von halbfertigen Erzeugnissen mit unterschiedlichem Montagefortschritt. Aus den Untersuchungen ergab sich, dass diese Restriktionen die Gestaltung der Fließmontage einschränken und die Abfolge von Teilverrichtungen komplizieren.

Phase 5 plant die Linien bzw. Montageteilsysteme einzeln aus. In Schritt 1 wird der Kundentakt der jeweiligen Montageteilsysteme berechnet. Abbildung 65 zeigt die berechneten Kundentakte je MTS.

	Monats-Stückzahl	Produktionszeit [s] im Monat	Kundentakt [s]
<b>Planungsszenario 1</b>	STK nachfr.	PZ verf.	KT
MTS Typ A	12000	495600	41,3
MTS Typ B	2000	495600	247,8
<b>Planungsszenario 2</b>			
MTS A+B	14000	495600	35,4

**Abbildung 65: Kundentakte je Montageteilsystem**

Schritt 2 ermittelt die produktspezifischen Teilverrichtungen. Im Praxisbeispiel wurden die Fügevorgänge auf deren ergänzende oder auch ersetzende

Teilverrichtungen untersucht. Die entstandenen Teilverrichtungen entsprachen entweder wertschöpfenden Teilverrichtungen oder nicht wertschöpfenden Teilverrichtungen wie das Prüfen oder Reinigen von Bauteilen und Werkstücken oder das Bewegen der Teile bzw. das Wechseln der Ausrichtung. Durch Verwendung von Vorrichtungen erfolgt bei den Teilverrichtungen eine exaktere Beschreibung der Abfolge von Tätigkeiten als im Vergleich zum ursprünglichen Fügevorgang. Die exaktere Beschreibung der einzelnen Teilverrichtungen führte zu einem Anstieg von insgesamt 141 Teilverrichtungen aus ursprünglich 48 Fügevorgängen.

Das Praxisbeispiel verdeutlicht, dass die Komplexität bei Berücksichtigung der Anzahl Elemente hinsichtlich des Montagesequenzdiagramms (Fügevorgänge und Teilverrichtungen) um den Faktor 3 ansteigt. Die Modifikationen waren mit erheblichem Aufwand verbunden, der Aufwand stieg um denselben Faktor 3 im Vergleich zur Erstellung der Vorranggraphen in Phase 2. Ursache waren die zeichnerischen Anpassungen innerhalb des Visualisierungsprogramms durch das permanente Verschieben vorhandener Elemente, um für neue Teilverrichtungen Platz zu schaffen. Hier entstehen Potenziale in der Automatisierung dieser graphischen Prozesse für ein späteres IT-System, das das Verfahren in Software umsetzt.

Schritt 3 ermittelt die Sollzeiten der jeweiligen Teilverrichtungen. Im Praxisbeispiel lagen teilweise Informationen von Sollzeiten aus vergangenen Baureihen vor, was die Ermittlung wesentlich erleichterte. Ergänzend wurde MTM-UAS angewandt und die minimalen Sollzeiten für die Teilverrichtungen über die vorgegebenen Zeitbausteine ermittelt. Anhang B zeigt einen Auszug des Ergebnisses in Form einer Tabelle mit den Teilverrichtungen, der Sollzeiten, der Automatisierungsstufe und den ursprünglichen Fügevorgang, aus denen die Teilverrichtungen entstanden sind. Für den Anwendungsfall bewährte sich die Bestimmung von Sollzeiten mithilfe der MTM-UAS-Systematik. Die Spezifikation des Prozesses in MTM-UAS gestaltete sich einfach mithilfe von wenigen Parametern, die entsprechenden Sollzeiten konnten schnell ermittelt werden.

Schritt 4 ordnet die Teilverrichtungen den Takten zu. Hierzu wurden TMS-Diagramme generiert. Es zeigte sich, dass die grafische Zuordnung der Teilverrichtungen zu Takten eine für den Planer einfach nachvollziehbare Vorgehensweise darstellt. Die Freiheitsgrade der Zuordnung werden durch den im Diagramm implizit enthaltenen Vorranggraphen in der unteren Hälfte des TMS-Diagramms dargestellt. Es können durch einfaches horizontales Verschieben der Teilverrichtungen entlang der Verbindungslinien vorteilhafte Konfigurationen ausgeführt werden. Vorteilhafte Konfigurationen sind z.B. parallelisierte manuelle Teilverrichtungen bei vollautomatischen Teilverrichtungen, um eine hohe Mitarbeiterauslastung zu erreichen. Eine weitere vorteilhafte Konfiguration ist das am spätesten mögliche Starten der Montage von Baugruppen, um interne Transportwege halbfertiger Baugruppen zu vermeiden und Platz zu sparen.

Schritt 5 enthält die Zuordnung der Teilverrichtungen zu Arbeitsplätzen. Im Praxisbeispiel konnte durch Abschätzung der Fläche für die Automaten und die Bereitstellung der Montageteile eine Zuordnung vollzogen werden und im TMS-Diagramm graphisch ergänzt werden.

Schritt 6 beinhaltet die Zuordnung der Teilverrichtungen zu Montagemitarbeitern. Das Ergebnis der Schritte 4,5 und 6 stellen für den Anwendungsfall die TMS-Diagramme für MTS Typ A, MTS Typ B und MTS A+B dar. Exemplarisch zeigt Abbildung 66 den ausgeplanten ersten Takt aus dem TMS-Diagramm von MTS Typ A. Die untere Hälfte der Darstellung zeigt das Montagesequenzdiagramm des ersten Takts. Die verschiedenen Teilverrichtungen sind in farbigen Blöcken dargestellt, manuelle Teilverrichtungen in grün, automatische Schraubvorgänge in weiß und automatische Pressvorgänge in schwarz. Takt 1 enthält 2 Pressstationen, wobei die erste Station 2 Pressvorgänge zeitlich parallelisiert. Beide Stationen bekommen aufgrund der Größe der Automaten jeweils einen Arbeitsplatz zugeordnet, wie aus den Blöcken am unteren Rand in Abbildung 66 zu erkennen ist.

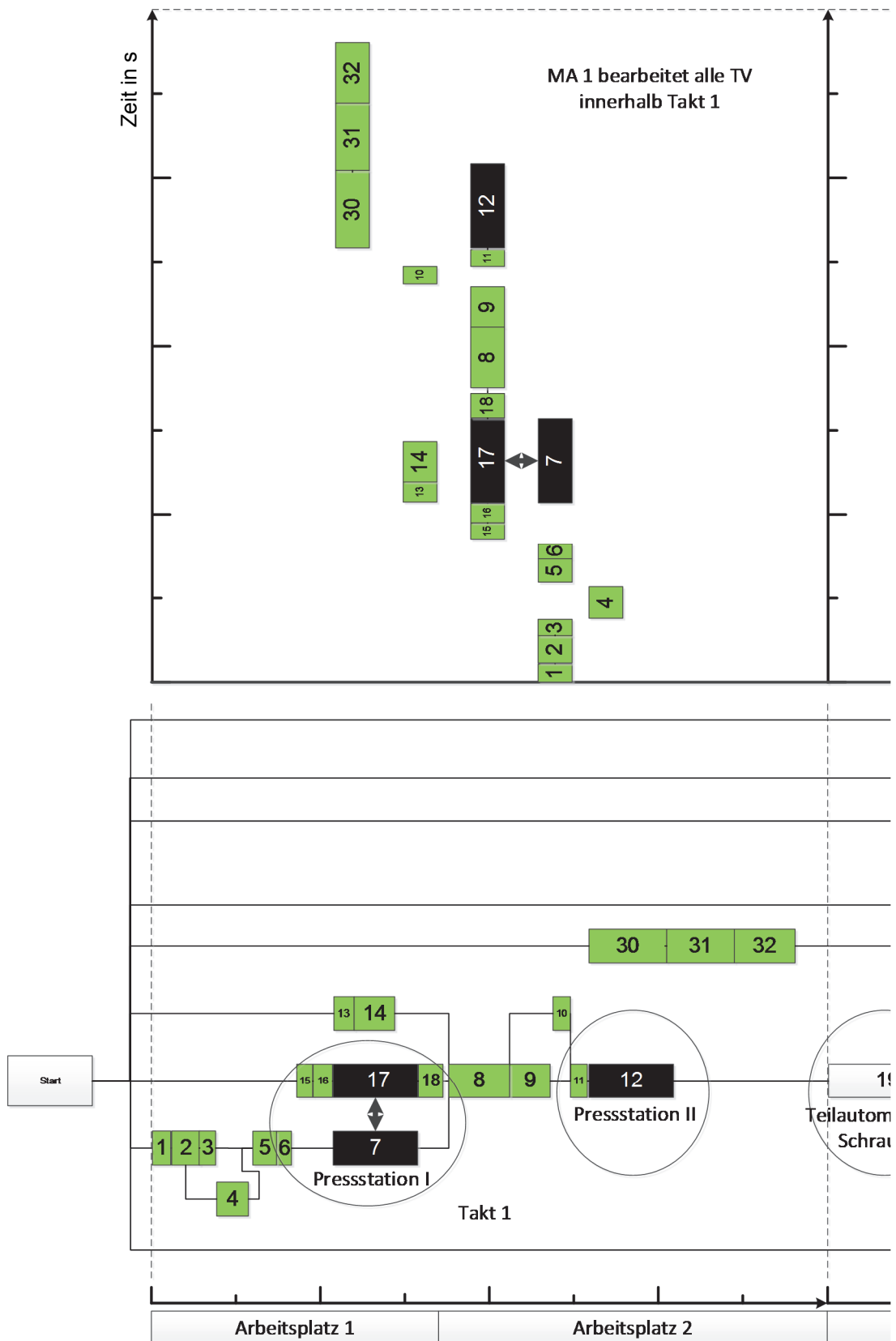


Abbildung 66: Auszug aus TMS-Diagramm Montageteilsystem Typ A

Es zeigte sich, dass bei der Zuordnung der Teilverrichtungen zu Mitarbeitern die obere Hälfte des TMS-Diagramms die notwendige graphische Unterstützung bietet, um die Mitarbeiterauslastung zu maximieren. Da die Zeitdimension in der oberen Hälfte entsprechend einem Taktzeitdiagramm die Ordinate darstellt, kann der Planer gedanklich von unten nach oben die manuellen Teilverrichtungen verfolgen. Der Planer erkennt sofort, ob die Teilverrichtungen sich überlappen, was einer nicht zulässigen Konfiguration entsprechen würde. Bei Unterbrechungen dagegen entsteht Verschwendung durch Wartezeiten. Aus der Abbildung 66 ist erkennbar, dass der MA1 während der maschinellen Pressbearbeitungen parallel andere manuelle Teilverrichtungen ausübt (TV 13, 14, 30 und 31). Lediglich gegen Ende des ersten Taktintervalls und nach Teilverrichtung 14 entstehen kurze Wartezeiten, sodass in Takt 1 eine Auslastung von 93% erreicht wird.

Im Praxisbeispiel konnte nach der Zuordnung der Teilverrichtungen zu Mitarbeitern die vorherige Anzahl Takte bestätigt werden. Es wurde insgesamt eine gute Auslastung erzielt, indem in den meisten Takten jeweils ein Mitarbeiter die Teilverrichtungen eines entsprechenden Taktes übernahm. Aufgrund der fall-spezifischen Konstellation von automatischen und manuellen Teilverrichtungen war es möglich, dass in jeweils 2 paarweisen Takten die Teilverrichtungen von nur einem MA ausgeführt werden konnten.

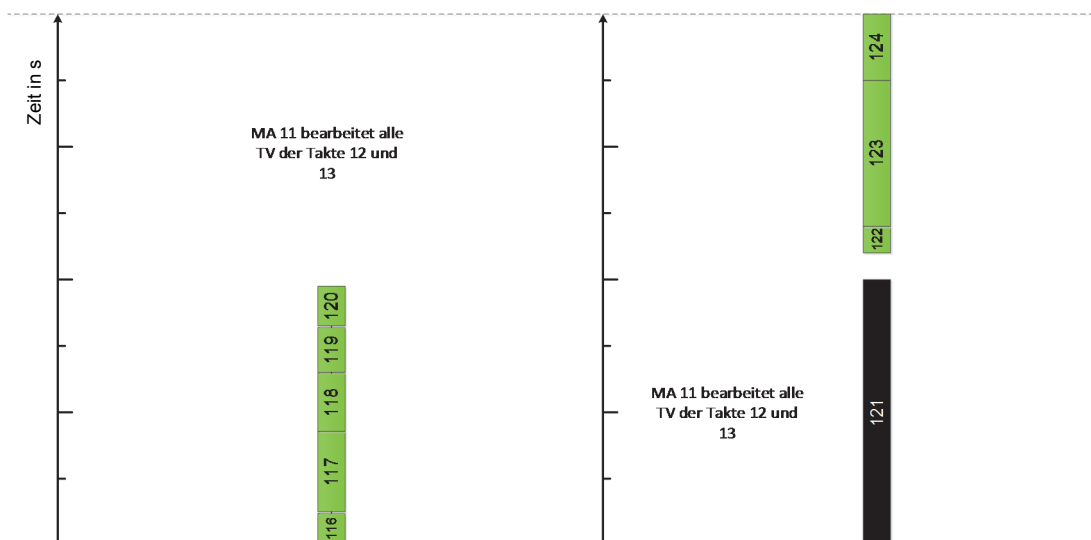


Abbildung 67: Ausschnitt aus oberer Hälfte des TMS-Diagramms MTS Typ A

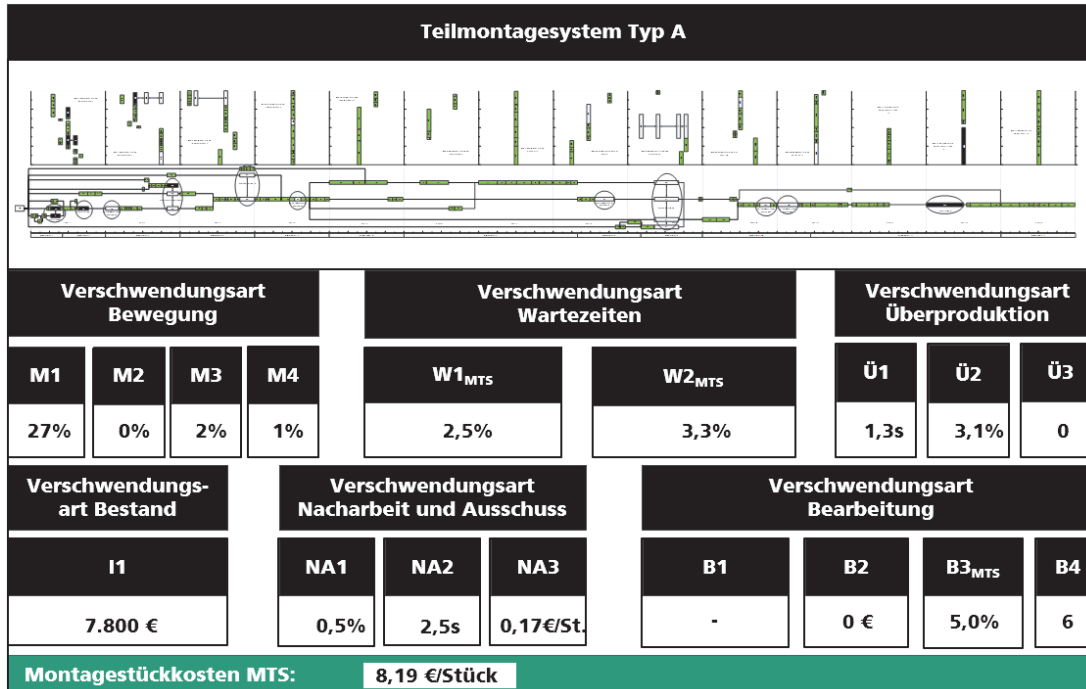
Abbildung 67 zeigt einen Ausschnitt aus der oberen Hälfte des TMS-Diagramms MTS Typ A, Takt 12 und 13 werden von MA 11 bearbeitet. Während das Werkstück in der Prüfstation geprüft wird, geht der MA nach Beendigung von Teilverrichtung 124 zu Takt 12 und bearbeitet zeitlich parallel die Teilverrichtungen 116 bis 120. Danach kehrt er zu Takt 13 zurück. Der Ortswechsel von Takt 12 zu Takt 13 und wieder zurück wurde zusätzlich als nicht wertschöpfende Teilverrichtung ergänzt. Durch die interaktive Planung im TMS-Diagramm konnten die Anzahl MA sowie deren Wartezeiten minimiert und die Auslastung der Mitarbeiter durch Zuordnung der Montageteilverrichtungen maximiert werden.

Wie bereits in Schritt 2 bei der Bestimmung der Teilverrichtungen aus den Fügevorgängen festgestellt, entstanden auch bei der Erstellung und Bearbeitung der TMS-Diagramme sehr hohe Aufwände zur Durchführung von zeichnerischen Anpassungen. Deshalb bieten die Schritte 4, 5 und 6 weiteres Potenzial in der Automatisierung der graphischen Prozesse innerhalb eines zu entwickelnden IT-Systems, das das Verfahren in Software umsetzt.

Schritt 7 generiert das Modell des physischen Montagesystems. Auf Basis der ausgeführten Planungsschritte ergeben sich für das jeweilige MTS die Anzahl der Elemente. Im Einzelnen sind diese Elemente die Arbeitsplätze und deren MTS-Verkettungen, die Anzahl Mitarbeiter, die Automaten und weitere Arbeitsmittel wie Handschrauber und Werkzeuge, sowie Vorrichtungen zur Darstellung der Arbeitsfläche und der Teilebereitstellung

In Schritt 8 wurden die Montageteilsysteme auf deren Verschwendungsanteile geprüft und die Montagestückkosten errechnet. Abbildung 68 zeigt schematisch das TMS-Diagramm von Montageteilsystem Typ A inklusive der Kennzahlen zur Quantifizierung der Verschwendung und der Montagestückkosten. Die Kennzahlen weisen allgemein auf eine gute Konfiguration des Montageteilsystems hin. Mit 2,5% Abtaktungsverlust (W1) und einer Taktabweichung von 1,3 Sekunden ist kaum Verschwendung durch Wartezeiten und Überproduktion vorhanden. Lediglich der Anteil an Bewegungsverschwendung weist mit 27% einen Wert auf, der auf

Potenziale im Bereich der Reduzierung nicht wertschöpfender Teilverrichtungen hinweist.



**Abbildung 68: TMS-Diagramm von MTS Typ A mit Kennzahlen**

Im Anwendungsfall zeigte sich, dass der Anteil an nicht wertschöpfenden Teilverrichtungen nicht weiter reduziert werden konnte, da diese aus manuellen und schwer automatisierbaren Montageteilzuführungen (von der Bereitstellung zur Vorrichtung) bestand.

Die Planung der Teilebereitstellung in Phase 6 ergab keine wesentliche Veränderung der Konfiguration der 3 Montageteilsysteme bzw. gab es keine notwendigen Veränderungen hinsichtlich der Konfiguration des TMS-Diagramms. Die jeweilige Kapazitätsanalyse je Teilsystem bestätigte die in Phase 5 Schritt 5 durchgeführte Grobdimensionierung durch die Einteilung der Takte in Arbeitsplätze.

Phase 7 bildet die Planungsschritte hinsichtlich der Montagelayoutplanung ab. Die Gestaltung der Einzellayouts der Teilsysteme folgte im Fallbeispiel der generellen Struktur bezüglich der Anordnung von Montagelinien im Hallenlayout. Die

Anbindung an die logistische Hauptachse begünstigte die Gestaltung in U-Form, wodurch die An- und Ablieferung der Teile an einem Punkt möglich wird. Die Überprüfung der Laufwege führte zu keiner Umtaktung von Teilverrichtungen, da diese schon in vorigen Planungsphasen hinreichend berücksichtigt waren. Deshalb konnte die Konfiguration der Montageteilsysteme beibehalten werden.

In Phase 8 erfolgt die gesamthafte Bewertung der beiden gegenüberzustellenden Planungsszenarien einer gemeinsamen bzw. getrennten Montage der Produkte A und B. Abbildung 69 zeigt den bewerteten Zustand des Montagessystems in Planungsszenario 1 unter Anwendung der Formeln in Kapitel 6.6 und 6.7.

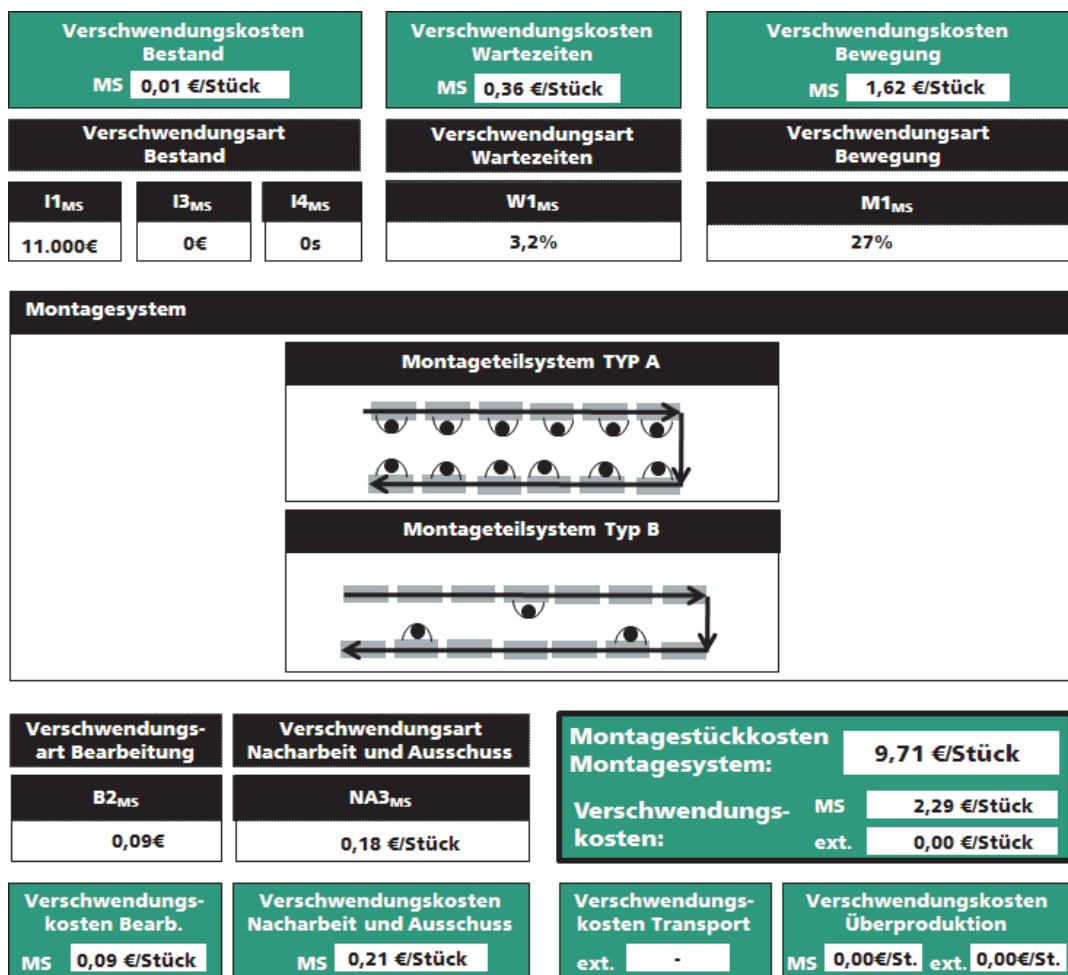


Abbildung 69: Bewerteter Zustand des Montagessystems in Planungsszenario 1



Das alternative Planungsszenario 2 einer gemeinsamen Montage der Typen A und B ergab folgende in der Abbildung 70 dargestellte Bewertung. Die Gegenüberstellung der beiden Szenarien zeigt, dass obwohl die gesamten Verschwendungskosten bei Planungsszenario 2 größer sind als in Szenario 1, die gemeinsame Montage der beiden Typen A und B auf einer Linie wirtschaftlicher ist.

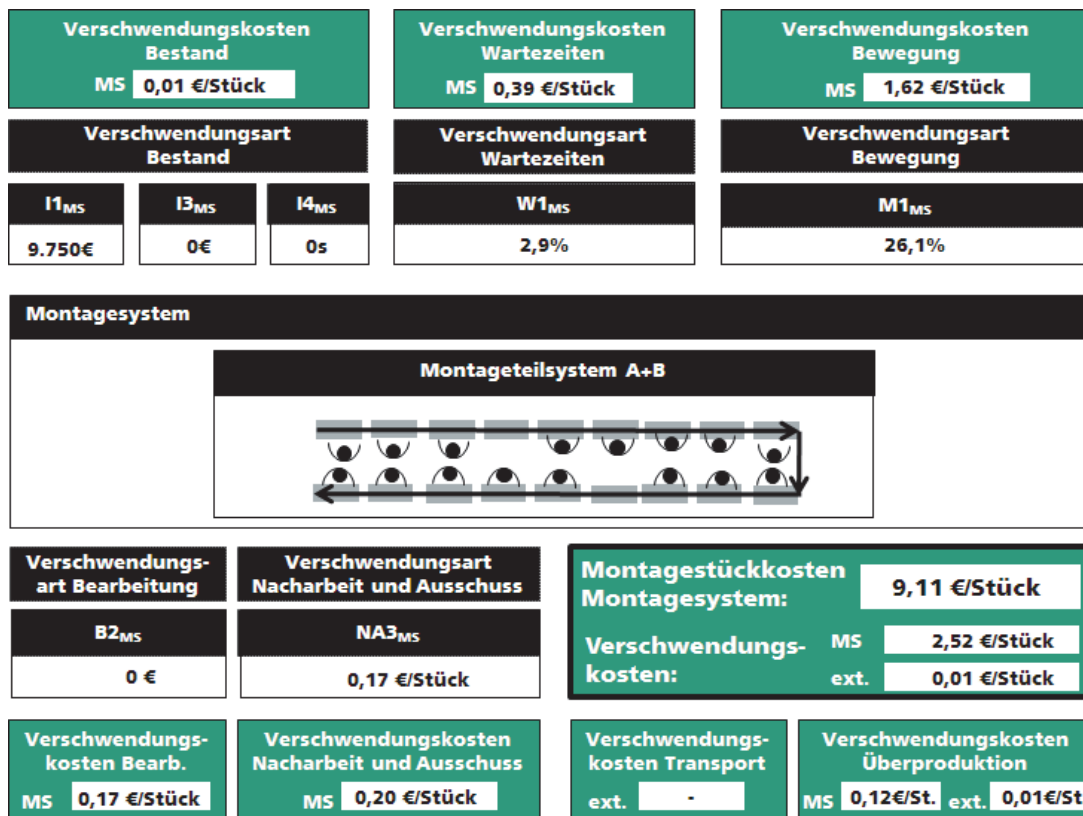


Abbildung 70: Bewerteter Zustand des Montagesystems in Planungsszenario 2

Das Fallbeispiel weist die Anwendbarkeit des Verfahrens zur Gestaltung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen bei hybriden Systemen nach. Das Verfahren zeichnet sich vor allem bei dieser Mischform aus, da gleichzeitig bei automatischen Vorgängen der optimale Automatisierungsgrad und bei manuellen Vorgängen die maximale Mitarbeiterauslastung angestrebt werden. Die Anwendung hybrider Systeme weist eine erweiterte Anwendbarkeit auf rein

manuelle bzw. rein automatische Montagesysteme nach, da beide Teilverrichtungsarten im Praxisbeispiel repräsentiert sind.

Direkt nachgewiesen durch das Fallbeispiel wurde die Funktionsfähigkeit bei Kleingeräten. Es lässt sich ableiten, dass für Großgeräte eine Anwendbarkeit ebenfalls gegeben ist, da flächenrelevante Aspekte im Verfahren mit abgebildet wurden.

Besonders hervorzuheben ist die interaktive Miteinbeziehung des Planers mit Hilfe der Diagramme, die wesentliche Planungsschritte graphisch aufbereiten. Durch die entwickelten Kennzahlen werden für den Planer die Auswirkungen der Entscheidungen und Konfigurationen innerhalb der Planung transparent. Weiter entstehen viele Möglichkeiten der Überwachung einer Abbildbarkeit wie z.B. Restriktionen der Montagereihenfolge oder die ausreichende Dimensionierung der Bereitstellfläche im Montagesystem. Die Planungsqualität steigt, es werden Planungsfehler vermieden.

Die Anwendung aller 8 Verfahrensphasen inklusive deren –schritte weist die in sich logische Vorgehensweise nach. Die Funktionsfähigkeit der verwendeten Basismodelle inklusive der Kennzahlen und Formeln konnte im Praxisbeispiel nachgewiesen werden. Der sukzessive Aufbau der verschiedenen Modelle während der 8 Planungsphasen ist für den Planer aus Entwicklersicht nachvollziehbar und transparent.

Es zeigte sich während der Entwicklungs- und Testphasen, dass eine gewisse Einarbeitung in die verwendeten Instrumente der Planung von Vorteil ist. Das TMS-Diagramm erfordert das Verständnis für die verschiedenen Teilbereiche und deren zeitliche Achsen, die sowohl horizontal im Montagesequenzdiagramm und vertikal im Taktzeitdiagramm abgebildet sind. Der Entwicklungsprozess zeigte auch, dass ein genaues Studium der Definitionen der Kennzahlen notwendig ist, um die Bewertungsschritte während der Planung nachvollziehen und anwenden zu können. Es ist deshalb eine gewisse Komplexität erkennbar, die mit zunehmender Anzahl Teile je Montageerzeugnis bzw. der Anzahl Montageerzeugnisvarianten steigt.

Das Praxisbeispiel verdeutlicht, dass durch Anwendung des entwickelten Verfahrens verschwendungsarme Fließmontagen gestaltet werden können, was der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit entspricht. Die Wirtschaftlichkeit wird durch die Montagestückkosten nachgewiesen, das Reduzieren von Verschwendung wird durch die im Verfahren integrierte Bewertungssystematik der 7 Arten von Verschwendung ermöglicht.

---

## 9 Zusammenfassung

Verschiedene Megatrends verändern und „verschärfen“ die Anforderungen an heutige Montagesysteme als Teilbereich der Produktion. Die Globalisierung sowie der Wandel vom Anbieter- zum Käufermarkt erzeugen bei Unternehmen extreme Wettbewerbssituationen. Im Bestreben nach maximaler Wirtschaftlichkeit und Effizienz rückt im Besonderen die Montage in den Mittelpunkt der Betrachtungen, da sie einen vergleichsweise hohen Wertschöpfungsanteil durch personal- bzw. investitionsintensive Prozesse aufweist.

Das historisch bewährte und heute global etablierte Toyota-Produktionssystem bietet Lösungen zur Kostenreduzierung durch das Erkennen und Beseitigen von Verschwendung. Dessen Ansätze und Methoden sind auf die kontinuierliche Verbesserung real existierender Produktionen ausgerichtet, jedoch sind für die vorserielle Planung kaum Ansätze zur Reduzierung von Verschwendung und zur Konzentration auf Wertschöpfung vorhanden, weder in den heute existierenden Montageplanungsmethoden noch in den am Markt befindlichen EDV-Tools zur Planung von Montagesystemen. Dadurch werden die heute vorhandenen Kostensenkungspotenziale besonders bei den mit hoher Stückzahl betriebenen getakteten Fließmontagen nicht erschlossen.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde ein Planungsverfahren entwickelt, das sukzessive in 8 Phasen verschwendungsarme getaktete Fließmontagen gestaltet. Um die Verschwendung während der Planung nachweislich zu reduzieren, wurde ein Kennzahlensystem zur Quantifizierung der 7 Verschwendungsarten innerhalb von Fließmontagen entwickelt. Es wurden Basismodelle zur Beschreibung der zu montierenden Produkte, der durchzuführenden Montageprozesse und schließlich der abzubildenden Fließmontagesysteme erzeugt, auf die das Verfahren zur Planung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen zurückgreift. Um Aussagen bezüglich der Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen, wurden Algorithmen zur modellbasierten Kostenermittlung der 7 Verschwendungsarten sowie zur modellbasierten

Erfassung der Montagestückkosten entwickelt. Dadurch wurde erstmalig eine Bewertungsmethodik für getaktete Fließmontagen erschaffen, die die absoluten Verschwendungskosten pro Erzeugnis ermittelt und einen Vergleich zu den Montagestückkosten zulässt.

Zur interaktiven Miteinbeziehung des Planers wurde als Kernelement des Verfahrens das Taktzeit-Montagesequenz-Diagramm entwickelt, das die beiden aus der klassischen Montageplanung bekannten Elemente eines Vorranggraphen mit dem des Taktzeitdiagramms kombiniert.

Das entwickelte Verfahren zur Planung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen wurde inklusive dessen Basismodelle sowie dessen Algorithmen anhand eines Praxisbeispiels aus der Elektrowerkzeugindustrie erprobt.

Als Ergebnis der vorliegenden Arbeit steht dem Planungsbereich ein nachgewiesen funktionsfähiges Verfahren zur Verfügung, mit dem die geforderte Zielsetzung der Gestaltung verschwendungsarmer Fließmontagen erreicht wird. Nach Abarbeitung der 8 Phasen ist das Planungsergebnis einer verschwendungsarmen getakteten Fließmontage vollständig durch die geschaffenen und benutzten Modelle beschrieben und bewertet.

Mit Hilfe von Kennzahlen, die Verschwendung quantifizieren und Algorithmen, die den monetären Wert dieser Verschwendung ausdrücken, wird das Ziel der Messbarkeit erfüllt.

Das Ziel der Implementierung verschwendungsvermeidender und verschwendungsreduzierender Mechanismen wird ebenfalls erfüllt. Die quantitative Anzeige der Verschwendungsarten ermöglicht dem Planungsbereich während der Gestaltung von Planungsszenarien zunächst die Lokalisierung und in einem zweiten Schritt die zielgerichtete Reduzierung von Verschwendung. Zusätzlich fördern der interaktive Charakter und die transparenten graphischen Elemente des Verfahrens die Sensibilisierung hinsichtlich der Erkennung von Verschwendungsursachen und das Auffinden situationsbedingter Maßnahmen zur Verschwendungsvermeidung.

Es ist zu erwarten, dass das Verfahren aufgrund der Erweiterung der klassischen Verfahren um die Dimension der Reduzierung von Verschwendung analog der geforderten Zielsetzung die Stückkosten weiter reduziert und Kostensenkungspotenziale heben kann. Das Praxisbeispiel aus der Industrie zeigt punktuell diese Kostenreduzierung auf, es bedarf allerdings noch weiterer Tests und der Varianz von Eingangsparametern, um genauere Aussagen über das Aufwand-Nutzenverhältnis der Anwendung des Verfahrens zu erhalten.

---

## 10 Summary

Different megatrends change and exacerbate the requirements concerning today's assembly systems as a part of manufacturing. Globalization as well as the transition from a seller's to a buyer's market generate extreme competitive situations. While striving for maximal profitability and efficiency, especially assembly systems become the focus of attention, since they present a comparatively high share of added value through personnel and investment intense processes.

The historically proven and globally established Toyota production system offers solutions to reduce costs by recognizing and avoiding waste. Its basic approaches and techniques aim for continuous improvement of existing manufacturing. However, there are barely techniques to reduce waste and also to focus on added value during the planning stage before start of production, neither within existing approaches of assembly planning nor within today's software supporting assembly planning. In particular, synchronized assembly lines with a high quantity imply cost-saving potentials, which remain locked nowadays.

The present work introduces a planning procedure, which gradually creates low waste synchronized moving assembly lines within 8 phases. In order to reduce waste evidently during the planning phase, an indicator system was developed to quantify all 7 types of waste within moving assembly lines. Basic models were generated in order to characterize products, which have to be assembled, assembly processes, which have to be conducted, and physical moving assembly lines, which have to be described. The introduced planning procedure uses these basic models. In order to enable efficiency analysis, model-based algorithms were introduced to calculate costs, which are caused by the 7 types of waste. Furthermore, model-based algorithms were elaborated to evaluate assembly costs per unit. As a result, a valuation method for synchronized moving assembly lines was created, which calculates the absolute costs of waste for the first time. In addition, the calculated costs of waste are able to be compared with the assembly costs per unit.

For the purpose of an interactive incorporation of the planner, a new graph called 'tact-time assembly sequence chart' was evolved as a core element of the procedure. This new graph combines the well-known operator-balance chart with the assembly priority chart.

The developed procedure to design low waste synchronized moving assembly lines was approved including its models and algorithms by means of a practical example from the power tools industry.

As a result of the present work, an evidently executable and tested procedure is available to the planner, which can be used to accomplish the goal of designing low waste moving assembly lines. After conducting all 8 phases, the low waste moving assembly lines as an outcome of the procedure are fully described and evaluated by the created models.

The aim of measurability is achieved by means of key figures, which quantify waste, and as well by algorithms, which express the monetary value of waste

The goal of implementing mechanisms, which are able to reduce and eliminate waste is accomplished. The quantification of all types of waste enables at first the localization, and in a second step the purposeful decrease of waste. Furthermore, the interactive character and the transparent graphical elements foster the recognition of origins of waste and as well the detection of situational measures to lower waste.

It is expected, that the procedure farther reduces costs per unit and unlocks cost potentials, whilst classical approaches are now enriched with the dimension of waste reduction. The practical example reveals this cost reduction in a certain case, nevertheless further tests including the variation of input parameters are needed to obtain accurate insights concerning the cost-benefit ratio.



---

## 11 Ausblick

Eine zukünftige prototypische softwaretechnische Umsetzung des Verfahrens verspricht eine Reduzierung des als hoch eingeschätzten Aufwands bei der Erstellung und Nutzung der entwickelten Diagramme sowie bei der Berechnung von Algorithmen zur Quantifizierung von Verschwendung. Durch das beschleunigte Arbeiten mit Hilfe eines Prototypen können innerhalb kurzer Zeit mehrere Planungsszenarien bearbeitet werden, was schneller zur Reduzierung von Verschwendung führt. Eine prototypische Umsetzung vereinfacht die Durchführung weiterer Tests und ermöglicht die Variation von Eingangsparametern, im Besonderen können weitere Aussagen über die Anwendung des Verfahrens bezüglich mehr Komplexität wie z.B. steigender Anzahl von Montageteilen pro Erzeugnis oder über die steigende Anzahl zu untersuchender Montageerzeugnisse getroffen werden.

Weitere Erkenntnisse über das zu erreichende Kostenminimum verspricht die mathematische Optimierung eines entsprechenden Montagesystems unter Verwendung der in dieser Arbeit entwickelten Formeln und Kennzahlen.

Generell ist der hier verwendete Ansatz der Quantifizierung von Verschwendung in der Planungsphase von Montageprozessen auch für den Bereich der Produktionslogistik denkbar und auf Anwendbarkeit zu prüfen. Im Besonderen kann eine zusammenführende Betrachtung der Montage- sowie der Produktionslogistikplanung zu neuen Erkenntnissen über die Anwendung des Line-Back-Ansatzes führen.

---

## 12 Literaturverzeichnis

- Arnold et al. 2008** Arnold, Dieter *et al.* 2008.  
*Handbuch Logistik.*  
3. Aufl.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 3540729283.
- Bode et al. 1980** Bode, Arndt & Händler, Wolfgang. 1980.  
*Rechnerarchitektur.*  
Berlin : Springer.  
ISBN 0387096566
- Braun 2004** Braun, Jochen. 2004.  
*Ein Planungsverfahren zum computergestützten Engineering von Versorgungsnetzen für Zulieferketten von Herstellern mit variantenreicher Serienproduktion.*  
Heimsheim : Jost-Jetter.  
IPA-IAO-Forschung und Praxis; 398.  
ISBN 3936947341
- Brecher et al. 2009** Brecher, Christian & Müller, Rainer. 2009.  
*Studie Strategien und Trends in der Montagetechnik und -organisation: Cluster of excellence integrative production technology for high wage countries.*  
Aachen : Apprimus.  
ISBN 9783940565273
- Britzke 2010** Britzke, Bernd. 2010.  
*MTM in einer globalisierten Wirtschaft. Arbeitsprozesse systematisch gestalten und optimieren.*  
1. Aufl.  
München : mi Wirtschaftsbuch. FinanzBuch Verlag GmbH.  
ISBN 9783868801477
- Broy 1998** Broy, Manfred. 1998.  
*Informatik: eine grundlegende Einführung. Band 1: Programmierung und Rechnerstrukturen.*  
2. Aufl.  
Berlin : Springer.  
ISBN 9783540632344
- Bullinger 1986** Bullinger, Hans-Jörg. 1986.  
*Systematische Montageplanung: Handbuch für d. Praxis.*  
München, Wien : Hanser.  
ISBN 9783446146068
- Czipin 2013** Czipin Consulting. 2013.  
*Produktivitätsstudie 2013.*  
Wien: Czipin Consulting,  
zuletzt geprüft am 1. September 2014.  
Verfügbar:  
[http://www.lebensart.at/images/doku/produktivitaetsstudiecercl\\_efeb13v12.pdf](http://www.lebensart.at/images/doku/produktivitaetsstudiecercl_efeb13v12.pdf)

- Deuse 2012** Deuse, Jochen & Busch, Felix. 2012.  
Zeitwirtschaft in der Montage.  
In: Lotter, Bruno & Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*.  
2. Aufl. 2013.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 978-3-642-29061-9
- DIN 19233** Deutsches Institut für Normung e. V.  
*DIN 19233 - Leittechnik - Prozessautomatisierung – Automatisierung mit Prozessrechensystemen, Begriffe*  
Berlin: Beuth
- DIN 6789** Deutsches Institut für Normung e. V. 2013.  
*Dokumentationssystematik - Verfälschungssicherheit und Qualitätskriterien für die Freigabe digitaler Produktdaten*.  
Berlin : Beuth
- DIN 8593** Deutsches Institut für Normung e. V. 2003.  
*Fertigungsverfahren Fügen*.  
Berlin : Beuth
- Dombrowski et al. 2015** Dombrowski, Uwe & Mielke, Tim. 2015.  
*Ganzheitliche Produktionssysteme*.  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
ISBN 978-3-662-46163-1
- Dubbel 2014** Dubbel, Heinrich. 2014.  
*Taschenbuch für den Maschinenbau*.  
24., aktualisierte und erw. Aufl.  
Berlin: Springer Vieweg.  
ISBN 978-3-642-38890-3
- Duggan 2012** Duggan, Kevin J. 2012.  
*Creating Mixed Model Value Streams: Practical Lean Techniques for Building to Demand, Second Edition*.  
2nd ed.  
Hoboken : CRC Press.  
ISBN 9781439868430.
- Eisele et al. 2012** Eisele, Michael, Weskamp, Markus & Kraus, Marcus.  
NaeGeMo - Die nächste Generation der Montageplanung.  
*Productivity Management 2012 (17)*, S. 35–38
- Erlach 2010** Erlach, Klaus. 2010.  
*Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik*.  
Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag.  
VDI-Buch.  
ISBN 9783540898665.
- Eversheim 1989** Eversheim, Walter. 1989.  
*Organisation in der Produktionstechnik Band 4*.  
2. neubearb. und erw. Auflage  
Düsseldorf : VDI.  
ISBN 139783642648007
- Eversheim 2002** Eversheim, Walter. 2002.  
*Organisation in der Produktionstechnik 3*.

4. bearbeitete und korrigierte. Auflage  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 9783642626401
- Eversheim 2005**  
Eversheim, Walter. 2005.  
*Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung.*  
Berlin, u.a. : Springer.  
ISBN 3-540-21175-6
- Feldmann 2004**  
Feldmann, Klaus. 2004.  
*Montage strategisch ausrichten - Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen.*  
Berlin, u.a. : Springer.  
ISBN 3-540-40304-3
- Feldmann et al. 2014**  
Feldmann, Klaus, Schöppner, Volker & Spur, Günter. 2014.  
*Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren.*  
2. Aufl.  
München : Hanser.  
ISBN 9783446436565
- Festool 2009**  
Festool. 2009.  
*Festool zur „Fabrik des Jahres“ ausgezeichnet.*  
Wendlingen: Festool.  
zuletzt geprüft am 1. September 2014.  
Verfügbar: <https://www.festool.de/Ueberuns/News/Pages/Fabrik-des-Jahres-2009.aspx>
- Freibichler et al. 2013**  
Freibichler, Wolfgang & Stiehl, Anselm. 2013.  
*Praxishandbuch Operative Wertsteigerung: Wie Top-Entscheider Potenziale zur Optimierung erkennen und nutzen.*  
Berlin : Springer Gabler.  
ISBN 9783642213618
- Friedl 2010**  
Friedl, Birgit. 2010.  
*Kostenrechnung: Grundlagen, Teilrechnungen und Systeme der Kostenrechnung.*  
2., überarb. und erw. Aufl.  
München : Oldenbourg.  
BWL 10-2012.  
ISBN 9783486591262.
- Gabler 2016a**  
Vogt, Kai-Ingo.  
*Gabler-Wirtschaftslexikon,*  
zuletzt geprüft am 31. Oktober 2016.  
Verfügbar:  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/serienproduktion.html>
- Gabler 2016b**  
Feess, Eberhard, Gillenkirch, Robert.  
*Gabler-Wirtschaftslexikon,*  
zuletzt geprüft am 11. März 2016.  
Verfügbar:  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/3210/system-v12.html>
- Görz et al. 2003**  
Görz, Günther, Rollinger, Claus-Rainer & Schneeberger, Josef. 2003.  
*Handbuch der künstlichen Intelligenz.*

4. Aufl.  
München : Oldenbourg.  
ISBN 9783486272123

**Grunwald 2002**

Grunwald, Stefan. 2002.  
*Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten  
Produktentwicklung und Montageplanung.*  
München : Utz, Wiss.  
Forschungsberichte / IWB; Bd. 159.  
ISBN 9783831600953

**Hartel 2012**

Hartel, Marko. 2012.  
Planung und Bewertung von Montagesystemen.  
In: Lotter, Bruno & Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der  
industriellen Produktion.*  
2. Aufl. 2013.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 978-3-642-29061-9

**Heidenblut et al. 2006**

Heidenblut, Volker & Hompel, Michael ten. 2006.  
*Taschenlexikon Logistik: Abkürzungen, Definitionen und  
Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und  
Logistik.*  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
VDI-Buch.  
ISBN 3540285822

**Henderson et al. 1984**

Henderson, Bruce D. & Gälweiler, Aloys. 1984.  
*Die Erfahrungskurve in der Unternehmensstrategie.*  
2., überarb. Aufl.  
Frankfurt Main u.a. : Campus-Verl.  
ISBN 3-593-32086-X

**Herlyn 2012**

Herlyn, Wilmjakob. 2012.  
*PPS im Automobilbau: Produktionsprogrammplanung und -  
steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten.*  
1. Aufl.  
München: Carl Hanser Fachbuchverlag.  
ISBN 3446413707.

**Herrmann 2009**

Herrmann, Frank. 2009.  
*Logik der Produktionslogistik.*  
1. Aufl.  
München : Oldenbourg, R.  
ISBN 3486588117

**Höhne 2013**

Höhne, Frank. 2013.  
*Praxishandbuch Operational Due Diligence: Bewertung der  
operativen Leistungsfähigkeit produzierender Unternehmen.*  
Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden.  
ISBN 978-3-658-00684-6.

**Holle 2002**

Holle, Wolfgang. 2002.  
*Rechnerunterstützte Montageplanung: Montageplanung und  
simultaneous Engineering ; mit einer CD-ROM ; [CD-ROM mit  
Demo- und Berechnungsprogrammen].*

- München, Wien : Hanser.  
ISBN 3-446-21986-2
- Isebrecht 2008**  
Isebrecht, Kerstin. 2008.  
*Montageplanung in der Automobilindustrie: Ein Optimierungsmodell.*  
Saarbrücken : VDM Verl. Dr. Müller.  
ISBN 9783836470889
- Jonas 2000**  
Jonas, Christian. 2000.  
*Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen.*  
München : Utz.  
Forschungsberichte IWB; Bd. 145.  
ISBN 9783896758705
- Kaymakci 2013**  
Kaymakci, Tayfun. 2013.  
*Ringele steigert Produktivität um 25 %.*  
Landsberg,  
zuletzt geprüft am 2. September 2014.  
Verfügbar: <http://www.produktion.de/management/ringele-steigert-produktivitaet-um-25/>
- Klein et al. 2004**  
Klein, Robert & Scholl, Armin. 2004.  
*Planung und Entscheidung: Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse.*  
München : Vahlen.  
Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften.  
ISBN 9783800630608
- Kletti et al. 2015**  
Kletti, Jürgen & Schumacher, Jochen. 2015.  
*Die perfekte Produktion: Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT).*  
2. Aufl.  
Berlin, u.a. : Springer Vieweg.  
ISBN 3-662-45440-8
- Knowles 2011**  
Knowles, Graeme. 2011.  
*Six Sigma.*  
Telluride: Graeme Knowles & Ventus Publishing.  
ISBN 978-87-7681-852-4
- König 1997**  
König, Stefan. 1997.  
*Ein Verfahren zur Analyse von Problemen der Ressourcenabstimmung auf Basis synergetischer Mustererkennung.*  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
IPA-IAO Forschung und Praxis; 249.  
ISBN 9783540632269.
- Konold et al. 2003**  
Konold, Peter & Reger, Herbert. 2003.  
*Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung.*  
2., überarbeitete und erweiterte Auflage.  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.  
Vieweg Praxiswissen.  
ISBN 9783663016106.

- Kratzsch 2000** Kratzsch, Sabine. 2000.  
*Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen* :  
Techn. Univ., Diss. Braunschweig, 2000.  
Essen : Vulkan-Verl.  
Schriftenreihe des IWF.  
ISBN 3802786548
- Landherr 2013** Landherr, Martin. 2013.  
Digitale Fabrik.  
In: Engelbert Westkämper (Hrsg.): *Digitale Produktion*  
Berlin Heidelberg: Springer, S.107–133.  
ISBN 9781306159456
- Liker 2006** Liker, Jeffrey K. 2006.  
*Der Toyota-Weg: 14 Managementprinzipien des weltweit  
erfolgreichsten Automobilkonzerns.*  
1. Aufl.  
München : FinanzBuch-Verl.  
Financial Times Deutschland.  
ISBN 3-89879-188-2
- Loferer 2002** Loferer, Michael. 2002.  
*Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen.*  
München : Herbert-Utz-Verl.  
Techn. Univ., Diss., München 2001  
ISBN 3-8316-0188-6
- Lotter et al. 2002** Lotter, Bruno, Spath, Dieter & Baumgartner, Peter. 2002.  
*Primär-Sekundär-Analyse: Kundennutzenmessung und  
Kundennutzenorientierung im Unternehmen ; mit zahlreichen  
Tabellen und Formblättern.*  
Renningen : expert-Verl.  
ISBN 3816920713
- Lotter et al. 2012** Lotter, Bruno & Wiendahl, Hans-Peter. 2012.  
*Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die  
Praxis.*  
2. Aufl.  
Berlin Heidelberg : Springer.  
ISBN 978-3-642-29061-9.  
Verfügbar: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9>
- Luczak et al. 2004** Luczak, Holger & Stich, Volker. 2004.  
*Betriebsorganisation im Unternehmen der Zukunft.*  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 9783642620492.
- Matevska 2010** Matevska, Jasminka. 2010.  
*Rekonfiguration komponentenbasierter Softwaresysteme zur  
Laufzeit.*  
1. Aufl.  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner (GWV).  
Software Engineering Research.  
ISBN 3834810010.
- Meinberg et al. 1995** Meinberg, Uwe & Topolewski, Frank. 1995.  
*Lexikon der Fertigungsleittechnik: Begriffe, Erläuterungen,*

- Beispiele.*  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
ISBN 9783642793264.
- Meran et al. 2013**  
Meran, Renata, John, Alexander, Staudter, Christian & Roenpage, Olin. op. 2013.  
*Six Sigma + Lean Toolset: Mindset zur erfolgreichen Umsetzung von Verbesserungsprojekten.*  
4., vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl.  
Heidelberg: Springer.  
ISBN 3642399452
- Mochty 1996**  
Mochty, Ludwig. 1996.  
Lernen in der industriellen Produktion.  
In: Kern, Werner (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft.*  
2., völlig neu gestaltete Aufl.  
Stuttgart : Schäffer-Poeschel.  
ISBN 3-7910-8044-X
- Motzer 2015**  
Motzer, David. 2015.  
*Strukturalternative für die Aggregateaufrüstung einer automobilen Fertigung*  
Wiesbaden: Springer  
ISBN 9783658088040
- Nieß 1996**  
Nieß, Peter S. 1996.  
*Operatives Produktionsmanagement: 33 Kurzfallstudien mit ausführlichen Lösungen.*  
Wiesbaden : Gabler Verlag.  
ISBN 9783409121590.
- Nyhuis 2010**  
Nyhuis, Peter. 2010.  
*Wandlungsfähige Produktionssysteme.*  
Berlin : GITO Verl.  
ISBN 978-3-940083-15-4
- Ohno 1993**  
Ohno, Tai-ichi. 1993.  
*Das Toyota-Produktionssystem.*  
Frankfurt/Main, New York : Campus-Verl.  
ISBN 3593349469
- Papendieck 2011**  
Papendieck, Axel J. 2011.  
*Praktische Organisation.*  
Berlin : BWV Berliner Wissenschafts-Verlag.  
ISBN 9783830525677.
- Pawellek 2014**  
Pawellek, Günther. 2014.  
*Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung.*  
2. Aufl. 2014.  
Berlin : Springer Vieweg.  
VDI-Buch.  
ISBN 9783662437278.
- Petersen 2005**  
Petersen, Ties. 2005.  
*Organisationsformen der Montage: theoretische Grundlagen, Organisationsprinzipien und Gestaltungsansatz.*



Aachen : Shaker.  
Schriftenreihe des Instituts für Produktionswirtschaft Rostock.  
ISBN 3832242082

**Petzelt 2010**

Petzelt, Dominik. 2010.  
*Konzept zur rechnerunterstützten Bestimmung von Sollzeiten in der Montageplanung.*  
Aachen : Shaker.  
Schriftenreihe industrial engineering; Bd. 5.  
ISBN 3832296409

**Pfohl 1996**

Pfohl, Hans-Christian. 1996.  
*Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen.*  
Fünfte, neuarbeitete und erweiterte Auflage.  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen.  
ISBN 9783540603146.

**Pfohl et al. 1994**

Pfohl, Hans-Christian & Aberle, Gerd. 1994.  
*Management der Logistikkette: Kostensenkung, Leistungssteigerung, Erfolgspotential : 9. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Logistik e.V., 3. Mai 1994, Darmstadt.*  
Berlin : Schmidt.  
ISBN 3503036091

**Picker 2006**

Picker, Christoph. 2006.  
*Prospektive Zeitbestimmung für nicht wertschöpfende Montagetätigkeiten : Dortmund, Techn. Univ. Diss., 2006.*  
zuletzt zugegriffen am 21.01.2017  
<http://eldorado.tu-dortmund.de:8080/bitstream/2003/24629/1/Dissertation.pdf>

**Pomberger 2008**

Pomberger, Gustav & Dobler, Heinz. 2008.  
*Algorithmen und Datenstrukturen.*  
München : Pearson-Studium.  
ISBN: 97838273732680

**Preißler 2008**

Preißler, Peter. 2008.  
*Betriebswirtschaftliche Kennzahlen.*  
München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.  
ISBN 978-3-486-23888-4

**Rabe et al. 2008**

Rabe, Markus, Spieckermann, Sven & Wenzel, Sigrid.  
*Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik.*  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
ISBN 978-3-540-35282-2

**REFA 1985a**

REFA Bundesverband e.V. 1985.  
*Kostenrechnung, Arbeitsgestaltung.*  
7. Aufl., 202. - 271. Tsd.  
München : Hanser.  
Methodenlehre des Arbeitsstudiums; / REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. ; Teil 3.  
ISBN 3446142363

**REFA 1985b**

REFA Bundesverband e.V. 1985.  
*Methodenlehre der Planung und Steuerung.*

4. Aufl.  
München : Hanser  
ISBN: 978-3-446-14248-0
- REFA 2002**  
REFA Bundesverband e.V. 2002.  
*Ausgewählte Methoden zur prozessorientierten  
Arbeitsorganisation: REFA-Modulkonzept für Kooperationen in  
der Aus- und Weiterbildung ; REFA-Sonderdruck Methodenteil.*  
Sonderdruck.  
Darmstadt : REFA
- Röhrig 2002**  
Röhrig, Martin. 2002.  
*Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionsendstufen :*  
Univ., Diss. Hannover, 2002.  
Düsseldorf : VDI-Verl.  
Fortschritt-Berichte / VDI Reihe 2, Fertigungstechnik; 622.  
ISBN 3183622025
- Rother et al. 2000**  
Rother, Mike & Shook, John. 2000.  
*Sehen lernen: Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen  
und Verschwendung beseitigen.*  
Dt. Ausg., Version 1.0.  
Stuttgart : LOGX.  
ISBN 393229811X
- Rother et al. 2004**  
Rother, Mike & Shook, John. 2004.  
*Sehen lernen: Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen  
und Verschwendung beseitigen.*  
Deutsche Ausg., Version 1.1.  
Aachen : Lean Management Institut.  
ISBN 3-9809521-1-8
- Schenk et al. 2014**  
Schenk, Michael, Wirth, Siegfried & Müller, Egon. 2014.  
*Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die  
wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik.*  
2., vollst. überarb. und erw. Aufl.  
Berlin : Springer Vieweg.  
VDI-Buch.  
ISBN 9783642054587.
- Scherm et al. 2007**  
Scherm, Ewald & Pietsch, Gotthard. 2007.  
*Organisation: Theorie, Gestaltung, Wandel.*  
1. Aufl.  
München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.  
ISBN 9783486583335.
- Schlenkhoff 2012**  
Schlenkhoff, Andreas. 2012.  
*Duden Ratgeber - Technische Dokumentation: Verständliche  
Texte für Produkte erstellen und gestalten.*  
1., Aufl.  
Mannheim : Bibliographisches Institut.  
ISBN 3411747218
- Schlick 2012**  
Schlick, Christopher M. 2012.  
*Einführung in die Arbeitswissenschaft: Modellierung und  
Optimierung manueller Arbeitsprozesse mit MTM.*  
Aachen,

zuletzt geprüft am 3. August 2015.

Verfügbar: [http://www.iaw.rwth-aachen.de/files/awi\\_le05\\_ss2012\\_folien+notizen.pdf](http://www.iaw.rwth-aachen.de/files/awi_le05_ss2012_folien+notizen.pdf)

**Schmidt 1992**

Schmidt, Maximilian. 1992.  
*Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme.*  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
iwb Forschungsberichte, Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München; 41.  
ISBN 9783540550259.

**Schmigalla 1995**

Schmigalla, Hans. 1995.  
*Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge.*  
1. Aufl.  
München, Wien : Hanser.  
REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation.  
ISBN 9783446185722

**Slama 2004**

Slama, Stefan. 2004.  
Planungsleitfaden zur Auslegung hybrider Montagesysteme.  
In: Feldmann, Klaus (Hrsg.): *Montage strategisch ausrichten - Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen.*  
Berlin, u.a. : Springer.  
ISBN 3-540-40304-3

**Soder 2006**

Soder, Johann. 2006.  
*Das ganzheitliche SEW-Wertschöpfungssystem: Ein Optimierungssystem für effiziente Unternehmensstrukturen.*  
Heilbronn,  
zuletzt geprüft am 1. September 2014.  
Verfügbar:  
[http://www.heilbronn.ihk.de/ximages/1390229\\_8830\\_3340.pdf](http://www.heilbronn.ihk.de/ximages/1390229_8830_3340.pdf)

**Springer 2013**

Springer Fachmedien Wiesbaden. 2013.  
*222 Keywords Logistik: Grundwissen für Fach- und Führungskräfte.*  
Wiesbaden : Springer Fachmedien.  
ISBN 978-3-658-03392-7.  
Verfügbar: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-03392-7>

**Takeda 2006**

Takeda, Hitoshi. 2006.  
*Das synchrone Produktionssystem: Just-in-time für das ganze Unternehmen.*  
5., aktualisierte Aufl.  
Landsberg am Lech : mi-Fachverlag.  
ISBN 3-636-03077-9

**Takeda et al. 2008**

Takeda, Hitoshi & Meynert, Andreas. 2008.  
*Das System der Mixed Production: Personal-Order-Prinzip für kundenorientierte Produktion.*  
2. Aufl.  
München : mi-Fachverl.  
ISBN 3636031171.

- Tautrim 2015** Tautrim, Jörg. 2015.  
*Lean Production: Taschenbuch/Leitfaden: Wesentliche Konzepte und Werkzeuge für mehr Effizienz in der Produktion.*  
2. Aufl.  
Berlin : epubli GmbH.  
ISBN 3844288597
- Teufel 2009** Teufel, Peter. 2009.  
Der Prozess der ständigen Verbesserung (Kaizen) und dessen Einführung.  
In: Bullinger, Hans-Jörg, et al. (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation.*  
Berlin, Heidelberg : Springer, S. 676–696.  
ISBN 3540875956
- Töpfer 2005** Töpfer, Armin. 2005.  
*Betriebswirtschaftslehre: Anwendungs- und prozessorientierte Grundlagen.*  
Berlin, u.a. : Springer.  
ISBN 3540270752
- Trautsch 2012** Trautsch, Stefan. 2012.  
*Konzeption eines Planungsverfahrens zur verschwendungsminimalen Strukturierung von Montage-Logistik-Systemen* : Diplomarbeit.  
Magdeburg: Otto-von-Güricke-Universität
- Vahrenkamp 2008** Vahrenkamp, Richard. 2008.  
*Produktionsmanagement.*  
6., überarb. Aufl.  
München : Oldenburg.  
ISBN 978-3-486-58784-5
- VDI 2860** VDI - Verein deutscher Ingenieure. 1990.  
*VDI 2860 Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.*  
Berlin : Beuth
- VDI 3423** VDI - Verein deutscher Ingenieure. 2011.  
*Richtlinie VDI 3423 "Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen - Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung"*
- VDI 3633-1** Verein Deutscher Ingenieure. 2014.  
*Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen.*  
Berlin : Beuth
- Vollmer 2009** Vollmer, Lars. 2009.  
Schnelle und wirksame Verbesserungen des gesamten Wertschöpfungsprozesses mit Wertstromdesign.  
In: Töpfer, Armin (Hrsg.): *Lean Six Sigma.*  
Berlin, Heidelberg : Springer, p. 137.  
ISBN 9783540850595
- Warnecke 1990** Warnecke, Hans-Jürgen. 1990.  
*Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure.*  
2., überarb. Aufl.

München, Wien : Hanser.  
Hanser-Studienbücher.  
ISBN 3446159630

**Westkämper et al. 2001**

Westkämper, Engelbert, Bullinger, Hans-Jörg, Horváth, Péter & Zahn, Erich. 2001.  
*Montageplanung - effizient und marktgerecht.*  
Berlin, Heidelberg : Springer.  
VDI-Buch.  
ISBN 9783642630729.

**Westkämper 2006**

Westkämper, Engelbert. 2006.  
*Einführung in die Organisation der Produktion.*  
Berlin Heidelberg : Springer-Verlag.  
Springer-Lehrbuch.  
ISBN 9783540307648.

**Westkämper 2009**

Westkämper, Engelbert. 2009.  
Methoden der digitalen Planung.  
In: Bullinger, Hans-Jörg, et al. (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation.*  
Berlin, Heidelberg : Springer, S. 515–567.  
ISBN 3540875956

**Westkämper et al. 2009**

Westkämper, Engelbert & Zahn, Erich. 2009.  
*Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell.*  
Berlin Heidelberg : Springer-Verlag.  
ISBN 9783540688907.

**Westkämper et al. 2013**

Westkämper, Engelbert, Spath, Dieter & Constantinescu, Carmen. 2013.  
*Digitale Produktion.*  
Berlin Heidelberg : Springer.  
ISBN 978-3-642-20259-9.

**Wiendahl 2014**

Wiendahl, Hans-Peter. 2014.  
*Betriebsorganisation für Ingenieure.*  
8. überarb. Auflage  
München : Hanser.  
ISBN 9783446440531

**Wiendahl et al. 2014**

Wiendahl, Hans-Peter, Reichardt, Jürgen & Nyhuis, Peter. 2014.  
*Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten.*  
2., überarb. u. erw. Aufl.  
München, Wien : Hanser.  
ISBN 3-446-43892-0

**Womack et al. 2004**

Womack, James P. & Jones, Daniel T. 2004.  
*Lean thinking: Ballast abwerfen, Unternehmensgewinne steigern.*  
Erw. und aktualisierte Neuauflage.  
Frankfurt am Main, New York : Campus-Verl.  
Management.  
ISBN 9783593375618

**Yagyu et al. 2011**

Yagyu, Shunji & Klages, Carsten. 2011.  
*Das synchrone Managementsystem: Wegweiser zur*

*Neugestaltung der Produktion auf Grundlage des synchronen Produktionssystems.*

2. Aufl.

München : mi-Wirtschaftsbuch.

ISBN 9783636030672.

**Zeile 1995**

Zeile, Ulrich. 1995.

*Montagestrukturplanung für variantenreiche Serienprodukte.*

Berlin, Heidelberg: Springer.

IPA-IAO-Forschung und -Praxis; Bd. 207.

ISBN 9783540589372

**ZEW 2002**

ZEW. 2002.

*Unternehmensproduktivität: Lean Management ist effektiver als Mitarbeiterbeteiligung.*

Mannheim,

zuletzt geprüft am 2. September 2014.

Verfügbar:

<http://www.zew.de/de/presse/pressearchiv/unternehmensproduktivitaet-lean-management-ist-effektiver-als-mitarbeiterbeteiligung/>

**Zollondz 2013**

Zollondz, Hans-Dieter. 2013.

*Grundlagen Lean Management: Einführung in Geschichte, Begriffe, Modelle, Techniken sowie Implementierungs- und Gestaltungsansätze eines modernen Managementparadigmas.*

München : Oldenbourg.

Edition Management.

ISBN 3486779044

## Anhang A: produktspezifische Fügevorgänge Typ A

ID	Name Fügevorgang
1	Teil 1 und Teil 2 fügen
2	Teil 3 und Teil 4 in Teil 5 pressen
3	Teile 6 in Teil 7 pressen
4	Teil 9, Teil 1 & Teil 6 fügen
5	Teil 10 in Teil 11 fügen & verschrauben
6	Teil 9, Teil 1 & Teil 6 fügen
7	Teil 6 und Teil 11 verschrauben
8	Funktionsbaugruppe 1 fügen
9	Teil 18 in Teil 19 fügen
10	Teil 21 montieren
11	Teil 11 in Teil 19-Baugruppe fügen
12	Baugruppe fetten
13	Teil 22 vormontieren
14	Teil22-BG montieren
15	Teil 28 montieren
16	Teil 15 montieren
17	Teil 31 auf Teil 11 & 5x verschrauben
18	Teil 33 montieren
19	Teil 37 montieren
20	Teil 38 fügen
21	Teil 39 montieren
22	Teile 40 montieren
23	Teil 41 vormontieren
24	Teil 45 fetten/montieren
25	Teil 46 fügen
26	Teil 41-Baugruppe montieren
27	Teil 47 montieren
28	Kabel verlegen
29	Teil 48 montieren
30	Teil 50 fügen
31	Litzen verlegen
32	Teil 54 montieren
33	Teil 56 montieren
34	Teil 19-BG & Teil 22-BG verschrauben
35	Teil 59 verschrauben
36	Teil 61 verschrauben
37	Teil 63 und 64 montieren
38	WS in Teil 66 fügen
39	Teil 68 rechts montieren
40	Baugruppe arretieren
41	Teil 71 links montieren
42	Teile 68 und 71 festschrauben
43	Teil 33 demontieren
44	Teil 74 montieren
45	Teil 75 und 76 in WS verschrauben
46	Teil 78 fügen
47	Teil 79 kleben & scannen
48	Teil 80 befüllen

## Anhang B: Auszug produktspezifischer Teilverrichtungen Typ A

FV Nr.	TV Nr.	produktspezifische Teilverrichtungen Typ A	Sollzeiten	Automatisierungsstufe
3	1	Teil 7 in Vorr. fügen	1,2	manuell
3	2	Teil 6 einlegen	1,5	manuell
3	3	zweites Teil 7 in Vorr. Fügen	1	manuell
3	4	Teil 8 in Vorrichtung fügen	2	manuell
3	5	Teil 6 entnehmen	1,4	manuell
3	6	Startknopf drücken	0,8	manuell
3	7	Einpressen	5	automatisiert
4	8	Teil 6 umsetzen	3,5	manuell
4	9	Teil 1 in Teil 6 fügen	2,3	manuell
4	10	Teil 9 und 1 fügen	1,1	manuell
4	11	Einpreßvorgang starten	1	manuell
4	12	Verpressen	5	automatisiert
1	13	Teil 21 in Aufnahme fügen	1,2	manuell
1	14	Teil 1 und Teil 21 fügen	2,3	manuell
2	15	Teil 3 in Aufnahme fügen	1,1	manuell
2	16	Teil 4 in Aufnahme fügen	1,1	manuell
2	17	Verpressen	5	automatisiert
2	18	Baugruppe entnehmen	1,4	manuell
5	19	Teil 10 in Teil 11 fügen und 2x verschrauben	7	teilautomatisiert
6	20	Teil 11 in Aufnahme fügen	3,5	manuell
6	21	Teil 6 fügen	1,1	manuell
6	22	Position mit Teil 12 fixieren	1,2	manuell
6	23	Teil 12 fügen	2,2	manuell
8	24	Teil 15 und 17 fügen	3,5	manuell
8	25	Teil 16 in Teil 17 stecken	2,3	manuell
8	26	Baugruppe in Teil 6 fügen	3,5	manuell
7	27	2x Teil 14 einlegen	3	manuell
7	28	BG in Station einlegen und Start drücken	2,3	manuell
7	29	Automatisches Schrauben	6	automatisiert
9	30	Teil 19 fügen	4,6	manuell
9	31	Teil 18 mit 2 Schrauben bestücken	4,1	manuell
9	32	Teil 18 in Vorrichtung fügen	3,6	manuell
9	33	autom. verschrauben	6	automatisiert
10	34	Teil 21 einlegen	8,2	manuell
11	35	Teil 11-BG in Teil 19 fügen	3,5	manuell
17	36	Teil 10 an Teil 11 fügen	4,6	manuell
17	37	Teil 14 einschrauben	7	automatisiert
12	38	BG fetten	3,1	manuell
13	39	Teil 22 in Aufnahme fügen	2,3	manuell
13	40	Teil 23 auf Teil 24 ziehen	2,3	manuell
13	41	auf Teil 22 setzen	1,4	manuell
13	42	Teil 24 in Aufnahme einsetzen	2,3	manuell
13	43	Teil 25 auf Teil 24 fügen	2,8	manuell



Die anhaltende Globalisierung sowie der Wandel vom Anbieter- zum Käufermarkt erzeugen bei Unternehmen extreme Wettbewerbssituationen. Im Bestreben nach maximaler Wirtschaftlichkeit und Effizienz ist im Besonderen die Montage mit ihren personal- und investitionsintensiven Prozessen von großer Bedeutung.

Das historisch bewährte und global etablierte Toyota-Produktionssystem bietet Lösungen zur Gestaltung effizienter Montagesysteme, fokussiert jedoch die kontinuierliche Verbesserung im Betrieb. Für die vorserielle Planung sind dagegen kaum Anstze zur Reduzierung von Verschwendung vorhanden, wodurch Kostensenkungspotenziale besonders bei den mit hoher Stückzahl betriebenen getakteten Fließmontagen nicht erschlossen werden.

Deshalb wird in dieser Arbeit ein Verfahren zur Planung verschwendungsarmer getakteter Fließmontagen entwickelt. Es beinhaltet Kennzahlen zur Quantifizierung und Algorithmen zur Kostenermittlung aller 7 Verschwendungsarten, wodurch bereits während der Planung die Lokalisierung und Reduzierung von Verschwendung ermöglicht wird.

