

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher
Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus**

Markus Hubert Pröpster

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Dombrowski,
Technische Universität Braunschweig

Die Dissertation wurde am 18.06.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 23.10.2015 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München im Rahmen des Forschungsprojektes „Dynamischer Austaktungsprozess im Nutzfahrzeugbau“ bei der MAN Truck & Bus AG.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Dombrowski, dem Leiter des Instituts für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung der Technischen Universität Braunschweig, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates bedanken.

Weiter hervorheben möchte ich die Partner meines Forschungsprojekts bei der MAN Truck & Bus AG in München. Meinem Mentor Dr.-Ing. Matthias Meindl sowie Stefan Röser, Jens Acker, Dr.-Ing. Christoph Rimpau, Dr.-Ing. Nicolaos Michalakis und Robert Libera danke ich für die tiefen Diskussionen, das richtige Maß an Freiraum und die Möglichkeit, meine Ergebnisse in der Praxis anwenden und umsetzen zu dürfen. Weiter gilt Dr.-Ing. Lothar März mein Dank für die enge Zusammenarbeit im Projekt „PePe“, die diese Dissertation mitgeprägt hat, sowie für seine Anmerkungen zu der vorliegenden Arbeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich recht herzlich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des *iwb* und bei MAN, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit begleitet haben. Besonders erwähnen möchte ich Dr.-Ing. Matthias Glonegger, Jan-Fabian Meis und Jörg Pause, die meine Arbeit kritisch durchgelesen und durch ihre konstruktiven Ratschläge wertvolle Verbesserungsansätze gegeben haben. Lena Egger und Nicolas Schäfer möchte ich für die vielen Stunden der gemeinsamen Workshop-Arbeit bei MAN danken, in denen die Inhalte dieser Dissertation geschärft wurden. Des Weiteren gilt mein Dank allen Studierenden, die mich im Rahmen von Praktika und Studienarbeiten unterstützt und wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Familie. Ohne meine Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und mich immer uneingeschränkt unterstützt haben, wäre diese Arbeit nie entstanden. Und nur dank meiner Frau Claudia, die mir stets die erforderlichen Freiräume und auch den notwendigen Antrieb gegeben hat, konnte ich diese Arbeit erfolgreich abschließen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Symbolverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Theoretischer Hintergrund.....	7
2.1 Kapitelüberblick.....	7
2.2 Getaktete Montage variantenreicher Produkte.....	7
2.2.1 Begriffsdefinition: Produktion und Montage	7
2.2.2 Organisationsformen der Montage	8
2.2.3 Varianten in der taktgebundenen Montage	10
2.3 Planung variantenreicher Montagelinien	14
2.3.1 Überblick zur Planung variantenreicher Montagelinien	14
2.3.2 Austaktung variantenreicher Montagelinien	18
2.3.3 Personaleinsatzplanung zum flexiblen Umgang mit Varianten	31
2.3.4 Reihenfolgeplanung.....	38
2.4 Auswirkungen von Nachfrageschwankungen auf variantenreiche Montagelinien	41
2.4.1 Überblick	41

2.4.2	Auswirkungen von Variantenmixschwankungen	43
2.4.3	Auswirkungen von Stückzahlschwankungen.....	43
2.5	Herausforderungen der Austaktung in der Nutzfahrzeugmontage	45
2.6	Zusammenfassung und Fazit	48
3	Stand der Forschung	51
3.1	Kapitelüberblick.....	51
3.2	Betrachtungsrahmen	51
3.3	Ansätze zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien ...	54
3.4	Zusammenfassende Bewertung der Ansätze	58
3.5	Ableitung des Handlungsbedarfs	61
4	Konzept der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung	63
4.1	Kapitelüberblick.....	63
4.2	Anforderungen an die Methodik.....	63
4.3	Kerninhalte der Methodik.....	65
4.3.1	Überblick.....	65
4.3.2	Berücksichtigung von Stückzahlschwankungen durch Taktzeitszenarien.....	67
4.3.3	Berücksichtigung von Schwankungen im Variantenmix durch variantenabhängige Austaktung	70
4.3.4	Beherrschung der Komplexität durch Simulation des flexiblen Mitarbeiterverhaltens	72
4.4	Gesamtablauf der Methodik.....	74

5	Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung.....	77
5.1	Kapitelüberblick.....	77
5.2	Bestimmung von Taktzeitszenarien	77
5.2.1	Überblick	77
5.2.2	Bestimmung der realisierbaren Taktzeitvielfachen.....	79
5.2.3	Ermittlung der resultierenden Taktzeiten	82
5.3	Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien.....	90
5.3.1	Überblick	90
5.3.2	Festlegung der Planungsprämissen Taktzeit und Arbeitsinhalte.....	92
5.3.3	Basisplanung der Austaktung	96
5.3.4	Feinplanung der Anpassungsbedarfe.....	104
5.4	Simulation des flexiblen Mitarbeiterereinsatzes	110
5.4.1	Überblick und Diskussion vorhandener Simulationswerkzeuge....	110
5.4.2	Aufbau des Simulationsmodells von PePe	112
5.4.3	Vorgehen zur simulativen Validierung der Planungsergebnisse....	115
5.5	Bewertung der Austaktungsszenarien und Überwachung im laufenden Betrieb	122
5.5.1	Überblick	122
5.5.2	Kennzahlensystem zur Bewertung von Austaktungsszenarien	122
5.5.3	Anwendung des Kennzahlensystems zur Überwachung der Montagelinie.....	130
6	Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage.....	135
6.1	Kapitelüberblick.....	135
6.2	Ausgangssituation beim Anwender	135

Inhaltsverzeichnis

6.2.1	Ablauf der LKW-Montage	135
6.2.2	Ausgangssituation Bandkonfiguration und Anwendungsrahmen..	136
6.3	Anwendung der Methodik	139
6.3.1	Bestimmung der Taktzeitszenarien	139
6.3.2	Planung der Austaktung	143
6.3.3	Simulation der Planungsergebnisse.....	148
6.3.4	Bewertung der Planungsergebnisse.....	151
6.4	Kritische Bewertung der Methodik	157
6.4.1	Überblick.....	157
6.4.2	Erfüllung der gestellten Anforderungen.....	158
6.4.3	Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen	161
7	Zusammenfassung und Ausblick	165
7.1	Zusammenfassung	165
7.2	Ausblick	167
8	Literaturverzeichnis	169
9	Anhang.....	189
9.1	Betreute Studienarbeiten.....	189
9.2	Taktzeitvielfache und Stückzahländerungen in Abhängigkeit der Werkerdichte.....	191
9.3	Bestimmung der Taktzeitszenarien des Anwendungsbeispiels unter der Annahme einer Greenfieldplanung.....	192
9.4	Simulationsergebnisse des Anwendungsbeispiels.....	193
9.5	Detailbetrachtung der Kennzahlen des Anwendungsbeispiels	198

Abkürzungsverzeichnis

Hinweis: Im Duden (SCHOLZE-STUBENRECHT 2013) enthaltene Abkürzungen werden nicht explizit erläutert.

Abkürzung	Beschreibung
ALBP	Assembly Line Balancing Problem
APACHE	<u>A</u> lgorithmus zur Erstellung <u>p</u> raxisorientierter <u>B</u> and <u>a</u> ngleiche
AV	Arbeitsvorbereitung
AVO	Arbeitsvorgang
CIRP	Internationale Akademie für Produktionstechnik (frz.: <u>C</u> ollege <u>I</u> nternational pour la <u>R</u> echerche en <u>P</u> roductique)
CKD	Completely Knocked Down
DIN	Deutsches Institut für Normung
Diss.	Dissertation
ERP	Enterprise Resource Planning
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
GALBP	General Assembly Line Balancing Problem
H	Hauptregel der Austaktungsmethodik
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
MA	Mitarbeiter
MTB	MAN Truck & Bus AG
MTM	Methods-Time Measurement
N	Nebenregel der Austaktungsmethodik

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
PePe	Simulationswerkzeug zur <u>P</u> erlenkettenbeherrschung und <u>P</u> ersonaleinsatzplanung
Per.	Periode
PT	Personentage
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (früher: <u>R</u> eichsausschuß <u>f</u> ür <u>A</u> rbeitszeitermittlung)
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SALBP	Simple Assembly Line Balancing Problem
SAP	Standardarbeitsplatz bzw. -arbeitsplätze
SLX	Simulation Language with Extensibility
Stk.	Stück
SvZ	Systeme vorbestimmter Zeiten
TF	Teilefamilie
TU	Technische Universität
TUM	Technische Universität München
Var	Variante
VAP	Variantenarbeitsplatz bzw. -arbeitsplätze
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Wo	Woche
wt	Werkstattstechnik
XOR	Entweder-/ Oder (-Arbeitsinhalte)

Abkürzung	Beschreibung
ZWF	Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb
α	Charakterisierung der Vorrangbeziehungen der Tupelnotation des GALBP
β	Charakterisierung der Eigenschaften der Stationen und Montagelinie der Tupelnotation des GALBP
γ	Charakterisierung der Zielsetzungen der Tupelnotation des GALBP

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
a_{\emptyset}	%	Durchschnittliche Auslastung
$a_{\emptyset AP}$	%	Durchschnittliche Auslastung der Arbeitsplätze
$a_{\emptyset Sp}$	%	Durchschnittliche Auslastung der Springer
$a_{\emptyset W}$	%	Durchschnittliche Auslastung der Werker
b	-	Laufvariable für Bauteile
B	-	Anzahl Bauteile einer Teilefamilie
D_p	%	Driftpotential
i	-	Laufvariable für Werkerdichtekombinationen
I	-	Anzahl an Werkerdichtekombinationen
j	-	Laufvariable für Taktzeitvielfache
J	-	Anzahl an Taktzeitvielfachen
k	-	Laufvariable für Stationen bzw. Mitarbeitergruppen
K	-	Anzahl an Stationen bzw. Mitarbeitergruppen
$k_{MN,akt}$	€	Aktivierungskosten der Kapazitätsanpassung
$k_{MN,lauf}$	€	Laufende Kosten der Kapazitätsanpassung

Symbol	Einheit	Bedeutung
ΔKAP	%	Kapazitätsänderung einer Maßnahme
KAP_g	h/Periode	Grundkapazität der Montagelinie (=Arbeitsstunden pro Zeitperiode)
l	-	Laufvariable für Fahrzeuge
L	-	Anzahl an Fahrzeugen
m	-	Laufvariable für Kapazitätsanpassungsmaßnahmen
M	-	Anzahl an Kapazitätsanpassungsmaßnahmen
n	-	Laufvariable für Bauteile innerhalb einer Teilefamilie
N_{Sp}	-	Anzahl Springer
N_W	-	Anzahl Werker
NA_p	%	potentielle Nacharbeitsmöglichkeiten
q_D	%	Driftquote
q_{Sp}	%	Springerquote
q_{St}	%	Standardisierungsquote
q_w	%	Quote der einheitlichen Werkerdichte
s	Stk./Per.	Stückzahl pro Periode
Δs_{abs}	Stk./Per.	absolute Mengenflexibilität pro Periode

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
s_{g,t_t}	Stk./Per.	Grundstückzahl bei der Taktzeit t_t ohne zusätzliche Kapazitätsanpassungsmaßnahmen pro Periode
$s_{ges,akt}$	Stk./Per.	aktuelle Gesamtstückzahl pro Periode
$s_{ges,max}$	Stk./Per.	Maximale Stückzahl des prognostizierten Stückzahlkorridors pro Periode
$s_{ges,min}$	Stk./Per.	Minimale Stückzahl des prognostizierten Stückzahlkorridors pro Periode
$s_{ges,ml}$	Stk./Per.	Stückzahl mit der am höchsten prognostizierten Eintrittswahrscheinlichkeit (engl.: most likely) pro Periode
$\Delta s_{rel,t_t}$	Stk./Per.	relative Stückzahlflexibilität der Taktzeit t_t
s_{max,t_t}	Stk./Per.	Maximal mögliche Stückzahl bei der Taktzeit t_t unter Ausnutzung aller zusätzlichen Kapazitätserhöhungsmaßnahmen
s_{min,t_t}	Stk./Per.	Minimal mögliche Stückzahl pro Periode bei der Taktzeit t_t unter Ausnutzung aller zusätzlichen Kapazitätssenkungsmaßnahmen
t_+	s	Schrittgröße zur Erhöhung der Basistaktzeit
t_{akt}	d	Aktivierungszeit einer Kapazitätsanpassungsmaßnahme
t_d	s	Driftzeit
$t_{ND,max}$	d	Maximale Nutzungsdauer einer Kapazitätsanpassungsmaßnahme
$t_{ND,min}$	d	Minimale Nutzungsdauer einer Kapazitätsanpassungsmaßnahme
t_s	s	Stationszeit

Symbol	Einheit	Bedeutung
t_{sp}	s	Springereinsatzzeit
t_t	s	Taktzeit
$t_{t,akt}$	s	aktuelle Taktzeit
$t_{t,max}$	s	maximal realisierbare Taktzeit
$t_{t,min}$	s	minimal realisierbare Taktzeit
t_{tb}	s	Basistaktzeit
t_{tg}	s	Grundtaktzeit
t_v	s	Vorgabezeit einer AVO
$t_{v\emptyset}$	s	durchschnittliche Vorgabezeit
$t_{v,max}$	s	maximale Vorgabezeit
$t_{v,min}$	s	minimale Vorgabezeit
t_z	-	Zeitpunkt z
ΔV_l	%	Veränderter Anteil leichter Varianten oder Derivate
V_l	%	Anteil leichter Varianten oder Derivate
ΔV_m	%	Veränderter Anteil mittlerer Varianten oder Derivate
V_m	%	Anteil mittlerer Varianten oder Derivate

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
$v_{q,TF}$	%	Verbauquote der Teilefamilie TF
$v_{r,b}$	%	Verbaurrate des Bauteils b der Teilefamilie TF
ΔV_s	%	Veränderter Anteil schwerer Varianten oder Derivate
V_s	%	Anteil schwerer Varianten oder Derivate
VA_p	%	potentielle Vorarbeitsmöglichkeiten
ΔVM	(%,%,%)	Variantenmixänderung
VM	(%,%,%)	Variantenmix
W	-	Werkerdichtekombination
w	-	Werkerdichte (=Anzahl Werker pro Station oder Gruppe)
$w_{\emptyset,akt}$	-	aktuelle durchschnittliche Werkerdichte
w_{max}	-	maximal mögliche Werkerdichte
w_{min}	-	Minimal mögliche Werkerdichte
x	-	Taktzeitvielfache
z	-	Laufvariable für Zeit
δ	s	Zeitspreizung innerhalb einer Station oder eines Bandbereichs
$\delta_{gew,TF}$	s	gewichtete Zeitspreizung einer Teilefamilie bzgl. der minimalen Vorgabezeit der Teilefamilie

Symbol	Einheit	Bedeutung
δ_{Typ}	s	Zeitspreizung innerhalb eines Fahrzeugtyps oder -derivats

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die hohe Dynamik der globalisierten Märkte sowie der Trend von der Massenproduktion hin zur absoluten Kundenorientierung mit den Schlagworten „Mass Customization“ und „Personalization“ stellt produzierende Unternehmen vor neue Herausforderungen (ABELE ET AL. 2006, LANZA & PETERS 2012, HU 2013). Um die Kundenwünsche befriedigen zu können, wird die Variantenvielfalt bei einer gleichzeitigen Verringerung der Produktlebenszyklen massiv erhöht (MILBERG & MÖLLER 2008). Den starken Schwankungen am Markt müssen Unternehmen sowohl mit Volumen- als auch mit Variantenflexibilität begegnen (WESTKÄMPER & ROSCHER 2005). Diese Anforderung einer höheren Anpassungsfähigkeit der Produktion führt insgesamt zu einer starken Erhöhung der Komplexität in der Planung und im Betrieb (BERKHOLZ 2008, EFTHYMIU ET AL. 2012). Zum Umgang mit der zuvor genannten Dynamik des Marktes rücken somit Maßnahmen zur Beherrschung der Komplexität und Variantenflexibilität in den Fokus der betriebswissenschaftlichen Forschung (ABELE & REINHART 2011).

Gerade in Hochlohnländern wie Deutschland spielt insbesondere die Montage komplexer, variantenreicher Produkte eine besondere Rolle. Aufgabe der Montage ist es, die unterschiedlichen Teile eines Produktes zusammenzubauen, weshalb sich dieser Produktionsbereich besonders für die kostengünstige Erstellung kundenindividueller Varianten eignet (REINHART & SCHNEIDER 1996, HU ET AL. 2011). Insbesondere in der Automobilindustrie erfolgt aus wirtschaftlichen Gründen die Montage variantenreicher Produkte v. a. in getakteten Montagelinien (BOYSEN 2005). In dieser Organisationsform werden Teilmontageumfänge der Produkte an miteinander verketteten Stationen in der Losgröße 1 montiert. Nach Ablauf einer vorgegebenen Zeitspanne, der Taktzeit, werden die Produkte an die nächste Arbeitsstation weitertransportiert. Somit legt die Taktzeit zugleich den Produktionsausstoß der Montagelinie fest (MILBERG & REINHART 1996, SCHOLL 1999, BOYSEN 2005).

Der Planungsprozess zur Auslegung getakteter Montagelinien, in dem die Taktzeit bestimmt und die Arbeitsinhalte der verschiedenen Varianten den einzelnen

Stationen zugeordnet werden, wird als „Austaktung“¹ bezeichnet (ROSCHER 2007, WILLNECKER 2001, ZÄPFEL 2000). Der Hauptkomplexitätstreiber sowohl in der Austaktung als auch im Betrieb getakteter, variantenreichen Montagelinien besteht darin, dass die verschiedenen Varianten unterschiedliche Montageprozesszeiten zur Folge haben und somit keine einheitliche Auslastung der gesamten Montagelinie unabhängig von der zu montierenden Variante möglich ist (HU ET AL. 2011, SCHUH ET AL. 2011). Aus diesem Grund werden variantenreiche Montagelinien in der Praxis meist auf einen durchschnittlichen Variantenmix ausgelegt (GANS ET AL. 2011). Eine schnelle Anpassung der Bandauslegung zur Reaktion auf Nachfrageschwankungen ist aufgrund der hohen Planungskomplexität meist nicht möglich (DOMBROWSKI & MEDO 2006). Aus der festen Vorgabe der Taktzeit und der Auslegung auf einen bestimmten Variantenmix resultiert, dass getaktete Montagelinien vergleichsweise unflexibel auf Veränderungen in der nachgefragten Stückzahl und im Variantenmix reagieren können (SCHOLL 1999, KRATZSCH 2000).

Die Nutzfahrzeugbranche² ist als Teilbereich der Automobilindustrie im besonderen Maße von den zuvor dargestellten Rahmenbedingungen betroffen. Es wird eine Vielzahl an sehr unterschiedlichen Varianten angeboten, um den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und Kundenwünschen gerecht zu werden. Gleichzeitig ist aufgrund des im Vergleich zur PKW-Branche geringeren Marktvolumens die Anzahl an unterschiedlichen Varianten, die auf einer einzelnen Montagelinie zusammengefasst produziert werden, deutlich höher (WEBER & WEGGE 2004, MÄRZ ET AL. 2012B). Hinzu kommt eine sehr hohe Marktdynamik mit starken Nachfrageschwankungen (GOTTSCHALK 2006A, DEUTSCHE BANK RESEARCH 2012), weshalb insbesondere für diese Branche eine schnelle Reaktionsfähigkeit notwendig erscheint.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die hohe Individualität der Produkte und die Dynamik der Märkte fordert eine dynamische Planung der Montage sowie Empfehlungen für zukünftige Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (LANZA & PETERS 2012). Die dazu notwendige

¹ In der Literatur werden für diesen Planungsprozess teilweise unterschiedliche Begrifflichkeiten, auch mit unterschiedlichen Schwerpunkten, verwendet. Eine detaillierte Begriffsdiskussion erfolgt in Abschnitt 2.3.2.1.

² Ein Nutzfahrzeug ist ein „Kraftfahrzeug, das nach seiner Bauart und Einrichtung zum Transport von Personen, Gütern und/oder zum Ziehen von Anhängfahrzeugen bestimmt ist. Personenkraftwagen und Kraffträder sind ausgeschlossen.“ (STATISTISCHES BUNDESAMT 2010)

hohe kurzfristige³ Volumen- und Variantenflexibilität ist aus den zuvor genannten Gründen in variantenreichen getakteten Montagelinien allerdings kaum gegeben. Weitere Maßnahmen zur kurzfristigen Reaktion auf Nachfrageschwankungen sind ein flexibler Mitarbeiterereinsatz über Stationsgrenzen hinweg, eine temporäre Unterstützung durch sog. Springer sowie die Planung der Reihenfolge der eingesteuerten Varianten (ALTEMEIER 2009, WEYER 2002). Diese Maßnahmen betrachten insbesondere den Umgang mit Veränderungen im nachgefragten Variantenmix und stoßen bei starken Schwankungen und einer Vielzahl an zu berücksichtigenden Varianten, wie sie etwa im Nutzfahrzeugbau vorliegen (WEBER & WEGGE 2004), an ihre Grenzen.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieser Arbeit, durch eine kurzfristige Austaktung der Montagelinie eine weitere Maßnahme zur Reaktion auf Nachfrageschwankungen zu schaffen. Um eine schnelle Anpassungsfähigkeit zu ermöglichen, ist insbesondere der Aufwand zur Umtaktung zu reduzieren. Hierzu sind bereits bei der erstmaligen Austaktung die Auslöser für eine spätere Anpassung zu berücksichtigen: Stückzahl- und Variantenmixschwankungen. Gleichzeitig gilt es auch die zusätzlich vorhandenen Maßnahmen zur Reaktion auf Nachfrageschwankungen mit einzubeziehen, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Hierzu zählen beispielsweise die Einführung von Zusatzschichten oder die Verkürzung bzw. Verlängerung der Schichtdauer. Zusätzlich ist die Komplexität, die durch die Berücksichtigung all dieser Aspekte und durch eine hohe Variantenvielfalt entsteht, zu beherrschen. Dadurch soll nicht nur der Planungsaufwand reduziert, sondern auch gewährleistet werden, dass die erarbeiteten Ergebnisse in der industriellen Praxis anwendbar sind. Dabei sind insbesondere die Rahmenbedingung des Nutzfahrzeugbaus samt der zuvor erläuterten Herausforderungen auf die Austaktung zu berücksichtigen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist, wie in Abbildung 1 dargestellt, in sieben Kapitel aufgeteilt. Im Anschluss an diese Einleitung legt *Kapitel 2* den für die vorliegende Aufgabenstellung relevanten theoretischen Hintergrund dar. Nach der Eingrenzung der getakteten Montage variantenreicher Produkte werden die Schritte zur Planung einer variantenreichen Montagelinie genauer betrachtet und die

³ Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Zeithorizont bis zu einem Monat als kurzfristig bezeichnet. Eine Diskussion der unterschiedlichen Eingrenzungen des kurzfristigen Zeithorizonts in der Literatur erfolgt in Abschnitt 2.3.1.

1 Einleitung

Auswirkungen von Nachfrageschwankungen auf diese Montagelinien diskutiert. Abschließend werden die bei der Austaktung in der Nutzfahrzeugmontage besonders auftretenden Herausforderungen analysiert.

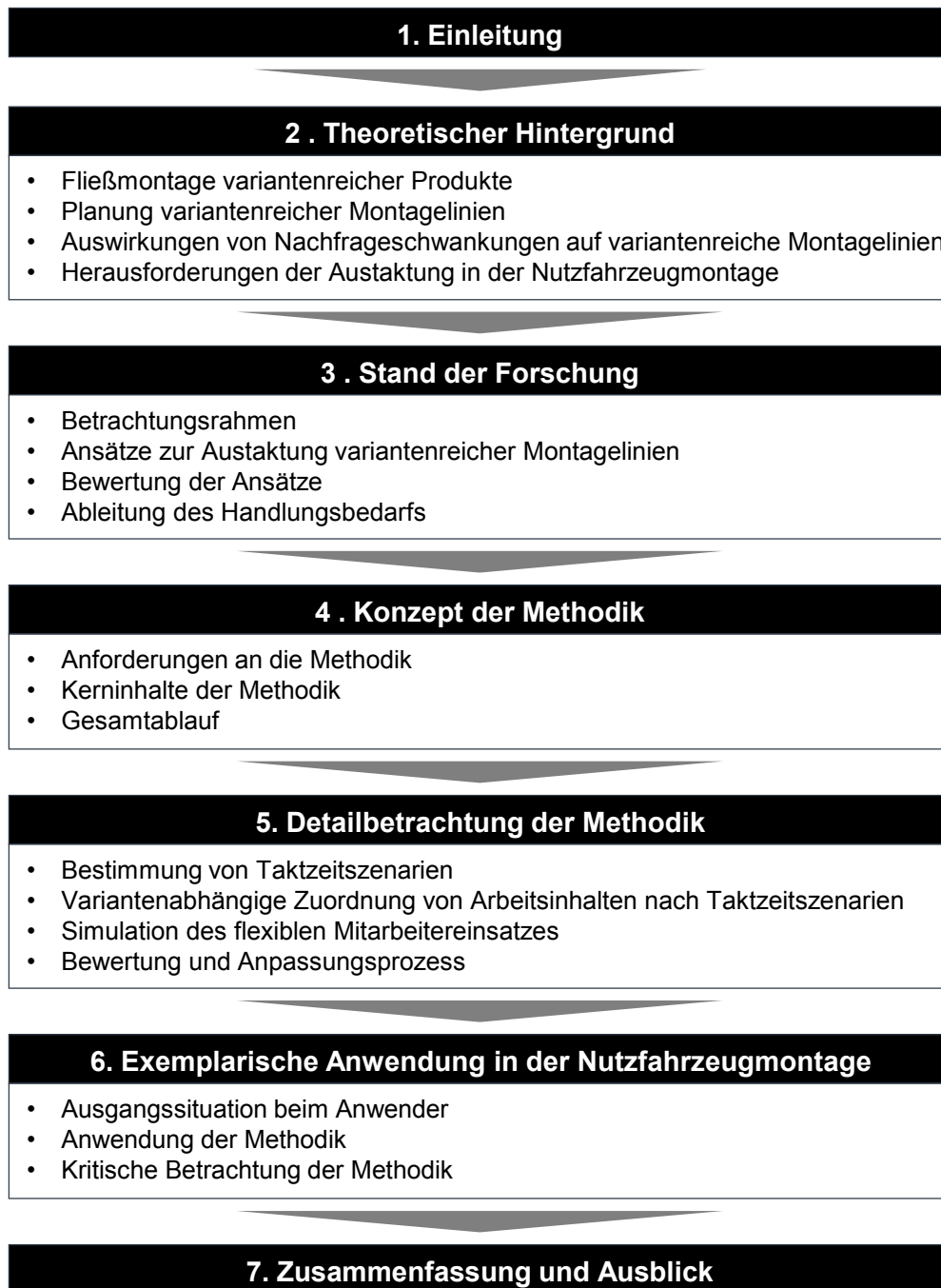


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Darauf aufbauend wird in *Kapitel 3* der Stand der Wissenschaft und Forschung genauer untersucht. Zunächst werden die im Sinne der Zielsetzung der Arbeit relevanten Bewertungskriterien hergeleitet, die den Rahmen für die weitere Dis-

kussion des Forschungsstands bilden. Anschließend werden verschiedene Ansätze der aktuellen Literatur betrachtet und anhand der zuvor aufgestellten Kriterien bewertet, um daraus den Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit herzuleiten.

Kapitel 4 stellt daraufhin das Konzept der entwickelten Austaktungsmethodik vor. Hierzu werden aus dem zuvor identifizierten Handlungsbedarf Anforderungen an die Methodik abgeleitet. Anschließend werden die Kerninhalte der Methodik, die zur Erfüllung dieser Anforderungen entwickelt wurden, alleinstehend genauer vorgestellt, bevor sie in einen gemeinsamen Planungsablauf zusammengeführt werden.

Dieser Planungsablauf in vier Schritten wird im anschließenden *Kapitel 5* im Detail erläutert. Auf eine vorbereitende Bestimmung der Eingangsgrößen der Planung folgt die eigentliche Austaktung der Linie. Die Ergebnisse der Austaktung werden mittels eines Simulationswerkzeugs validiert und mit Hilfe von Kennzahlen bewertet.

In *Kapitel 6* erfolgt die exemplarische Anwendung der Methodik am Beispiel einer Nutzfahrzeugmontage. Dazu wird vor der eigentlichen Durchführung zunächst die Ausgangssituation beim Anwender dargestellt. Die Beschreibung der Anwendung schließt mit einer kritischen Betrachtung der entwickelten Methodik bzgl. der aufgestellten Anforderungen ab.

Zuletzt fasst *Kapitel 7* die vorliegende Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche weitere Forschungsaktivitäten, die darauf aufbauen können.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Kapitelüberblick

Dieses Kapitel vermittelt die Grundlagen, die zur Einordnung und zum Verständnis der vorliegenden Themenstellung notwendig sind. Hierfür werden zunächst die getaktete Montage und der Einfluss von Varianten auf derartige Montagesysteme genauer betrachtet (Abschnitt 2.2). Anschließend stellt Abschnitt 2.3 die wesentlichen relevanten Bausteine zur Planung variantenreicher Montagelinien dar, wobei Abschnitt 2.3.1 einen Überblick über den Planungsprozess gibt und daraufhin die Austaktung der Linie (Abschnitt 2.3.2), der Umgang mit Variantenspitzen durch Personaleinsatzplanung (Abschnitt 2.3.3) und die Reihenfolgeplanung (Abschnitt 2.3.4) im Fokus stehen. Abschnitt 2.4 verdeutlicht die Auswirkungen, die sich durch Schwankungen in der Nachfrage auf variantenreiche Montagelinien ergeben. Da die Nutzfahrzeugmontage als Beispiel zur Verdeutlichung der Themenstellung dient, werden die Herausforderungen zur Austaktung unter deren spezifischen Rahmenbedingungen in Abschnitt 2.5 genauer betrachtet und gegenüber anderen Branchen, insbesondere der PKW-Montage, abgegrenzt. Abschnitt 2.6 fasst dieses Kapitel zusammen.

2.2 Getaktete Montage variantenreicher Produkte

2.2.1 Begriffsdefinition: Produktion und Montage

Der Begriff „*Produktion*“ (lat. *producere* = hervorbringen) bezeichnet die Erschaffung und Kombination von materiellen und immateriellen Gütern, um durch einen wertschaffenden Prozess Güter von höherem Wert zu generieren. Dabei beinhaltet die Produktion zum einen die direkt wertschöpfenden Tätigkeiten der Teilefertigung und Montage⁴, zum anderen aber auch unterstützende Prozesse wie die Planung und Steuerung (ZAHN & SCHMIDT 1996, EVERSHEIM 1992). Die Montage stellt folglich einen Teilbereich der Produktion dar.

⁴ Häufig werden in der Praxis die Begriffe „*Produktion*“ und „*Fertigung*“ synonym verwendet (EVERSHEIM 1996). Der VDI bezeichnet analog zur Definition der Produktion die „*Fertigung*“ als alle „*organisatorischen und technischen Maßnahmen zur Herstellung von Material und Erzeugnissen*“, wobei zur Fertigung „*insbesondere Teilefertigung und Montage*“ gezählt werden (VDI 2815, S. 2f).

2 Theoretischer Hintergrund

Der VDI definiert in der Richtlinie 2815 *Montage* als „*Zusammenbau von Teilen und /oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen*“ (VDI 2815, S. 3). Dabei wird nach DIN 6789 ein nicht weiter zerlegbarer Gegenstand als *Teil* und ein in sich geschlossener Gegenstand niedriger Ordnung, der aus zwei oder mehreren Teilen besteht, als *Gruppe* bezeichnet. Somit ist es Aufgabe der Montage, ein Produkt höherer Komplexität mit vorgegebener Funktion in einer bestimmten Zeit aus Teilen und Gruppen zusammenzubauen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten an unterschiedlichen Orten gefertigt wurden (REINHART & SCHNEIDER 1996).

Die Montage ist als häufig letzter wertschöpfender Schritt im Produktionsprozess durch eine hohe Kundennähe und somit hohe Qualitätsverantwortung geprägt (WESTKÄMPER ET AL. 2001). Andererseits wird sie aufgrund dieser finalen Position auch als „*Sammelbecken organisatorischer, terminlicher und qualitativer Fehler*“ (REINHART & SCHNEIDER 1996, S. 1239) bezeichnet, da oftmals erst in der Montage die unentdeckten Probleme der vorgelagerten Produktionsbereiche deutlich werden (BADER 1986, MÄRZ & LANGSDORFF 2001). Insbesondere bei variantenreichen Produkten ist eine Automatisierung der Montage aufgrund der hohen Komplexität nur eingeschränkt möglich, weshalb manuelle Tätigkeiten in der Montage variantenreicher Produkte überwiegen und dadurch insbesondere in Hochlohnländern hohe Kosten entstehen (RÖHRIG 2002, BLEY ET AL. 2004, WENZEL 2001).

2.2.2 Organisationsformen der Montage

Die *Organisationsform* beschreibt in der Montage die räumliche und zeitliche Zusammenfassung von Arbeitskräften und Betriebsmitteln zu organisatorischen Einheiten (MILBERG & REINHART 1996). Wie in Abbildung 2 dargestellt, spielt demzufolge bei der Unterscheidung der verschiedenen Möglichkeiten zur Organisation der Montage⁵ die Bewegung des Montageobjekts und der Mitarbeiter sowie die zeitliche Verkettung des Materialflusses eine Rolle (HALUBEK 2012).

Für unbewegte Montageobjekte wird zwischen der *Einzelplatzmontage* und der *Baustellenmontage* unterschieden. In der Einzelplatzmontage erfolgt der gesamte Montageprozess an einem Arbeitsplatz, weshalb diese Organisationsform v. a. für kleinvolumige Montageobjekte mit keinem zu hohen Montageumfang geeig-

⁵ In der Literatur findet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze zur Strukturierung der Organisationsformen der Montage. Einen Überblick über die verschiedenen Strukturierungsansätze von 19 Autoren sowie deren kritische Würdigung liefert PETERSEN (2005).

2.2 Getaktete Montage variantenreicher Produkte

net ist (RICHTER 2005). Demgegenüber findet die ebenfalls stationäre Baustellenmontage insbesondere bei großvolumigen Objekten Anwendung, wobei die Mitarbeiter und Betriebsmittel je nach Bedarf zur Montage hinzugezogen werden. Diese Montageform wird oftmals auch als *Gruppenmontage* bezeichnet, da mehrere Mitarbeiter gleichzeitig im Einsatz sind (BICK 1992, MILBERG & REINHART 1996, SCHUH & SCHMIDT 2006).

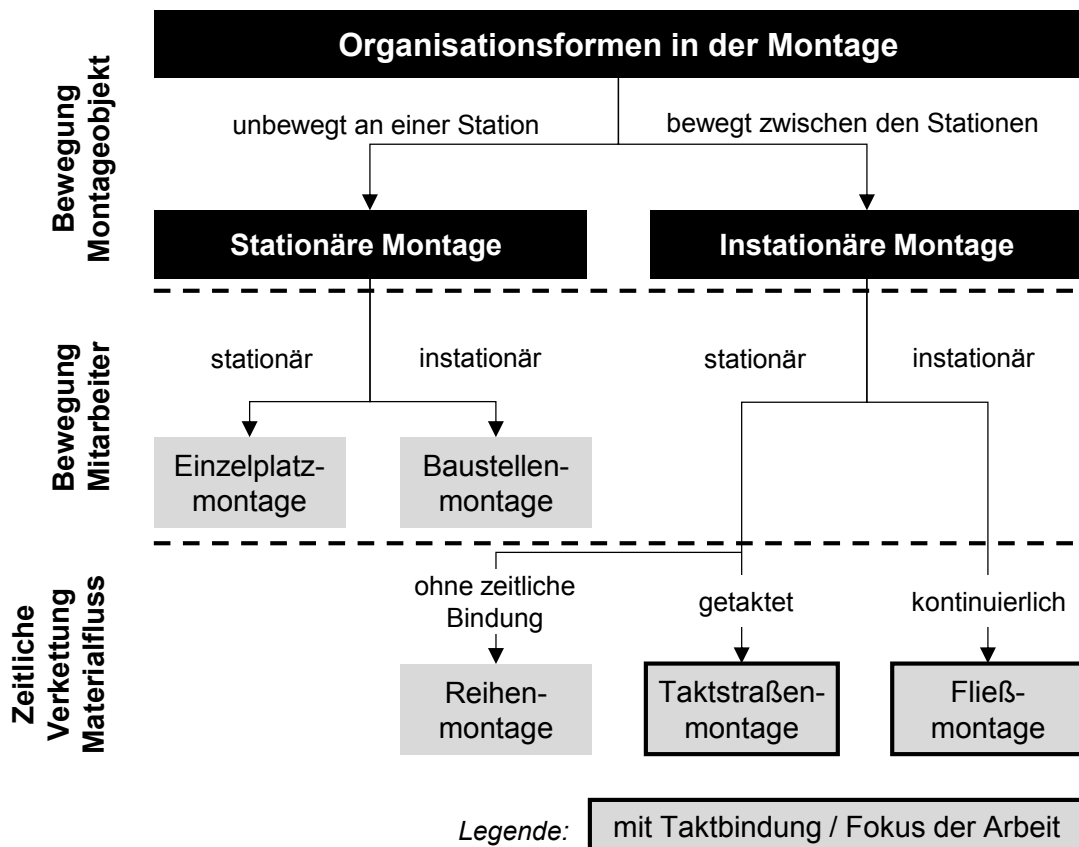


Abbildung 2: Organisationsformen in der Montage (in Anlehnung an SPUR & HELWIG (1986, S. 598), MILBERG & REINHART (1996, S. 10-28), HALUBEK (2012, S. 37))

Bei bewegten Montageobjekten ist zusätzlich zur Bewegung der Mitarbeiter auch die zeitliche Verkettung des Materialflusses relevant. Dabei haben alle Organisationsformen der instationären Montage gemeinsam, dass der Gesamtmontageumfang auf unterschiedliche Stationen im Montageprozess aufgeteilt wird. In der *Reihenmontage* sind die einzelnen Stationen zeitlich nicht miteinander verkettet und Stationen können auch übersprungen werden. Somit sind Puffer zwischen den Arbeitsplätzen nötig (PRASCH 2010, MILBERG & REINHART 1996, MEDO 2010).

2 Theoretischer Hintergrund

Bei der *Taktstraßenmontage* sind die Stationen fest miteinander verkettet. Das Montageobjekt wird ohne Pufferung getaktet an die nächste Station weitergegeben, sobald an allen Arbeitsplätzen die zugeteilten Montageumfänge abgearbeitet wurden. Der Materialfluss wird somit durch die vorgegebene Taktzeit⁶ festgelegt. Aus diesem Grund ist eine konsequente Austaktung⁷ der Montagelinie erforderlich, indem die Arbeitsinhalte der Stationen zeitlich aufeinander abgestimmt werden. Durch diese strikte Bindung ist zum einen die Belastung für die Mitarbeiter besonders hoch und wird zum anderen die Montage von unterschiedlichen Varianten erschwert (BICK 1992, GRUNDIG 2009, PRASCH 2010).

Analog zur Taktstraßenmontage erfolgt auch bei der *Fließmontage* ein Weitertransport der Montageobjekte von Station zu Station ohne Pufferung bei vorgegebener Taktzeit. Unterschiede bestehen in der Art des Materialflusses, da sich das Fördermittel entweder kontinuierlich bewegt (kontinuierliche Fließmontage) oder das Montageobjekt zwar während der Montagetätigkeit stehen bleibt, allerdings nach Beendigung des Montageprozesses unabhängig vom Gesamtsystem weiterverfährt (stationäre Fließmontage) (MILBERG & REINHART 1996, GRUNDIG 2009, BICK 1992). Die Fließmontage ist sehr gut für komplexe Produkt- und Stückzahlstrukturen im Einzelstückfluss geeignet (PRASCH 2010) und insbesondere im Bereich der Automobil- und Nutzfahrzeugmontage weit verbreitet⁸ (BOYSEN 2005). Aufgrund der vorliegenden Zielstellung sind die beiden taktgebundenen Organisationsformen – die Taktstraßenmontage und die Fließmontage – im Fokus dieser Arbeit. Welche Auswirkungen die verstärkte Montage unterschiedlicher Varianten auf die taktgebundene Montage hat, wird im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

2.2.3 Varianten in der taktgebundenen Montage

Varianten sind „*Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit in der Regel hohem Anteil identischer Gruppen oder Teile*“ (DIN 199-1, S. 15). RÖHRIG (2002, S. 38) verallgemeinert diese Definition, um implizit auch die Produktion mit einzuschließen, und beschreibt eine Variante als „*ein Element einer Klasse ähnlicher Objekte*“, wobei er diese Klasse ähnlicher Objekte gemäß DIN 199-1 auch als „*Variantentyp*“ bezeichnet. Varianten eines Variantentyps zeich-

⁶ Die Taktzeit wird in Abschnitt 2.3.2.1 genauer definiert.

⁷ Eine detaillierte Erläuterung des Begriffs „Austaktung“ erfolgt in Abschnitt 2.3.2.1.

⁸ Eine Kurzübersicht über geeignete Organisationsprinzipien im Großgerätebereich findet sich bei LOTTER (2005A). Einen ausführlichen Überblick liefert PETERSEN (2005).

nen sich dadurch aus, dass sie sich mindestens hinsichtlich der Ausprägung eines Merkmals voneinander unterscheiden, im großen Ganzen aber stark ähneln (RÖHRIG 2002).

Die zunehmende Kundenorientierung führt zu einem enormen Anstieg der Varianten und somit auch zu einer steigenden Komplexität bzgl. Produkt, Produktionsprozess und -system, welche in der Montage wirtschaftlich beherrscht werden muss (GROBE-HEITMEYER & WIENDAHL 2004, ALDERS 2006, ZHU ET AL. 2008, SCHUH ET AL. 2011, ELMARAGHY ET AL. 2013). Die vielfach zitierte Herausforderung der Variantenvielfalt lässt sich hinsichtlich der Art der Varianz in zwei Kategorien unterteilen: Produkt- und Produktionsvarianz (ZENNER 2006). Aus Sicht der Montage ist primär die Produktionsvarianz von Bedeutung, da hier unterschiedliche Montageprozesse oder unterschiedlicher Ressourceneinsatz zu verschiedenen Bearbeitungszeiten der Varianten führen. Produktvarianz wiederum spielt nur dann eine Rolle, wenn sie auch eine Produktionsvarianz zur Folge hat. Ein Beispiel für Produktvarianz ohne Produktionseinfluss ist die Montage von Varianten mit unterschiedlicher Farbgebung. Da die unterschiedlich farbigen Bauteile i.d.R. im Montageprozess keinen Einfluss auf die Montagezeit haben, stellen diese lediglich Produktvarianten dar. Gleichwohl steigt in diesem Fall der logistische Koordinationsaufwand intern im eigenen Unternehmen oder extern zum Lieferanten (RÖHRIG 2002, BOYSEN 2005). Somit sind Varianten aus Produktionssicht Produkte mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten, die um gleiche Produktionseinheiten konkurrieren (DECKER 1993).

Die Montage stellt eine der kosteneffizientesten Alternativen zur Generierung einer hohen Anzahl an Varianten dar (HU ET AL. 2011). Demzufolge ist hier der Umgang mit der Produktionsvarianz von besonderer Bedeutung. LÖFFLER ET AL. (2011) bestätigen diesen Zusammenhang durch eine Untersuchung der Zeitspreizung⁹ in den verschiedenen Gewerken des Automobilbaus. Während die untersuchten Derivate¹⁰ im Presswerk, im Karosseriebau und in der Lackiererei eine geringe Zeitspreizung aufweisen, ist in der Montage eine hohe Zeitspreizung innerhalb eines Derivats festzustellen. Zusätzlich ist die Zeitspreizung in der Montage auch zwischen den Derivaten unterschiedlich stark ausgeprägt (LÖFFLER ET AL. 2011). Daher stellt sich die Frage, wie mit Varianten in der Fließmontage umgegangen werden soll.

⁹ Die Zeitspreizung beschreibt die Differenz in der Montagezeit zwischen der aufwandsärmsten und der aufwandsreichsten Produktvariante (JANDER 2012A, vgl. auch Abbildung 6, S. 24).

¹⁰ Ein Derivat ist eine Produktvariante in der Automobilindustrie, die aufgrund einer deutlichen äußeren Varianz als eigenständiges Modell angeboten werden kann (JANDER 2012B).

2 Theoretischer Hintergrund

Die Fließmontage¹¹ war seit ihrer Einführung zur Montage des Modell T von Ford im klassischen Sinne für die Massenproduktion eines einzelnen Produktes ausgelegt. Der Bedarf nach individuellen Produkten führt dazu, dass diese Montageform nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden kann und mehrere Produkte auf einer Linie montiert werden müssen (BOYSEN 2005). Nach SCHOLL (1999) können diese Mehrprodukt-Fließmontagen hinsichtlich ihres Umgangs mit unterschiedlichen Produkten nochmals differenziert werden (vgl. Abbildung 3).

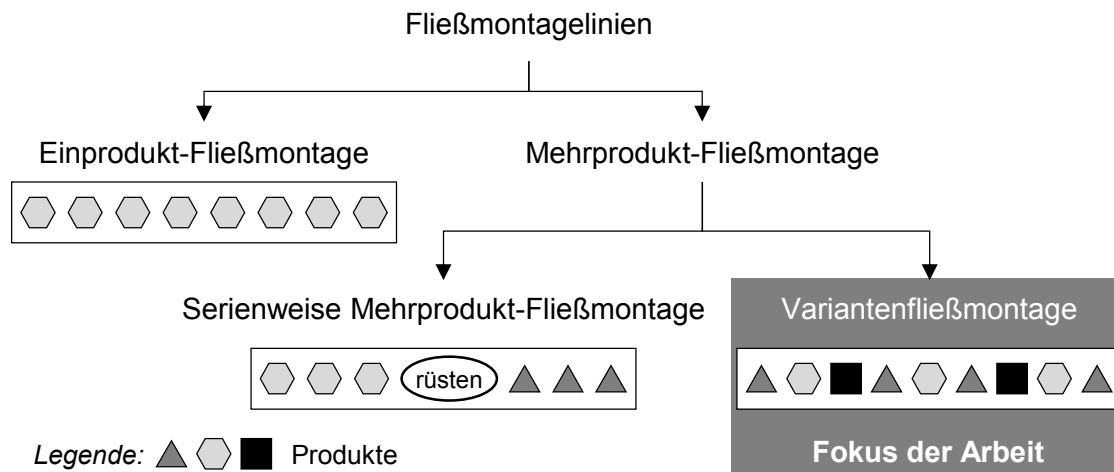


Abbildung 3: Klassifikation von Fließmontagelinien (in Anlehnung an SCHOLL (1999, S. 7), BOYSEN (2005, S. 11))

In der *serienweisen Mehrprodukt-Fließmontage* ist eine Anpassung des Montagesystems erforderlich, um die Produkte montieren zu können. Um dieses Umrüsten möglichst wirtschaftlich zu gestalten, werden gleichartige Produkte in Lose zusammengefasst und serienweise in die Montage eingesteuert. Die Größe der Lose ist dabei insbesondere abhängig von den Rüst- und Bestandskosten (LÖDDING 2008). Im Gegensatz dazu ist in der *Variantenfließmontage* kein oder im Verhältnis zur Bearbeitungszeit nur sehr geringes Umrüsten nötig, weshalb die Varianten im One-Piece-Flow in der Losgröße Eins montiert werden können. Voraussetzung hierfür ist eine Grundähnlichkeit der Varianten analog der zuvor eingeführten Definition nach RÖHRIG (2002). Die Herausforderung in der Variantenfließmontage besteht insbesondere im Umgang mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten je Variante und Station (SCHOLL 1999, BOYSEN 2005). Aufgrund

¹¹ In der Literatur wird die zuvor getroffene Unterscheidung zwischen Taktstraßen- und Fließmontage nicht durchgängig getroffen und oftmals der Begriff Fließmontage übergreifend für beide Arten der getakteten Montage verwendet. Die folgenden Ausführungen sind dementsprechend auch auf die Taktstraßenmontage bezogen. Zur besseren Lesbarkeit werden allerdings nicht immer beide Begrifflichkeiten aufgeführt und der Begriff Fließmontage verwendet.

2.2 Getaktete Montage variantenreicher Produkte

der jährlichen Absatzmengen und des vorherrschenden Individualisierungsgrads ist in der PKW-Branche und im Nutzfahrzeugbereich insbesondere der Einsatz der Variantenfließfertigung sinnvoll (MEDO 2010), weshalb sie im Fokus dieser Arbeit steht.

In der Variantenfließmontage wird versucht, die Montageorganisation einer traditionellen Einprodukt-Fließlinie mit den Möglichkeiten von Baustellenmontagen zur Herstellung hochvarianter Produkte zu verbinden. Dadurch kann eine Vielzahl der Vorzüge einer Fließmontage genutzt werden. Es ergeben sich allerdings Herausforderungen bzw. Schwachstellen durch die Montage variantenreicher Produkte in dieser Montageform. Die wissenschaftliche Literatur beschäftigt sich daher ausgiebig mit den Vor- und Nachteilen der Variantenfließmontage. Stellvertretend für eine Vielzahl weiterer Autoren zeigen MILBERG & REINHART (1996), LEE & VAIRAKTARAKIS (1997), SCHOLL (1999), KRATZSCH (2000), BOYSEN (2005) und REINHART ET AL. (2011) folgende Vorzüge der Variantenfließmontage auf:

- Vergleichsweise hohe Produktivität aufgrund der gegenseitigen Abstimmung der Stationen, des geringen Werkstückhandlings und geringer Rüstzeiten
- Zuverlässig planbare Stückzahlen und kurze Durchlaufzeiten
- Schnelle Anlernphasen und geringere Lohnkosten aufgrund der niedrigeren benötigten Qualifikation durch strenge Arbeitsteilung
- Geringe Kapitalbindung durch den Wegfall von Puffern und durch eine geringe Durchlaufzeit
- Geringer operativer Organisations- und Steuerungsaufwand aufgrund der transparenten Struktur der Montage
- Hohe Planbarkeit der Materialbeschaffung und -bereitstellung

Als Schwachstellen der Variantenfließmontage benennen die oben genannten Autoren insbesondere folgende Aspekte:

- Geringe Flexibilität bzgl. Stückzahl- und Variantenmixschwankungen
- Unproduktivität aufgrund von Verlustzeiten ausgelöst durch eine hohe Zeitspreizung
- Hohe Planungskomplexität aufgrund der Berücksichtigung unterschiedlicher Varianten
- Hohe Belastung der Mitarbeiter durch starre Taktbindung und monotone Arbeit aufgrund der Arbeitsteilung

2 Theoretischer Hintergrund

- Hohe Störungsanfälligkeit durch starre Verkettung aller Arbeitsplätze und durch die Integration der Qualitätskontrolle in die getaktete Linie
- Hohe Investition in Systemtechnik (z. B. Verkettungssysteme)

Um die Vorteile der Variantenfließmontage auch in einem turbulenten Marktumfeld und bei hoher Produktionsvarianz nutzen zu können, werden im Rahmen dieser Arbeit insbesondere Ansätze zur Minderung der drei zuerst genannten Nachteile entwickelt. Dadurch soll eine flexible Reaktion auf Stückzahl- und Variantenmixschwankungen bei gleichzeitig hoher Produktivität erreicht und zudem die Planungskomplexität beherrscht werden. Im folgenden Abschnitt wird darauf aufbauend der Planungsprozess von variantenreichen Montagelinien genauer beleuchtet.

2.3 Planung variantenreicher Montagelinien

2.3.1 Überblick zur Planung variantenreicher Montagelinien

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, getaktete variantenreiche Montagelinien zu einer kurzfristigeren Reaktion auf Nachfrageschwankungen zu befähigen. Die Literatur definiert in diesem Zusammenhang allerdings den kurz-, mittel- und langfristigen Planungshorizont in Abhängigkeit des Anwendungsgebiets (z. B. Absatz-, Produktions- oder Kapazitätsplanung) sehr unterschiedlich (KRÜGER 2004). In Tabelle 1 ist die zeitliche Unterteilung des Planungshorizonts nach DOMSCHKE ET AL. (1997) (Produktionsplanung), MAKRIDAKIS ET AL. (1980) (Absatzplanung) und KRÜGER (2004) (Kapazitätsplanung, in Anlehnung an REFA 1991) dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit soll zur Verdeutlichung der Notwendigkeit zur schnellen Reaktion auf Marktveränderungen die Definition mit der engsten Eingrenzung des kurzfristigen Zeithorizonts gelten, also dem Zeitraum bis zu einem Monat. MAKRIDAKIS ET AL. (1980) betrachten diesen Zeitraum bis zu einem Monat ebenfalls in ihrer Untergliederung und bezeichnen ihn als „*sehr kurzfristigen Horizont*“.

Tabelle 1: *Unterschiedliche Definition des kurz-, mittel- und langfristigen Zeithorizonts in der Literatur*

	kurzfristiger Zeithorizont	mittelfristiger Zeithorizont	langfristiger Zeithorizont
DOMSCHKE ET AL. 1997	bis 6 Monate	6 Monate bis 2 Jahre	ab 2 Jahre
MAKRIDAKIS ET AL. 1980	bis 3 Monate	3 Monate bis 2 Jahre	ab 2 Jahre
KRÜGER 2004	bis 1 Monat	1 Monat bis 1 Jahr	ab 1 Jahr

Legende: Definition im Rahmen dieser Arbeit

Aufgrund der hohen Relevanz für die industrielle Praxis ist der Planungsprozess für variantenreiche Montagelinien sowohl in der ingenieurwissenschaftlichen als auch in der betriebswirtschaftlichen Literatur ausführlich diskutiert¹² (MEDO 2010). Dennoch existieren im Detail unterschiedliche Auffassungen hinsichtlich der einzelnen Planungsschritte, insbesondere in Bezug auf die Einordnung der Schritte in den zeitlichen Planungshorizont. Abbildung 4 ordnet die Abläufe von DECKER (1993), MOLLEMEIER (1997), DOMSCHKE ET AL. (1997), SCHOLL (1999), BOYSEN (2005) und BECKER (2007) bzgl. ihrer Fristigkeit ein. Bei unterschiedlich zugrundeliegenden Definitionen der Fristigkeit bei den Autoren erfolgt die Einordnung soweit möglich in dem zuvor definierten Zeithorizont (kurzfristige Planung im Rahmen von bis zu einem Monat). Als Hauptaspekte der Planung sind über alle Autoren hinweg die *erstmalige Einrichtung* sowie die *Rekonfiguration der Linie*, die *Personalplanung* und die *Produktionsprogrammplanung* zu erkennen, wobei insbesondere die ersten beiden Punkte der Austaktung von Montagelinie zugeordnet werden können (BOYSEN ET AL. 2006).

Alle Autoren beschreiben als einen ersten, wichtigen Teilbereich der Planung die *Einrichtung und Abstimmung des Montagebandes* in Bezug auf das langfristig geplante Produktspektrum, weshalb diese dem mittel- bis langfristigen Planungshorizont zugeordnet wird. DECKER (1993) benennt hierzu zunächst die Banderichtung als Schritt zur Bestimmung des Layouts des Montagebandes, um anschließend im Rahmen des Bandabgleichs Arbeitsinhalte den Stationen zuzuordnen. Das Vorgehen nach MOLLEMEIER (1997) beinhaltet diese Prozesse analog in der Stations- und Arbeitsgangplanung, wobei vorab noch die Planung unterschiedlicher Montagelinien und die Zuordnung von Varianten erfolgt.

¹² Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf speziell für variantenreiche Montagelinien entwickelte Planungsprozesse. Planungsvorgehen für Produktions- bzw. Montagesysteme im Allgemeinen finden sich u. a. bei EVERSHEIM ET AL. (1981), LOTTER (1992) und WIENDAHL (1996).

2 Theoretischer Hintergrund

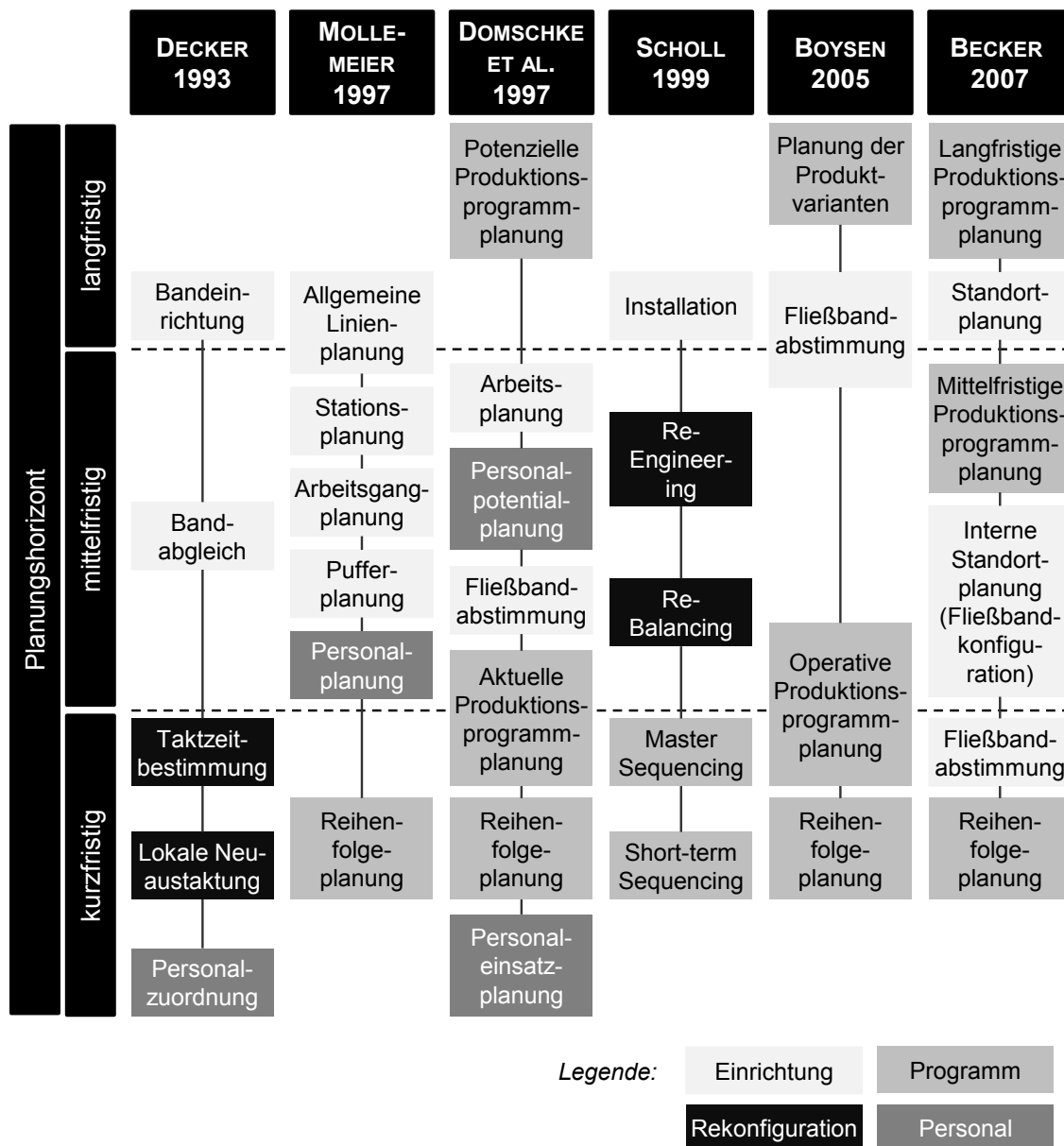


Abbildung 4: Planungsprozesse für variantenreiche Montagelinien eingeordnet in den zeitlichen Horizont (in Anlehnung an MEDO (2010, S. 26))

DOMSCHKE ET AL. (1997) untersuchen zunächst die durchzuführenden Arbeitsgänge (Arbeitsplanung), um diese anschließend im Rahmen der Fließbandabstimmung¹³ analog zu BOYSEN (2005) den Stationen zuzuordnen. Die zuvor genannten Planungsschritte fasst SCHOLL (1999) unter dem Begriff „Installation“ für einen Zeithorizont von zwei bis fünf Jahren zusammen. BECKER (2007) wiederum bezieht in den mittel- bis langfristigen Bereich ausschließlich die Zu-

¹³ Der Begriff „Fließbandabstimmung“ wird im folgenden Abschnitt 2.3.2 als Synonym für „Austaktung“ genauer definiert und beinhaltet die Anpassung von Taktzeiten sowie die Zuordnung von Arbeitsinhalten zu Stationen.

ordnung von Modellen zu Werken und Linien (Standortplanung) sowie die Konfiguration des Fließbandes in Bezug auf Layout und Zuordnung von Betriebsmitteln mit ein. Die Fließbandabstimmung sieht er im kurzfristigen Horizont, wobei dennoch bereits im Rahmen der Fließbandkonfiguration „kritische Arbeitsgänge“ zugeordnet werden müssen, die mit „fest installierte(n) Anlagen oder Manipulatoren, deren räumliche Umsetzung hohen finanziellen und zeitlichen Aufwand verursacht“ (BECKER 2007, S. 17), verbunden sind. Durch deren feste Zuordnung zu Stationen stehen sie für die kurzfristige Fließbandabstimmung nicht mehr zur Verfügung.

Die größten Unterschiede in der Literatur lassen sich in der Einordnung der *Rekonfiguration des Montagebandes* feststellen. Durch die Einordnung der Fließbandabstimmung in den mittelfristigen Planungshorizont wird implizit deutlich, dass es sich hierbei um einen wiederkehrenden Prozess handeln muss. Dementsprechend unterteilen BOYSEN ET AL. (2006) die Fließbandabstimmung nochmals in die Installation und die Rekonfiguration. Explizit betrachten nur SCHOLL (1999) und DECKER (1993) eine Anpassung der Montagelinie in den diskutierten Planungsprozessen. SCHOLL (1999) unterscheidet dabei das Re-Engineering als Schritt zur Neuverteilung von Arbeitsinhalten und ggf. auch Betriebsmitteln im Rahmen von einem halben bis zu zwei Jahren und das Re-Balancing als Schritt zur kleineren Anpassung innerhalb von einem Monat bis hin zu einem Jahr. DECKER (1993) wiederum sieht die lokale Neuaustaktung als kurzfristige Aufgabe, wobei sie sich dabei auf das Verschieben von Arbeitsgängen zu Nachbarstationen beschränkt. Auch die Taktzeitbestimmung erfolgt hier erst im kurzfristigen Bereich. Wie zuvor erläutert, ordnet BECKER (2007) die Fließbandabstimmung per se dem kurzfristigen Horizont zu und zeigt somit den alternierenden Charakter des Planungsprozesses.

Zur Einordnung der *Produktionsprogrammplanung* herrscht Einigkeit in der Literatur. DOMSCHKE ET AL. (1997), BOYSEN (2005) und BECKER (2007) sehen zunächst eine langfristige Planung der im Sinne der Unternehmensstrategie grundsätzlich angestrebten Produkte und Varianten vor. Anschließend erfolgt im mittel- bis kurzfristigen Zeithorizont die Festlegung der Art und Menge der zu montierenden Varianten sowie des Produktionszeitpunkts. Für die Variantenfließmontage ist der abschließende Schritt, die *Reihenfolgeplanung* (engl.: *sequencing*)¹⁴, von besonderer Bedeutung. Hier wird die Reihenfolge festgelegt, in der die Varianten mit ihren unterschiedlichen Kapazitätsanforderungen tatsäch-

¹⁴ Die Reihenfolgeplanung wird in Abschnitt 2.3.4 genauer erläutert.

lich in die Linie eingesteuert werden. Alle Autoren stufen diesen letzten Schritt als kurzfristige Planungsaufgabe ein.

Aufgrund des hohen manuellen Anteils in der variantenreichen Montage nennen auch drei der Autoren explizit die *Personalplanung* als wichtigen Bestandteil der Planung. DOMSCHKE ET AL. (1997) betrachten hierzu im mittel- bis langfristigen Zeithorizont die eigentliche Planung des benötigten Mitarbeiterpotentials. Analog zu DECKER (1993) ordnen sie dem kurzfristigen Bereich die Glättung von Kapazitätsschwankungen mit Hilfe des Personals zu, beispielsweise durch die Einplanung von sog. „*Springern*“¹⁵, die bei Überlastungen unterstützen. Diesen zweiten Schritt sieht MOLLEMEIER (1997) im Rahmen der Personalplanung wiederum im mittelfristigen Horizont.

Zusammenfassend werden in der Literatur v. a. die Personaleinsatzplanung und die Reihenfolgeplanung als kurzfristige Planungsprozesse angesehen und stehen somit als Mittel zur schnellen Reaktion auf Nachfrageschwankungen zur Verfügung. Die Umverteilung von Arbeitsinhalten am Band findet hingegen kaum im kurzfristigen Planungshorizont statt. Lediglich zwei Autoren sehen diese Option auch als kurzfristige Möglichkeit an, wobei sich DECKER (1993) dabei auf benachbarte Stationen und BECKER (2007) auf den Einbezug betriebsmittelunabhängiger Arbeitsinhalte beschränken. Somit besteht insbesondere im Bereich der Austaktung Bedarf eine kurzfristigere Reaktionsfähigkeit zu ermöglichen, falls Personaleinsatz- und Reihenfolgeplanung alleinstehend nicht ausreichen. Die folgenden Abschnitte erläutern detaillierter die Grundlagen zur Austaktung (Abschnitt 2.3.2), zur Personaleinsatzplanung (Abschnitt 2.3.3) und zur Reihenfolgeplanung (Abschnitt 2.3.4) in der variantenreichen, getakteten Montage, da diese wie zuvor hergeleitet die wesentlichen Stellhebel zur kurzfristigen Anpassung der Montagelinie auf Nachfrageschwankungen darstellen.

2.3.2 Austaktung variantenreicher Montagelinien

2.3.2.1 Definition von Austaktung und Taktzeit

Die *Austaktung* ist der wesentliche Schritt zur Planung und Auslegung von Montagelinien und dementsprechend in der produktionstechnischen und betriebswirtschaftlichen Forschung ausführlich diskutiert. Dennoch ist keine einheitliche Begrifflichkeit für den Austaktungsprozess vorzufinden und es haben sich unter-

¹⁵ Eine detaillierte Definition des Springereinsatzes erfolgt in Abschnitt 2.3.3.2.

schiedliche Ausdrücke etabliert. Synonym zu *Austaktung* (ROSCHER 2007, WEYAND 2010) werden v. a. die Begriffe *Abtaktung* (LUTZ 1974, KROPIK 2009), *(Fließ-) Bandabgleich* (KISTNER & STEVEN 2001, DECKER 1993), *Leistungsabstimmung* (WEIß 2000, KRATZSCH 2000), *Kapazitätsabstimmung* (ALTEMEIER 2009) und, insbesondere in der Betriebswirtschaft, *Fließbandabstimmung* (DOMSCHKE ET AL. 1997, BOYSEN 2005, BECKER 2007) verwendet. In der englischsprachigen Literatur hat sich v. a. der Begriff *(Assembly) Line Balancing* (SCHOLL 1999, BOYSEN ET AL. 2008) durchgesetzt.

Gleichzeitig ist in der Literatur keine einheitliche Definition des Austaktungsbegriffs gegeben. Einigkeit herrscht darin, dass im Zuge der Austaktung die Arbeitsinhalte am Montageband verteilt werden: „*Ziel der Austaktung ist eine möglichst hohe Auslastung der Mitarbeiter mit manuellen Arbeitsvorgängen in der Montagelinie. Zu diesem Zweck werden die Arbeitsvorgänge auf Arbeitskräfte und Arbeitsstationen verteilt*“ (ROSCHER 2007, S. 21). Auf ähnliche Weise beschreibt KRATZSCH (2000, S. 18) die Zielsetzung der Austaktung darin, „*Tätigkeiten der Montage eines Produktes den Stationen einer Montagelinie so zuzuordnen, dass der Arbeitsumfang der einzelnen Stationen zeitlich aufeinander abgestimmt ist und Verlustzeiten vermieden werden.*“

Unterschiede bestehen in der Auffassung, ob die Bestimmung der Taktzeit explizit als Teilumfang der Austaktung anzusehen ist oder ob diese als Eingangsgröße der Austaktung zur Verfügung steht. WEIß (2000, S. 22) definiert unter diesem Gesichtspunkt Austaktung als „*Zuteilung der auszuführenden Arbeitsvorgänge (AVOs) zu einzelnen Arbeitszyklen, wobei bei einer vorgegebenen Taktzeit der Taktausgleich¹⁶ pro Arbeitszyklus zu minimieren ist.*“ Zusätzlich seien dabei die Verbaureihenfolge und Restriktionen zur Zuordnung von AVOs zu beachten (vgl. Abschnitt 2.3.2.3). ZÄPFEL (2000), WILLNECKER (2001), BOYSEN (2005) und WEYAND (2010) hingegen betrachten die Bestimmung der Taktzeit als einen wesentlichen Aspekt der Austaktung. Aufgrund der Zielsetzung dieser Arbeit zur Berücksichtigung von Stückzahlschwankungen wird im Folgenden diesen Autoren entsprechend die Austaktung wie folgt definiert:

Die Austaktung „besteht zum einen aus dem Ermitteln der Taktzeit eines Montagesubsystems und zum anderen aus der Zusammenfassung von Teilarbeitsvorgängen zu Arbeitsfolgen an einzelnen Arbeitsplätzen. (...) Die Anpassung erfolgt in der Art, daß die benötigte Zeit an einer Arbeits-

¹⁶ Der *Taktausgleich* oder auch *Taktausgleichsverlust* berechnet sich aus der Differenz von Taktzeit und tatsächlicher Bearbeitungszeit (WEIß 2000, vgl. Abbildung 5, S. 21).

2 Theoretischer Hintergrund

station dem Solltakt weitgehend entspricht“ (WILLNECKER 2001, S. 122). Das „Bestimmen der Taktzeit und der Anzahl der Arbeitssysteme für gegebene Arbeitsaufgaben und damit zusammenhängend das Zuordnen der Arbeitselemente auf die Arbeitssysteme (...) [erfolgt derart, dass] ein bestimmtes Ziel optimal erfüllt wird“ (ZÄPFEL 2000, S. 197).

Durch die allgemeine Formulierung bzgl. der Zielsetzung wird deutlich, dass bei der Austaktung unterschiedliche Ziele verfolgt werden können. BOYSEN ET AL. (2007) nennen folgende Zielgrößen:

- Minimierung der Anzahl an Stationen (= Minimierung der Durchlaufzeit)
- Minimierung der Taktzeit (= Maximierung des Produktionsausstoßes)
- Maximierung der Effizienz der Montagelinie
- Minimierung der Kosten
- Maximierung des Profits
- Glättung der Stationszeiten (entlang der gesamten Montagelinie oder bzgl. der verschiedenen Varianten an einer Station)

Meist werden diese Ziele nicht alleinstehend, sondern in Kombination verfolgt. Die Zielsetzung kann allerdings je nach Komplexität der Planungsaufgabe auch nur darin bestehen, überhaupt eine realisierbare Austaktung zu erreichen (BOYSEN ET AL. 2007).

Die *Taktzeit* stellt eine der wichtigsten Planungsgrößen im Rahmen der Austaktung dar. In einer getakteten Montagelinie gibt sie den zeitlichen Abstand vor, in dem ein Produkt eingesteuert wird bzw. in dem ein fertig montiertes Produkt die Fließlinie verlässt. Sie beschreibt somit die maximale Zeit, die für die Montage-tätigkeit an einer Station zur Verfügung steht, bevor das Produkt zur nächsten Station weitertransportiert wird (WEIß 2000, AMEN 2006). Durch den direkten Einfluss auf den Produktionsausstoß der Montagelinie besteht zusätzlich ein Zusammenhang zur Kundennachfrage. Um dieser gerecht zu werden, muss die Produktionsmenge dem Kundenbedarf entsprechen (SYSKA 2006). Beide Aspekte zusammenfassend ist die Taktzeit t_t „die pro Erzeugnis und Arbeitsstation maximal verfügbare Montagezeit und wird durch die effektive tägliche Arbeitszeit und die pro Tag geforderte Stückzahl bestimmt“ (LUTZ 1974, S. 18):

$$t_t = \frac{(\text{Arbeitszeit} - \text{Bandpausen})/\text{Tag}}{\text{Stückzahl}/\text{Tag}} \quad (1)$$

Durch den starken Bezug zum Endverbraucher wird in diesem Zusammenhang auch vom sog. „Kudentakt“ gesprochen (KLUG 2010). Aufgrund dieser Defini-

tion könnte die Taktzeit täglich variieren. In der industriellen Praxis wird die Taktzeit allerdings über einen größeren Zeitraum festgelegt und die schwankenden Auftragseingänge werden über diesen Zeitraum hinweg gleichmäßig verteilt¹⁷ (SYSKA 2006). Diese Nivellierung ist jedoch nur bei geringen Abweichungen zwischen Auftragseingang und Taktzeit möglich.

2.3.2.2 Prozess der Austaktung unter Berücksichtigung von Varianten

Im Rahmen der Austaktung werden Arbeitsinhalte den einzelnen Stationen der Montagelinie zugeordnet. Abbildung 5 stellt diesen Prozess vereinfacht über fünf Station für eine Produktvariante dar.

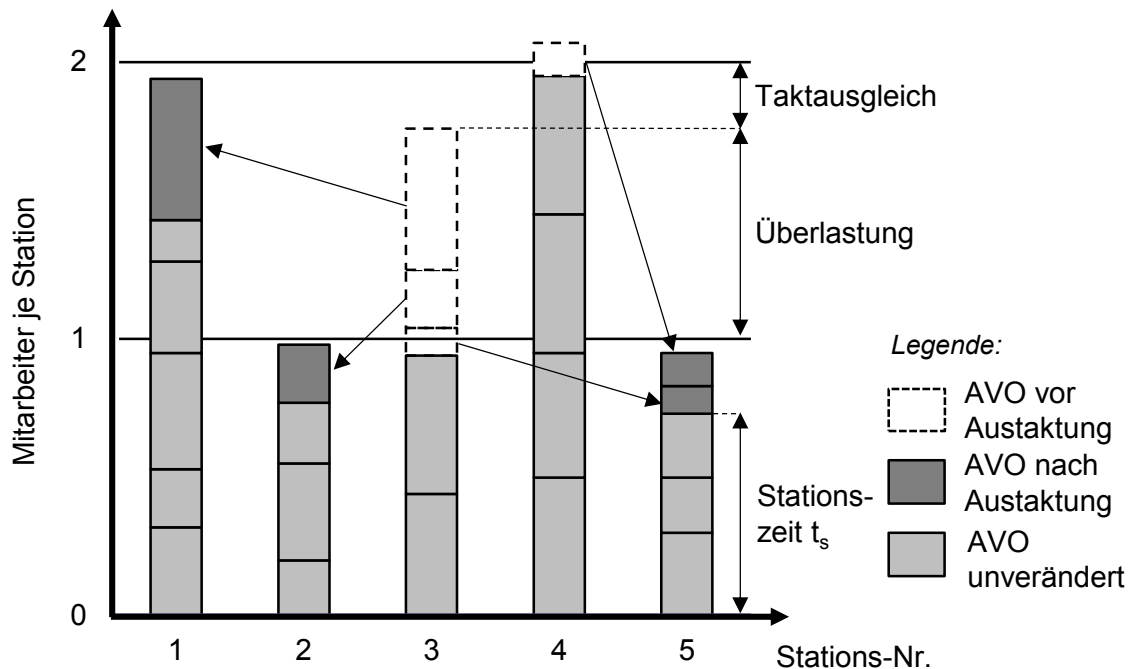


Abbildung 5: Prinzip der Austaktung (in Anlehnung an ALTEMEIER (2009, S. 82), LUTZ (1974, S. 19))

Der Montageprozess gliedert sich in einzelne Arbeitsvorgänge (AVOs) auf, die aus mehreren Elementartätigkeiten bestehen, die aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen zusammen auszuführen sind (WEIß 2000). Für die einzelnen AVOs werden Vorgabezeiten benötigt, um bei der Zuteilung der Arbeitsinhalte die benötigte Kapazität berücksichtigen zu können (LUTZ 1974). Die in der Praxis am weitesten verbreiteten Methoden zur Vorgabezeitbestimmung sind die

¹⁷ Eine genauere Ausführung zur Programm- und Reihenfolgeplanung erfolgt in Abschnitt 2.3.4.

2 Theoretischer Hintergrund

Zeitermittlung nach REFA sowie Systeme vorbestimmter Zeiten (SvZ) (ZÜLCH 1996, LOTTER 2005A). Bei der REFA-Zeitermittlung werden zunächst Zeiten durch Beobachtung des Ist-Prozesses aufgenommen und anschließend unter Bezug auf eine Normalleistung die Soll-Zeiten ermittelt (vgl. REFA 1992). Demgegenüber sind bei SvZ die Vorgabezeiten für die einzelnen Arbeitsvorgänge bereits in Standardtabellen hinterlegt. Das MTM-Verfahren (Methods-Time Measurement) stellt das am häufigsten angewendete SvZ dar (vgl. BOKRANZ & LANDAU 2006).

Durch das Zusammenfassen der AVOs an einer Station ergibt sich durch Aufsummieren ihrer Vorgabezeit die *Stationszeit* t_s ¹⁸ (LUTZ 1974), die die benötigte Kapazität an dieser Station darstellt. Demgegenüber wird durch die Taktzeit und die Anzahl an zugeteilten Mitarbeitern die vorhandene Kapazität vorgegeben (ALTEMEIER 2009). Aus der Differenz aus Stationszeit und der vorhandenen Kapazität ergibt sich die Leer- bzw. Wartezeit an der Station, der sog. *Taktausgleich* (WEIß 2000) bzw. *Austaktungsverlust* (GRUNDIG 2009). Ein Ziel der Austaktung liegt darin, möglichst keinen Taktausgleich zu generieren, was aufgrund der vielfältigen Einflussgrößen in der Realität aber kaum möglich ist (GRUNDIG 2009). Dementsprechend kommt es im Rahmen der Austaktung unvermeidbar zu daraus resultierenden Überkapazitäten bzw., falls die geforderte Kapazität die vorhandene übersteigt, auch zu Überlastungen (GOTTSCHALK 2006B).

Diese Problemstellung wird durch die Montage unterschiedlicher Varianten in der Fließmontage noch verstärkt. Aufgrund der unterschiedlichen Kapazitätsanforderungen der Varianten ergeben sich unterschiedliche Stationszeiten in Abhängigkeit der zu montierenden Variante (vgl. Abbildung 6). Daraus resultiert je nach Häufigkeit der einzelnen Varianten im Produktionsprogramm, dem sog. Variantenmix¹⁹, eine durchschnittliche Stationszeit sowie eine minimale und maximale Bearbeitungszeit an der Station durch die aufwändigste und aufwandärmste Variante (BECKER 2007). Diese Montagezeitdifferenz zwischen aufwändigster und aufwandärmster Variante wird auch als *Zeit- oder Taktspreizung* bezeichnet und ist eine der Hauptursachen für Produktivitätsverluste und Qualitätsprobleme in der Variantenfließmontage (GANS 2008, HALUBEK 2012, JANDER 2012A).

¹⁸ häufig auch: Zykluszeit (WEIß 2000)

¹⁹ häufig auch: Modell-Mix (KOETHER 1986, WILLNECKER 2001) oder Produktmix (ROSCHE 2007, KROPIK 2009)

Prinzipiell bestehen bei der Austaktung zunächst zwei Möglichkeiten zum Umgang mit Varianten, die an derselben Montagelinie produziert werden: eine Einzelaustaktung für jede Variante unabhängig voneinander oder eine Misch-austaktung unter Einbezug aller Varianten gleichzeitig (GÖRKE 1978, DECKER 1993). Erstere bietet den Vorteil, dass dem Austaktungsprozess ein wesentlicher Komplexitätstreiber genommen wird, allerdings mit der Folge, dass gleichartige AVOs von unterschiedlichen Varianten verschiedenen Stationen zugeordnet werden können. Dadurch ergeben sich nicht nur hohe Investitionen in doppelte Betriebsmittel sowie hohe Aufwände in der Intralogistik, sondern auch eine Minderung der Skaleneffekte und der Transparenz, die eine Fließmontage auszeichnen, sowie eine Steigerung der Anforderungen an die Mitarbeiter. Aus diesem Grund hat sich in der industriellen Praxis die Misch-austaktung unter Berücksichtigung aller Varianten und somit die einheitliche Zuordnung gleicher AVOs zu gleichen Montagestationen durchgesetzt (DECKER 1993, DOMSCHKE ET AL. 1997, BOYSEN 2005, WEYAND 2010).

Die Zuordnung gleicher AVOs zu gleichen Stationen resultiert in der nächsten Fragestellung im Umgang mit Varianten, welche in Abbildung 6 verdeutlicht ist: Auf welche Variante soll die Montagelinie ausgetaktet werden? Eine Möglichkeit besteht in der *Auslegung auf die Maximalvariante*. Dabei erfolgt die Austaktung derart, dass selbst die zeitaufwändigste Variante noch in der Taktzeit montiert werden kann. Dementsprechend liegen bei allen anderen Varianten Wartezeiten vor. Insbesondere bei einer hohen Zeitspreizung oder bei einer geringen relativen Häufigkeit der Maximalvariante hat diese Vorgehensweise einen hohen Taktausgleich und somit eine niedrige Auslastung der Montagelinie zur Folge (ALTEMEIER 2009, GANS ET AL. 2011). Aus diesem Grund findet bei hohen Vorgabezeitunterschieden zwischen den einzelnen Varianten eine *Auslegung auf eine Durchschnittsvariante* statt (vgl. Abbildung 6, rechts). Die Vorgabezeit der Durchschnittsvariante ergibt sich aus der Gewichtung der Vorgabezeiten der einzelnen Varianten unter Berücksichtigung der jeweiligen relativen Häufigkeiten (HALUBEK 2012). Somit handelt es sich dabei um eine imaginäre Variante, die i. d. R. nicht in der Realität montiert werden kann. Durch die Auslegung auf ein Durchschnittsprogramm wird der Taktausgleich an den Stationen reduziert. Gleichzeitig treten aber je nach Variante nicht mehr nur noch Wartezeiten, sondern auch Überlastsituationen auf (ALTEMEIER 2009, GANS ET AL. 2011). Auf Möglichkeiten zum Umgang mit diesen Kapazitätsspitzen wird in Abschnitt 2.3.3 genauer eingegangen.

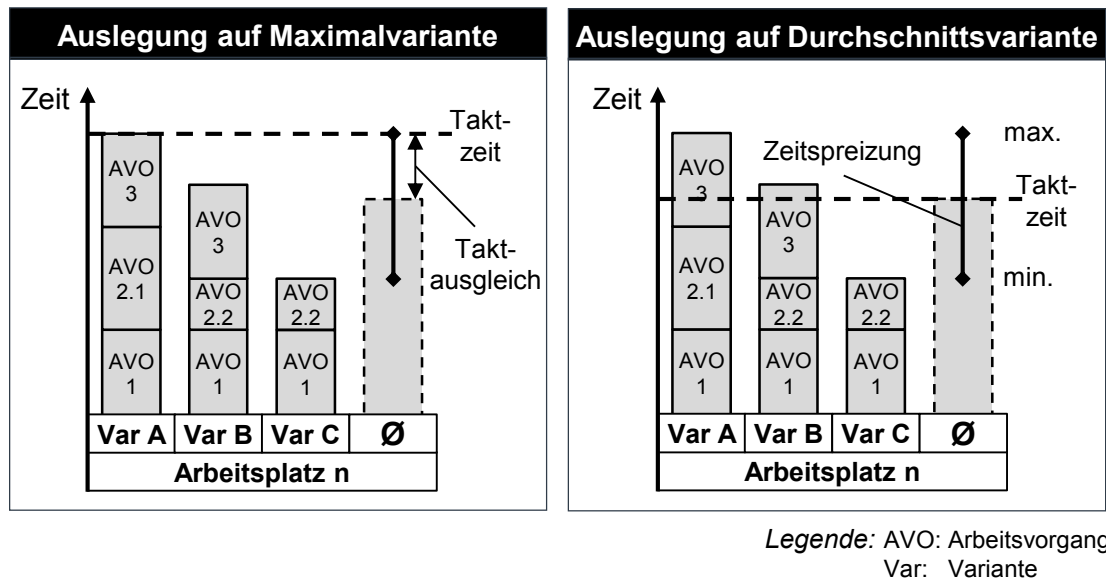


Abbildung 6: Möglichkeiten zur Auslegung der Austaktung in der Variantenfließmontage (in Anlehnung an GANS (2008, S. 9), GANS ET AL. (2011, S. 163), PRÖPSTER & REINHART (2013, S. 178))

2.3.2.3 Restriktionen bei der Austaktung

Bei der Zuordnung von Montageinhalten zu Arbeitsstationen ist im Rahmen der Austaktung eine Vielzahl an Restriktionen zu beachten. Hierbei sind insbesondere die *Vorrangbeziehungen der AVOs, Arbeitsgang-, Stations-, Positions- und Mitarbeiterrestriktionen* relevant²⁰ (DOMSCHKE ET AL. 1997, SCHOLL 1999, BOYSEN 2005). Um ein gültiges Austaktungsergebnis zu erhalten, sind diese zu berücksichtigen, um die Planungsergebnisse in der Realität auch umsetzen zu können. Dies stellt bei komplexen Produkten und einer Vielzahl an Restriktionen eine große Herausforderung bei der Austaktung dar (FALKENAUER 2005, MEDO 2010).

Vorrangbeziehungen

Eine der Hauptrestriktionen im Rahmen der Austaktung ist die Beachtung der Vorrangbeziehungen der einzelnen Arbeitsschritte. Um den Montageprozess auf unterschiedliche Stationen aufteilen zu können, muss durch Einhaltung der Verbaureihenfolge gewährleistet werden, dass die Montage des Produktes aus technischer und organisatorischer Sicht weiterhin möglich ist. Somit sind die Vorgänger- und Nachfolgebeziehungen aller benötigten AVOs zu bestimmen

²⁰ SCHOLL ET AL. (2008) liefern einen Überblick über Lösungsansätze zur Austaktung in der Literatur, die einzelne dieser Restriktionen beachten.

2.3 Planung variantenreicher Montagelinien

(BOYSEN 2005, BECKER 2007). Ein Hilfsmittel hierfür stellt der Montagevorranggraph²¹ dar. Darin „wird der montageorientierte Produktaufbau hinsichtlich seiner logisch zeitlichen Ablaufstruktur dargestellt, um mögliche montagetechnische Freiheitsgrade des Produkts zu erkennen“ (BULLINGER 1995, S. 94). Abbildung 7 zeigt links drei Montagevorranggraphen unterschiedlicher Varianten, wobei die Knoten die einzelnen AVOs samt deren Vorgabezeit darstellen und die Kanten des gerichteten Graphen die Vorrangfolge festlegen (ALTEMEIER 2009, BOYSEN 2005).

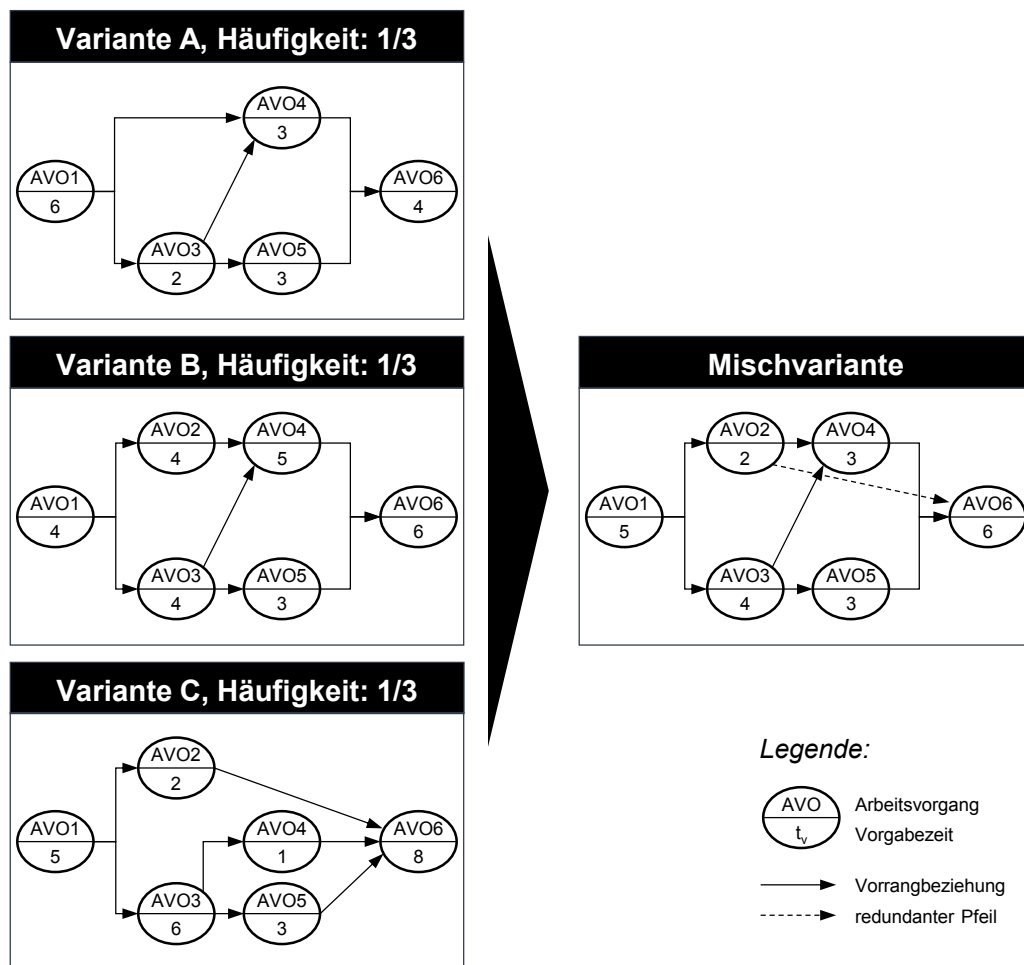


Abbildung 7: Bildung eines Variantenvorranggraphen für drei Produktvarianten (in Anlehnung an GÖRKE (1978, S. 48f), BOYSEN (2005, S. 139))

Die Komplexität bei der Erstellung steigt durch die Anzahl an Varianten, die auf einer Montagelinie produziert werden. So müssen im Rahmen einer

²¹ Eine weitere Darstellungsmöglichkeit ist die Vorrangmatrix. Hier werden jeweils alle AVOs in den Zeilen und Spalten aufgetragen. Anschließend wird in jedem Feld hinterlegt, welche Art von Vorrangbeziehung besteht (LUTZ 1974).

2 Theoretischer Hintergrund

Mischaustaktung (vgl. Abschnitt 2.3.2.2) die Vorrangfolgen aller Varianten berücksichtigt werden, um identische AVOs unterschiedlicher Varianten denselben Stationen zuzuordnen. Um das gesamte Variantenprogramm abbilden zu können, ist dementsprechend ein Variantenvorranggraph²² zu bestimmen. Analog zur Vorgehensweise der Mischaustaktung werden dabei die Montagezeiten in Abhängigkeit der Häufigkeit der einzelnen Varianten gewichtet und aus der Menge aller Vorranggraphen der einzelnen Varianten wird durch entfernen redundanter Beziehungen ein Mischgraph gebildet (vgl. Abbildung 7) (THOMOPOULOS 1967, MILTENBURG 2002, ALTEMEIER 2009, BOYSEN 2005).

Bereits bei diesem einfachen Beispiel wird deutlich, dass bei einer hohen Anzahl an Varianten die Bildung eines Variantenvorranggraphen mit sehr hohem Aufwand verbunden ist, da jeder AVO jeder Variante betrachtet werden muss und die Daten aktuell gehalten werden müssen. Das hat zur Folge, dass in der Praxis häufig keine oder nicht ausreichend beschriebene Vorranggraphen vorliegen (BECKER 2007). STERNATZ (2010) zeigt hierzu beispielhaft den Arbeitsaufwand zur vollständigen Erstellung eines Vorranggraphen auf, indem er für ein Produkt mit 15.000 AVOs und unter der Annahme von fünf Querbeziehungen je AVO sowie einer Untersuchungsdauer von drei Minuten je Querbeziehung einen Erstellungsaufwand von zwei Personen-Jahren berechnet. Daraus wird deutlich, dass in der realen Anwendung nicht auf vollständige, digital vorliegende Montagevorranggraphen zurückgegriffen werden kann und vielmehr die Erfahrung der Montageplaner und Werker mit einbezogen werden muss.

Arbeitsgangrestriktionen

Neben der eigentlichen Verbaureihenfolge, die im Vorranggraphen abgebildet ist, spielen unabhängig davon auch weitere Restriktionen bzgl. der zeitlichen und räumlichen Abstände der AVOs eine Rolle. Es kann beispielsweise möglich sein, dass zwischen zwei AVOs ein Mindestabstand einzuhalten ist, da sie sonst nicht ausgeführt werden können. So besteht z. B. eine Inkompatibilität zwischen Prüfungsvorgängen und schwingungserzeugenden Montageprozessen oder lokale Trocknungsvorgänge erfordern eine Wartezeit. Umgekehrt kann es notwendig sein, dass ähnliche Montageprozesse möglichst nah beisammen liegen sollten, z. B. um doppelt anfallende Investitionen in Betriebs- oder Handhabungsmittel zu vermeiden (DOMSCHKE ET AL. 1997, SCHOLL 1999, BOYSEN 2005).

²² häufig auch: Mischgraph (BOYSEN 2005, ALTEMEIER 2009)

Stationsrestriktionen

Stationsbezogene Restriktionen sind zu berücksichtigen, wenn AVOs nur einer bestimmten Station zugeordnet bzw. nicht zugeordnet werden können. Hierbei können Betriebsmittel eine Rolle spielen, die aus Platz- oder Versorgungsgründen nur an einer bestimmten Station platziert sind und nicht, oder nur mit unangemessenem Aufwand, umgezogen werden können. Diese Restriktion kann auch durch die Materialbelieferung hervorgerufen werden, wenn beispielsweise aus Platzgründen nur ein bestimmter Bereich der Linie über das benötigte Lieferkonzept bedient werden kann (SCHOLL 1999, BOYSEN 2005).

Positionsrestriktionen

Positionsrestriktionen treten v. a. bei großen, schweren Werkstücken auf. Sie beschreiben zum einen die Festlegung der Orientierung des Werkstücks innerhalb eines Linienabschnitts, um aufwändige Wendeoperationen zu vermeiden. Insbesondere bei schweren Werkstücken kann eine Positionsänderung des Werkstücks mit hohem Aufwand verbunden sein, weshalb z. B. in der PKW-Industrie das Zusammenlegen von Unterbodenarbeiten angestrebt werden sollte (DOMSCHKE ET AL. 1997, SCHOLL 1999). Zum anderen können bei großen Werkstücken die verschiedenen Bereiche am Werkstück, an welchen der Montageprozess durchgeführt wird, eine Rolle spielen. Im Allgemeinen werden diese Restriktionen auch als Zonenbeschränkungen bezeichnet, im Automobilbau ist meist von der Fahrzeug- oder Karosserieansprache die Rede. Beispielsweise kann die Ansprache in vier Bereiche eingeteilt werden: vorne links, vorne rechts, hinten links und hinten rechts. Ziel ist es AVOs möglichst in einen Bereich oder in nebeneinander, gut zugänglichen Bereichen zuzuordnen, damit Laufwege reduziert und ein gegenseitiges Behindern der Mitarbeiter vermieden wird (BOGUSCHEWSKI ET AL. 1990, SCHOLL 1999, WEIB 2000).

Mitarbeiterrestriktionen

Die Verteilung der AVOs auf Arbeitsplätze hat auch einen direkten Einfluss auf die ausführenden Mitarbeiter. Dementsprechend führt dieser Zusammenhang zu Restriktionen bei der Zuordnung. Dabei ist v. a. die benötigte Qualifikation von Bedeutung. Einerseits sollen AVOs mit ähnlichen Qualifikationsanforderungen zusammengefasst werden, um die Mitarbeiter nicht zu überfordern bzw. um den Aufwand zur Qualifikation und gleichzeitig die Höhe der Entlohnung möglichst gering zu halten (DOMSCHKE ET AL. 1997, SCHOLL 1999). Andererseits ist dabei auch die Mitarbeiterzufriedenheit zu berücksichtigen, indem ein Mindestmaß an Komplexität und Abwechslung geboten wird, um die Werker nicht zu unterfor-

2 Theoretischer Hintergrund

dem (SCHOLL 1999, BOYSEN 2005). Zusätzlich stellen die körperlichen Belastungen der Mitarbeiter eine Restriktion im Rahmen der Austaktung dar. Ziel ist es, durch die Kombination der unterschiedlichen AVOs an einem Arbeitsplatz gute ergonomische Bedingungen zu erreichen (BOYSEN 2005, OTTO & SCHOLL 2011). Darüber hinaus müssen gesundheitliche Einschränkungen der zur Verfügung stehenden Belegschaft und deren Einsatzfähigkeit berücksichtigt werden (MIRALLES ET AL. 2008, MOREIRA ET AL. 2012, EGBERS 2013).

2.3.2.4 Einteilung von Problemstellungen und Lösungsverfahren der Austaktung

In der Wissenschaft werden bei der Formulierung von Problemstellungen und Lösungsverfahren der Austaktung v. a. theoretische Grundmodelle zu deren Beschreibung untersucht (BOYSEN 2005). Eine erste mathematische Formulierung des Austaktungsproblems erfolgte bereits durch SALVESON (1955). Darauf aufbauend wurden die Algorithmen immer weiter verfeinert und unterschiedliche Rahmenbedingungen und Restriktionen der Austaktung versucht abzubilden. Ausgangspunkt der Forschungstätigkeiten ist dabei das sog. „Simple Assembly Line Balancing Problem“ (SALBP). Es existieren unterschiedliche Formen des SALBP, die sich bezüglich ihrer Zielstellung unterscheiden (vgl. Abbildung 8, links).

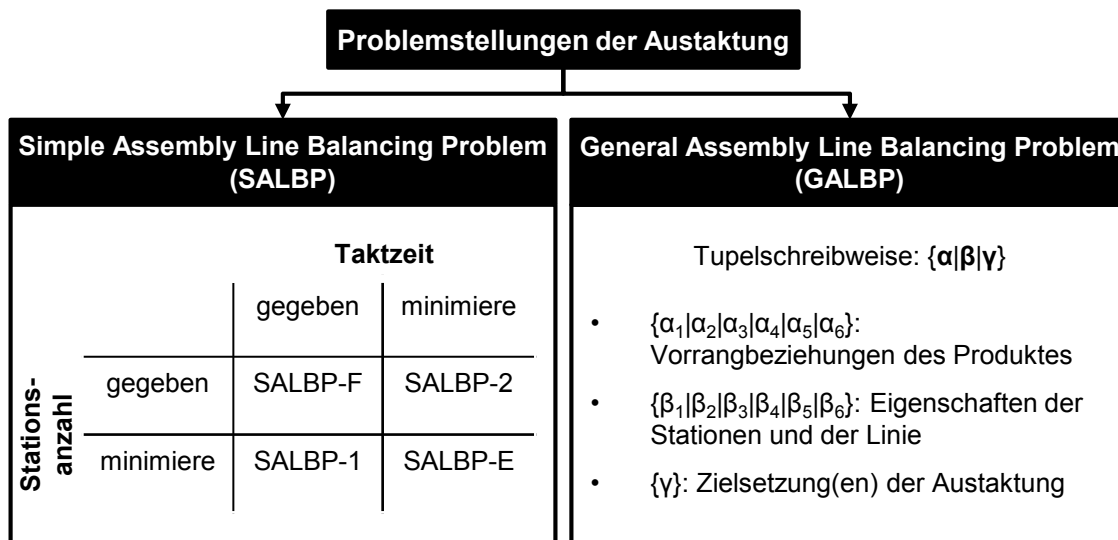


Abbildung 8: Einteilung der Problemstellungen der Austaktung (in Anlehnung an BOYSEN (2005, S. 62), BOYSEN ET AL. (2007))

Beim SALBP-1 soll bei gegebener Taktzeit die Anzahl an Stationen minimiert werden, während beim SALBP-2 die Zielsetzung genau umgekehrt vorliegt. Das SALBP-F²³ sucht bei gegebener Taktzeit und Stationsanzahl eine gültige Austaktung unter Berücksichtigung der Randbedingungen. Das SALBP-E²⁴ wiederum berechnet gleichzeitig die optimale Taktzeit und Stationsanzahl für eine möglichst hohe Auslastung der gesamten Linien (BAYBARS 1986, DOMSCHKE ET AL. 1997, BOYSEN 2005). Alle Formen des SALBPs gehen von folgenden Randbedingungen aus (BOYSEN 2005, BAYBARS 1986, DOMSCHKE ET AL. 1997, TRACHT & FUNKE 2011):

- Massenproduktion eines einzelnen Produktes
- Deterministische Bearbeitungsdauer der AVOs
- Keine Zuordnungsrestriktionen außer der Verbaureihenfolge
- Einseitig besetzte, lineare Montagelinie ohne Parallelbearbeitungen mit fester Taktzeit
- Identische Betriebsmittelausstattung an allen Stationen

Da diese Rahmenbedingungen in der Praxis und insbesondere in der Variantenfließmontage nicht vorliegen, besteht ein weiterer Forschungsschwerpunkt in dem „General Assembly Line Balancing Problem“ (GALBP). Dennoch wird auch weiterhin Forschung im Bereich des SALBP betrieben, da viele komplexere Algorithmen die Problemstellung auf ein Einprodukt-Problem reduziert, z. B. durch Verwendung eines Variantenvorranggraphen. Einen Überblick über die Vielzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema GALBP liefern BOYSEN ET AL. (2007), wobei sie insgesamt über 130 Publikationen untersuchen und unter Verwendung einer Tupelnotation in verschiedene Kategorien klassifizieren (vgl. Abbildung 8, rechts). Bei ihrer Einteilung spielen drei Elemente eine Rolle: die Charakteristika der Vorrangbeziehungen (α), die Charakteristika der Stationen und der Linie (β) sowie die Zielsetzungen (γ) (BOYSEN ET AL. 2007)²⁵. Die vorhandenen Beschreibungen des GALBPs betrachten unterschiedlichste Rahmenbedingungen, wobei insbesondere auch eine parallele Bearbeitung an einer Station und die Montage von Varianten berücksichtigt werden. Dennoch besteht weiterhin eine Lücke zwischen den theoretisch beschriebenen Problemstellungen und den Anforderungen der realen Austaktung von Montagelinien, da

²³ Das „F“ steht für feasibility, Englisch für Realisierbarkeit, Machbarkeit (BOYSEN 2005).

²⁴ Das „E“ steht für efficiency, Englisch für Effizienz, in diesem Zusammenhang auch Wirkungsgrad (BOYSEN 2005).

²⁵ Eine detaillierte Beschreibung der drei Elemente der Tupelschreibweise sowie deren unterschiedliche Attribute und Ausprägungen finden sich ebenfalls in BOYSEN ET AL. 2007.

2 Theoretischer Hintergrund

nicht alle relevanten Rahmenbedingungen gleichzeitig abbildbar sind (FALKENAUER 2005, BECKER 2007, BOYSEN ET AL. 2008).

Zur Lösung der Problemstellungen der Austaktung können unterschiedliche Verfahren Anwendung finden, die in der Literatur in drei Kategorien eingeteilt werden (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Einteilung von Lösungsverfahren zur Austaktung (in Anlehnung an KRATZSCH (2000, S. 19), LUTZ (1974, S. 23), SCHULTZ ET AL. (1995, S. 596))

	Probierv Verfahren	Heuristik	Exakte Verfahren
Prinzip	Austaktung durch Erfahrung des Planers	Austaktung durch einfache Vorschriften	Systematische Austaktung mit Algorithmen
Ergebnis	wenig optimal	suboptimal	optimal
Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> • einfache Anwendung • keine EDV 	<ul style="list-style-type: none"> • kurze Rechenzeiten • mit/ ohne EDV möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange Rechenzeiten • EDV erforderlich
Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Tabellen • Arbeitspläne 	<ul style="list-style-type: none"> • Eröffnungsverfahren • Verbesserungsverfahren • Neuronale Netze 	<ul style="list-style-type: none"> • Enumerationsverfahren • Branch and Bound • Lineare Programmierung

Diese Lösungsverfahren lassen sich hinsichtlich ihrer Anwendung, der eingesetzten Methoden sowie der zu erwartenden Ergebnisse wie folgt unterscheiden (KRATZSCH 2000, LUTZ 1974, SCHULTZ ET AL. 1995, GÖRKE 1978, BULLINGER 1986):

- *Exakte Verfahren* bilden das Austaktungsproblem in Gleichungssystemen ab und kommen durch Anwendung von Lösungsalgorithmen zu einer optimalen Lösung. Demzufolge ist zwingend EDV-Unterstützung erforderlich und alle relevanten Restriktionen müssen mit Hilfe von Gleichungen abbildbar sein.
- *Heuristiken* generieren aus einem einfachen Regelwerk mit Hilfe von Näherungsverfahren eine Lösung, weshalb sie nicht zwingend optimale Lösungen liefern. Sie sind mit geringem Rechenaufwand oder gar ohne EDV-Einsatz anwendbar.
- *Probierv Verfahren* berufen sich auf die Erfahrung der in den Austaktungsprozess eingebundenen Montageplaner und Werker. Sie sind durch eine

einfache Anwendung gekennzeichnet, führen aufgrund der Abhängigkeit von der Erfahrung und der Intuition der Mitarbeiter sowie der nicht exakt beschriebenen Lösungsfindung allerdings zu weniger optimalen Ergebnissen.

In der Praxis finden die exakten Verfahren aufgrund der zuvor beschriebenen Randbedingungen nur für die Lösung einfachster Problemstellungen Anwendung, wie z. B. zur Lösung von SALBPs. Für komplexere Problemstellungen ist zum einen der Aufwand zur Aufnahme aller relevanten, abbildbaren Randbedingungen zu hoch, wie z. B. ein vollständiger Variantenvorranggraph. Zum anderen sind eine Vielzahl an Restriktionen noch nicht ausreichend genau oder gleichzeitig in einem Gleichungssystem abbildbar bzw. sind diese nicht mittels Algorithmen lösbar (WEIß 2000, FALKENAUER 2005, REKIEK & DELCHAMBRE 2006, BECKER 2007, BOYSEN ET AL. 2007, HALUBEK 2012). Ähnliches bzgl. der Praxisanwendung gilt je nach Komplexität der hinterlegten Algorithmen auch für die Heuristiken. Dennoch findet ein Großteil der wissenschaftlichen Diskussion in diesen beiden Feldern statt (vgl. BOYSEN ET AL. 2007). Eine Austaktung bei unvollständig informationstechnischer Datenbasis unter Berücksichtigung des vorhandenen Erfahrungswissens findet hingegen, trotz der weiterhin hohen Relevanz in der Praxis, kaum Beachtung (MEDO 2010, HALUBEK 2012). Als Vorteile der Probiervverfahren kann dabei v. a. die implizite Berücksichtigung einer Vielzahl an Restriktionen genannt werden, die mit höherer Wahrscheinlichkeit zu einem real umsetzbaren Austaktungsergebnis führt. Gleichwohl ist der zeitliche Aufwand bei der Austaktung gerade in diesem Fall besonders hoch (WEIß 2000). Demzufolge besteht in diesem Bereich Bedarf in der Festlegung von Regelwerken zur Standardisierung der Planungsergebnisse von erfahrungsbasierten Probiervverfahren bei einer gleichzeitigen zeitlichen Reduzierung des Planungsaufwands und Beherrschung der steigenden Komplexität.

2.3.3 Personaleinsatzplanung zum flexiblen Umgang mit Varianten

Die Auslegung der Montagelinie auf eine Durchschnittsvariante im Rahmen der Austaktung führt dazu, dass aufwändige Varianten zu Kapazitätsspitzen führen, die oberhalb der vorgegebenen Taktzeit liegen (vgl. Abbildung 6, S. 24). Um kurzfristig auf diese punktuellen Überlastungen reagieren zu können, stehen im Rahmen der operativen Personaleinsatzplanung am Montageband unterschiedliche Maßnahmen zur Verfügung, die im Folgenden erläutert werden.

2.3.3.1 Drifteinsatz

Die wichtigste personalorganisatorische Maßnahme zum Ausgleich von Montagezeitschwankungen unterschiedlicher Varianten in der getakteten Montagelinie ist der *Drifteinsatz* (ALTEMEIER 2009). Mit Hilfe des Driftens wird es den Workern erlaubt, temporär auch Montage Tätigkeiten an einem Produkt auszuführen, die die Taktzeit überschreiten, indem sie entweder länger arbeiten und in die nächste Station abdriften oder bereits frühzeitig in der vorherigen Station beginnen (GANS ET AL. 2011, HALUBEK 2012, vgl. Abbildung 9). Die Möglichkeiten des Driftens sind stark abhängig von der Ausstattung der einzelnen Stationen und den daraus resultierenden Stationsgrenzen. In geschlossenen Stationen ist kein Drift durchführbar, da beispielsweise vorhandene, ortsfeste Betriebsmittel dies nicht erlauben. An offenen Stationen wiederum ist aufgrund der örtlichen Gegebenheiten ein Drifteinsatz möglich (GANS 2008). Bei einem vorgelagerten Driftbereich in die vorherige Station wird in diesem Zusammenhang von *linksoffenen* Stationsgrenzen bzw. von *Vorarbeit* gesprochen. *Rechtsoffene* Stationen wiederum erlauben eine *Nacharbeit* in den nachgelagerten Driftbereich der nachfolgenden Station (THOMOPOULOS 1967, MOLLEMEIER 1997, ALTEMEIER 2009, MÄRZ ET AL. 2012B).

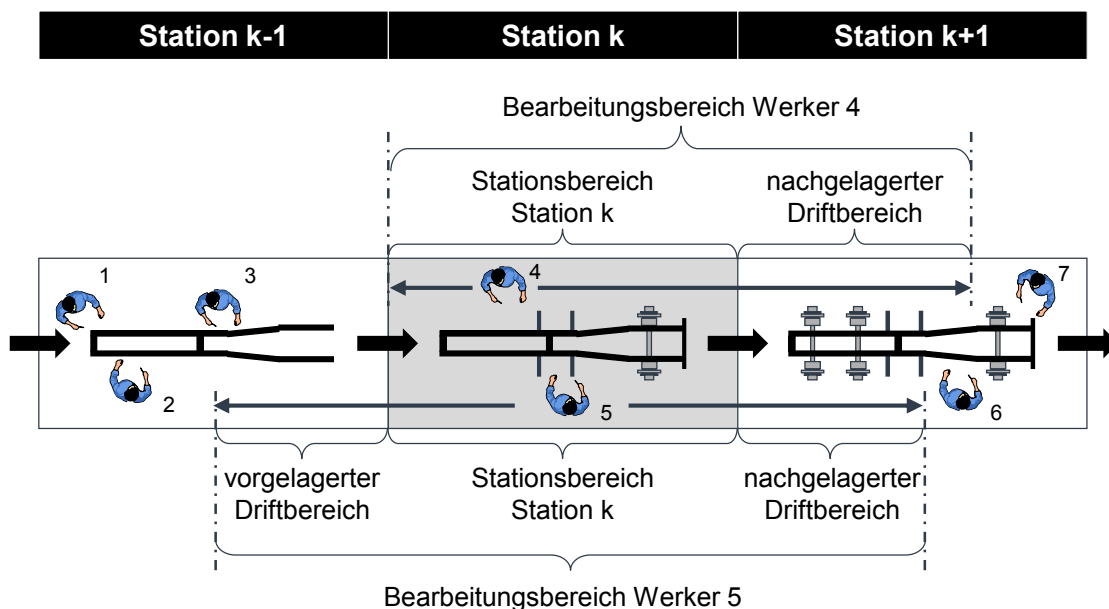


Abbildung 9: Driftmöglichkeiten der Worker in Abhängigkeit der Stationsgrenzen (MÄRZ ET AL. (2012B, S. 147), in Anlehnung an ALTEMEIER (2009, S. 12), EVERSHEIM & ABELE (2003, S. 66))

Neben den prinzipiellen Grenzen des Drifteinsatzes aufgrund physischer Gegebenheiten an der Montagelinie spielen natürlich auch arbeitsorganisatorische Aspekte bei der Ausführung von Driftvorgängen eine Rolle. Es müssen mehrere Kriterien erfüllt sein, damit der Werker tatsächlich driften kann (HECHL 1995, BECKER 2007, ALTEMEIER 2009):

- Der Werker kann aufgrund der aktuellen Fahrzeugreihenfolge seine Möglichkeiten zum Driften ausnutzen und verlässt nicht seinen zulässigen vor- und nachgelagerten Driftbereich.
- Alle zur Durchführung der Montagetätigkeit technologisch oder organisatorisch notwendigen vorherigen AVOs wurden bereits beendet.
- Alle Werker in den Stationen, in die gedriftet wird, haben im Bereich der betroffenen Fahrzeugansprache (vgl. Abschnitt 2.3.2.3 unter Positionsrestriktionen) keine parallelen Tätigkeiten auszuführen und werden somit nicht behindert.
- Auch Werker in anderen Fahrzeugbereichen werden durch den Überholvorgang nicht behindert, z. B. aufgrund des Platzbedarfs von Handhabungshilfen, Werkzeugwägen, etc..

Zusammenfassend müssen zum einen die strukturellen und organisatorischen Voraussetzungen geschaffen werden, um ein Driften ohne gegenseitige Behinderung zu ermöglichen. Zum anderen muss im Rahmen der operativen Programmplanung die Fahrzeugreihenfolge²⁶ derart erstellt werden, dass positives Driften bei aufwändigen Fahrzeugen durch ein negatives Zurückdriften bei aufwandsarmen Fahrzeugen ausgeglichen werden kann (HU ET AL. 2011). Abbildung 10 zeigt diesen Zusammenhang am Beispiel von vier Fahrzeugen. Das Abdriften aufgrund der höheren Arbeitsumfänge in Fahrzeug 1 wird durch die beiden nachfolgenden Fahrzeuge mit geringerem Umfang kompensiert. Somit driften der Werker wieder zu seiner Ausgangsposition zurück und hat sogar noch eine kurze Wartezeit, bevor er für Fahrzeug 4 wieder die vollständige Taktzeit benötigt. Dieses letzte Fahrzeug ist allerdings so aufwändig, dass selbst der vorhandene Driftbereich nicht ausreicht und zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind, wie im Folgenden erläutert wird.

²⁶ Erläuterungen zur Reihenfolgeplanung erfolgen in Abschnitt 2.3.4.

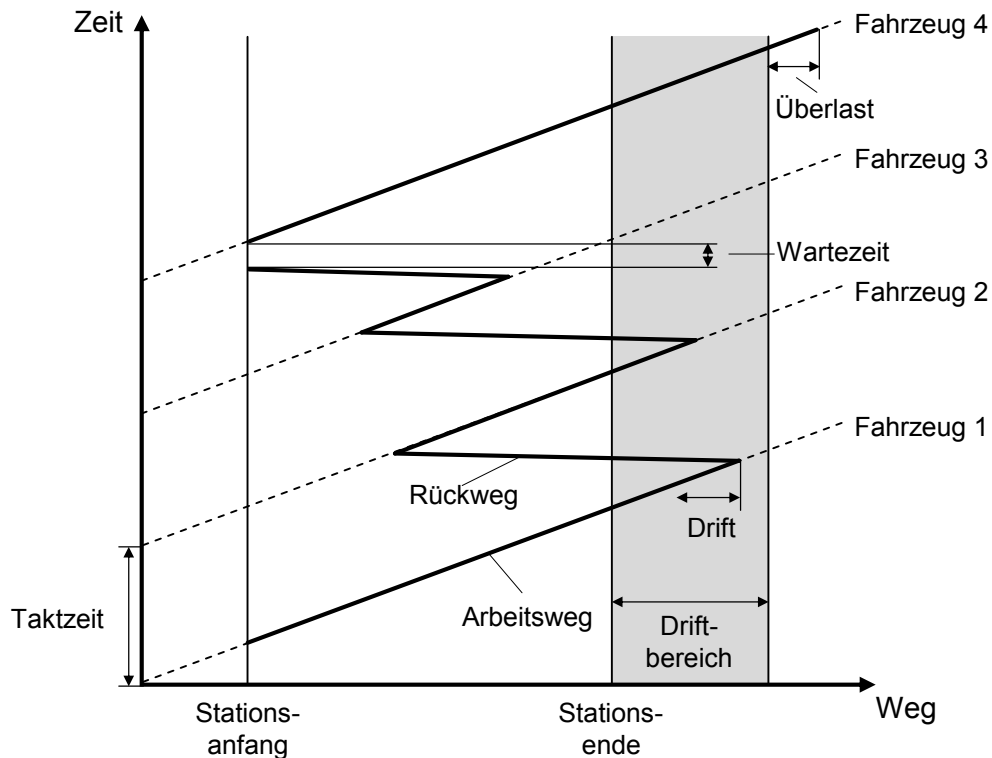


Abbildung 10: Zeitverlauf der Werkerposition beim Driften (in Anlehnung an MOLLEMEIER (1997, S. 12), BOCK (2000, S. 14), GANS (2008, S. 10), REINHART & PRÖPSTER (2012, S. 406))

2.3.3.2 Springereinsatz

Wie aus Abbildung 10 deutlich wird, besteht in einer variantenreichen Montagelinie je nach Auslastungssituation der Bedarf auch mit Kapazitätsspitzen umgehen zu können, die über die Driftgrenzen der Stationen hinausgehen. Um die daraus resultierende Überlastung kurzfristig zu bewältigen, können sog. „Springer“²⁷ eingesetzt werden. Ein Springer ist „eine zusätzliche Arbeitskraft, die in Problemfällen oder bei Überlastungen eines Arbeitsplatzes kurzfristig eingesetzt wird“ (WEIß 2000, S. 26). Dementsprechend werden hierzu Mitarbeiter benötigt, „die bereit und dazu fähig sind, an unterschiedlichen Stationen eingesetzt zu werden“ (DECKER 1993, S. 14). Diese Aufgabe können Springer aus unterschiedlichem Kapazitätsbedarf heraus übernehmen (MAYRHOFER ET AL. 2011, MÄRZ ET AL. 2011A):

- Einsatz zum Abdecken von Kapazitätsspitzen an einzelnen Stationen

²⁷ Synonyme: Unterstützer oder Spitzenbrecher (ALTEMEIER 2009, HALUBEK 2012)

- Einsatz für Varianten mit hohen Kapazitätsanforderungen durch Bearbeiten der Variante entlang der gesamten Montagelinie oder eines Abschnitts der Linie
- Einsatz bei seltenen, komplexen Varianten, die eine spezielle Qualifikation erfordern
- Einsatz als Ersatz für temporär abwesende Werker, z. B. zum Toiletten-gang

Zur Organisation des Springereinsatzes bestehen verschiedene Möglichkeiten. DECKER (1993) unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen internen und externen Springern. *Interne Springer*, auch lokale Springer genannt, sind einer Station des Montagebands fest zugeordnet und helfen an benachbarten Stationen aus, solange das ihre eigene Auslastungssituation zulässt (DECKER 1993). Diese Art des Springereinsatzes kann ebenfalls über eine personal-organisatorische Verknüpfung von Stationen des getakteten Montagebandes und bandnahen Vormontagen²⁸ erfolgen, indem Mitarbeiter aus den, meistens weniger taktgebundenen, Vormontagen unterstützen (VÖLKER ET AL. 2010). Demgegenüber sind *externe Springer* nicht direkt einer Station zugeordnet, sondern sind für einen gewissen Abschnitt der Montagelinie qualifiziert und können dort temporär an den unterschiedlichen Stationen unterstützen. Somit zeichnen sich diese Springer durch eine größere Einsatzfähigkeit und durch zusätzliche Kapazität für die Montagelinie aus (DECKER 1993).

Eine weitere Differenzierung des Springereinsatzes liefert ALTEMEIER (2009). Wird der Springer erst hinzugezogen, wenn der Stammmitarbeiter seine Driftgrenzen erreicht hat, liegt ein *reaktiver Springereinsatz* vor. Beim *präventiven Springereinsatz* wiederum wird der Springer bereits im Voraus Fahrzeugen zugeteilt, die den Werker überlasten würden. Diese Fahrzeuge werden dementsprechend entweder vollständig vom Springer übernommen (ALTEMEIER 2009) oder der Springer übernimmt präventiv einige Arbeitsinhalte des Werkers, um eine Überlastung zu vermeiden (MÄRZ ET AL. 2012A). Der reaktive Springereinsatz zeichnet sich durch einen geringen Steuerungsaufwand aus, führt aber aufgrund der Übergabe von Tätigkeiten auch ggf. zur doppelten Ausführung von vorbereitenden Aufgaben. Der präventive Einsatz wiederum entlastet den Werker nachhaltiger, allerdings ist hierfür eine systematische Unterstützung zur Bestimmung des Einsatzes zwingend erforderlich (ALTEMEIER 2009).

²⁸ In Vormontagen werden Baugruppen oder Module montiert, die anschließend in der Hauptmontagelinie an das Endprodukt gefügt werden (KRATZSCH 2000, BECKER 2007).

2 Theoretischer Hintergrund

Nachteile am Einsatz von Springern stellen im Allgemeinen der hohe Qualifizierungsaufwand und damit einhergehend die höheren Lohnkosten dar, die aufgrund der Beherrschung eines größeren Spektrums an Montagetätigkeiten und der vergleichsweise geringeren Auslastung anfallen (WILLNECKER 2001). Dementsprechend gilt es aus wirtschaftlichen Gründen den Springereinsatz möglichst zu minimieren. Ziel muss es dabei sein, nicht die Anzahl an Springereinsätzen zu verringern, sondern die Anzahl an benötigten Springern an sich, da diese primär den monetären Aufwand erzeugen. Die Anzahl an Springereinsätzen unabhängig von der Anzahl an Springern hat nur einen geringen, schwer quantifizierbaren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Ein Beispiel hierfür ist die zusätzlichen Unruhe im Montagesystem, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Qualitätsproblemen und Nachbesserungen steigen kann (ALTEMEIER ET AL. 2010). Der Springereinsatz ist bereits fester Bestandteil moderner Produktionssysteme, wie beispielsweise im Toyota Produktionssystem (KOTANI ET AL. 2004). Allerdings ist er nicht nur aufgrund der wirtschaftlichen Gesichtspunkte, sondern auch aufgrund der schwierigen Planbarkeit des präventiven Einsatzes und des hohen Steuerungsaufwands in der Praxis der Automobilmontage noch nicht vollumfänglich verbreitet (HALUBEK 2012).

2.3.3.3 Weitere organisatorische Maßnahmen zum Umgang mit Varianten in der Montage

Zusätzlich zum Drift- und Springereinsatz bestehen noch weitere organisatorische Maßnahmen zum Umgang mit auftretenden Variantenspitzen, die aufgrund ihrer geringeren Praxisrelevanz hier nur kurz gesondert erläutert werden.

BARTHOLDI & EISENSTEIN (1996) beschreiben erstmals eine Art der Mitarbeiterorganisation, die eine sich selbst austaktende Montagelinie zur Folge hat, die sog. „**Bucket Brigades**“. Der Begriff ist an den Eimerketten zur Brandbekämpfung im Mittelalter angelehnt, als ein Mitglied der Menschenkette nach Übergabe des Wassereimers sofort seinem Vorgänger entgegenlief, um den nächsten Eimer zu übernehmen. Analog erfolgt die Bearbeitung in der Montagelinie: Der Werker bearbeitet das Montageobjekt solange, bis er auf seinen Nachfolger stößt, um es an diesen zu übergeben und dementsprechend dem eigenen Vorgänger entgegenzugehen, um von ihm zu übernehmen. Dieses Konzept ist sehr eingeschränkt einsetzbar, da eine hohe Mitarbeiterqualifikation erforderlich ist, keine hohe Abhängigkeit von ortsfesten Betriebsmitteln vorliegen darf und kein standardisierter Montageprozess für die unterschiedlichen Varianten vorliegt. Anwendung

findet das Konzept daher v. a. in der Logistik, z. B. bei der Kommissionierung (BOYSEN 2005, BARTHOLDI ET AL. 2006, HIROTANI ET AL. 2006, ARMBRUSTER ET AL. 2007).

Eine weitere Möglichkeit stellt das kurzfristige Anhalten des Montagebandes im Rahmen eines **Bandstopps** dar. Hierbei wird die gesamte Montagelinie gestoppt und die Variantenspitze abgearbeitet. Somit entstehen Leerzeiten an allen nicht betroffenen Stationen. Deshalb ist diese Maßnahme in der Praxis als letztes Mittel zur Reaktion auf Kapazitätsschwankungen zu sehen und nur bei sehr kurzen Linien sinnvoll einsetzbar, da in diesem Fall ggf. die Kosten für Springer höher liegen könnten als für einen kurzen Stopp des gesamten Bands (WEIB 2000, ALTEMEIER 2009, HALUBEK 2012). Der Bandstopp ist zwar beispielsweise ein wichtiger Bestandteil des Toyota Produktionssystems, um mit hoher Deutlichkeit Probleme im Montageprozess aufzudecken. Allerdings steht hier insbesondere das Thema Qualität im Vordergrund (MONDEN 1998). Auch Toyota versucht mittels Springereinsatz variantenbedingten Bandstopp zu vermeiden (KOTANI ET AL. 2004).

Sehr geringe, punktuelle Überlastungen können ggf. auch direkt durch eine **kurzfristige Leistungssteigerung** der Mitarbeiter abgedeckt werden. Diese Maßnahme ist aus arbeitswissenschaftlicher Sicht allerdings zu vermeiden, da sie zu erhöhtem Stress bei den Werkern und somit kurzfristig zu steigenden Qualitätsproblemen und -kosten und langfristig zu Gesundheitsschädigungen führen kann (MOLLEMEIER 1997).

Eine letzte Möglichkeit besteht in der **Nacharbeit am Ende der Montagelinie**. Obwohl die Montageaufgabe an einer Station nicht vollendet werden konnte, wird das Produkt an die nächste Station übergeben. Somit können ab diesem Zeitpunkt nur noch Montagevorgänge durchgeführt werden, die nicht mit dem unbearbeiteten Montageprozess im Zusammenhang stehen. Alle weiteren Montageschritte erfolgen am Ende der Montagelinie in einem Nacharbeitsbereich (HALUBEK 2012). Dadurch erhöhen sich sowohl die Montagekosten als auch die Durchlaufzeit, weshalb diese Maßnahme meist eine unwirtschaftliche Alternative darstellt.

Die in diesem Abschnitt genannten Maßnahmen zum Umgang mit Kapazitätsspitzen haben alle einen negativen Einfluss sowohl auf die Montagequalität als auch auf die Montagekosten. Dementsprechend gilt es, insbesondere geeignete Rahmenbedingungen zur Ausnutzung der vorhandenen Driftmöglichkeiten zu schaffen, da es sich hierbei um die kostengünstigste Alternative handelt. Bei

2 Theoretischer Hintergrund

einer hohen Variantenvielfalt mit hoher Zeitspreizung erscheint zusätzlich der Einsatz von Springern erforderlich und sinnvoll, wobei eine möglichst geringe Anzahl an Springern vorzusehen ist.

2.3.4 Reihenfolgeplanung

Um den unterschiedlichen Kapazitätsanforderungen an den verschiedenen Stationen bei der Vielzahl an Varianten mittels Drift und mit möglichst geringem Springereinsatz gerecht zu werden, spielt die Reihenfolge der eingesteuerten Montageobjekte eine bedeutende Rolle. Mit steigender Anzahl an Varianten und an betrachteten Stationen wächst die Komplexität, wie Abbildung 11 verdeutlicht. Sie zeigt beispielhaft die Kapazitätsschwankungen an einzelnen Stationen einer Montagelinie in Abhängigkeit der Fahrzeuge. Die unterschiedlichen Farben symbolisieren dabei unterschiedliche Fahrzeugvarianten, die von Takt zu Takt eine Station weiter transportiert werden. Um mit den Schwankungen in der Prozesszeit umgehen zu können, ist die Planung der eingesteuerten Reihenfolge von hoher Bedeutung für den Montageablauf.

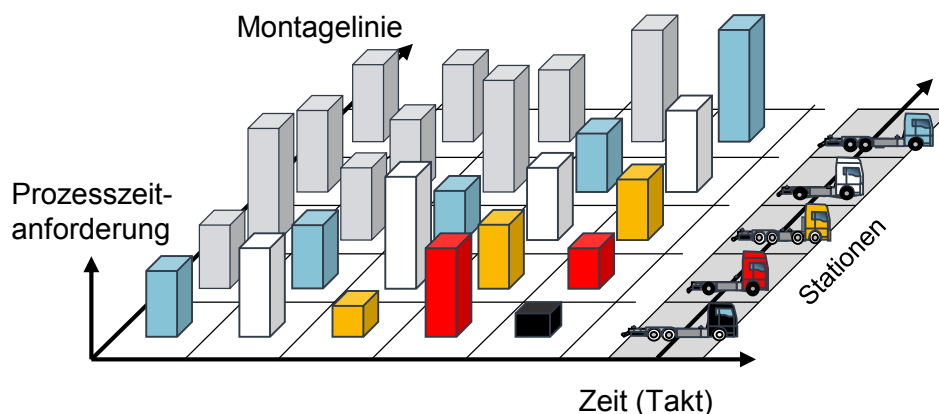


Abbildung 11: Prozesszeitanforderungen einer variantenreichen Montagelinie in Abhängigkeit der Produktreihenfolge (in Anlehnung an DOMBROWSKI & MEDO (2006, S. 716))

„Die Reihenfolgeplanung beschäftigt sich mit der Festlegung der Produktionsreihenfolge für die während des Planungszeitraums aufzulegenden Produkteinheiten. (...) Im Allgemeinen wird im Rahmen der Reihenfolgenplanung vorausgesetzt, (...) [dass] die bereits aufgeführten Aufgaben der Linienplanung bzw. der Leistungsabstimmung bereits erfolgt sind und im Rahmen der Reihenfolgeplanung nicht mehr verändert werden“ (MOLLEMEIER 1997, S. 16f). Die Reihenfolge der Produkte wird oftmals auch als „Perlenkette“ bezeichnet, wobei eine

2.3 Planung variantenreicher Montagelinien

Perle symbolisch für ein einzelnes Produkt steht. Dieser bildhafte Begriff zeigt außerdem, dass zu einem gewissen Zeitpunkt die Reihenfolge fest vorgegeben ist. Der Zeitraum zwischen dieser Festlegung bis hin zur Bandaufgabe wird als „Frozen-Zone“ oder „Frozen-Period“ bezeichnet (WEYER 2002, STATKEVICH 2012). Mit Hilfe der Reihenfolgeplanung bzw. der Perlenkettenbildung werden somit nicht nur die genaue Bearbeitungsreihenfolge, sondern auch der exakte Produktionstermin sowie die spezifischen Produktionsinhalte der einzelnen Aufträge am jeweiligen Produktionstag festgelegt (WEYER & SPATH 2001). Diese Art des Produktionssteuerungskonzepts für getaktete Montagelinien ist in der deutschen Automobilindustrie weit verbreitet und etablierter Standard (WEYER & SPATH 2009, STATKEVICH 2012). Abbildung 12 ordnet die Reihenfolgeplanung (engl.: *sequencing*) in den mittel- bis kurzfristigen Horizont der Programmplanung ein.

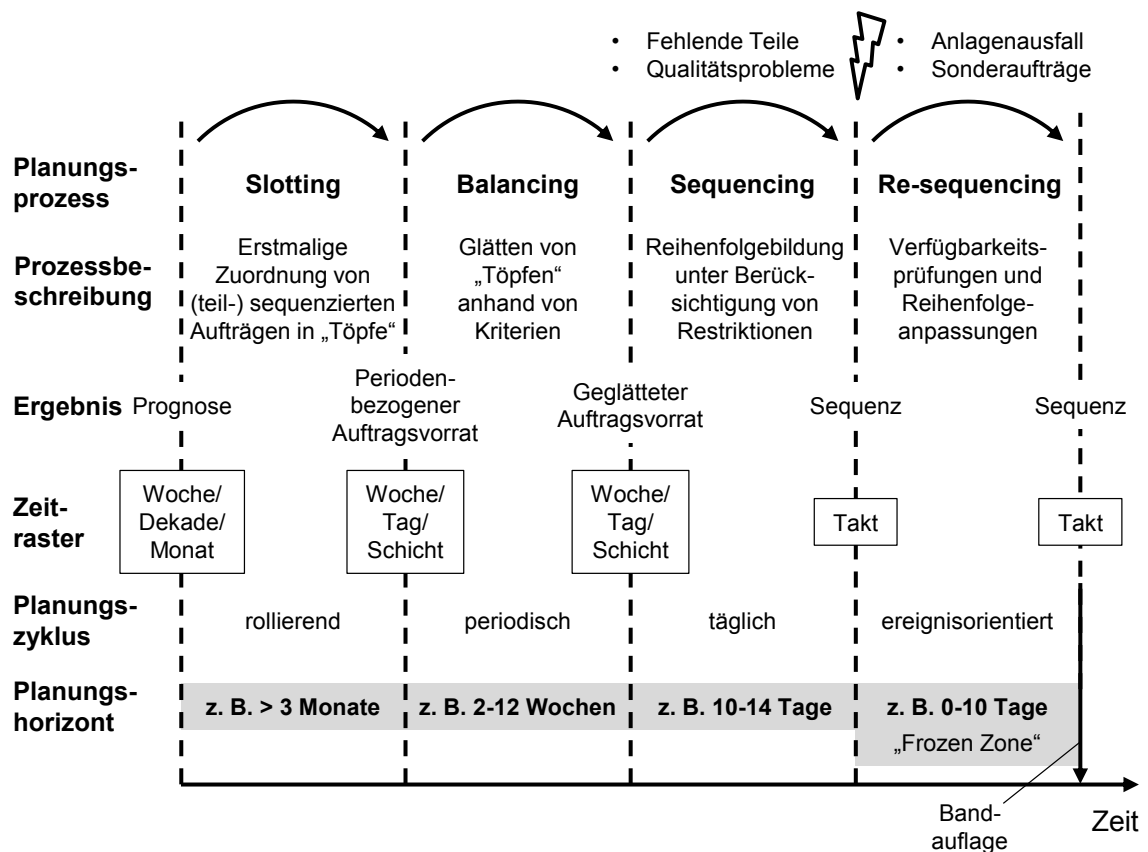


Abbildung 12: Zeitlicher Ablauf der mittel- bis kurzfristigen Programmplanung (in Anlehnung an MÄRZ ET AL. (2011A, S. 136))

2 Theoretischer Hintergrund

Aufbauend auf Prognosen²⁹ werden im Rahmen des *Slottings* Aufträge bestimmten „Töpfen“ zugeordnet, beispielsweise gruppiert in Kalenderwochen oder Tagen. Die einzelnen Aufträge dieser gruppierten Töpfe werden anschließend im *Balancing* mit Hilfe von Kriterien auf feinere Zeiträume aufgeteilt, wie auf Tage oder Schichten. Ein Beispiel für ein Kriterium kann sein, dass nur ein bestimmter Prozentsatz der Aufträge ein gewisses Ausstattungsmerkmal besitzen darf. Diese Glättung ist Voraussetzung für das anschließende *Sequencing*, das diese Aufträge wiederum in einer konkreten Reihenfolge anordnet und somit den genauen Zeitpunkt der Einsteuerung festlegt. Unvorhergesehene Ereignisse, wie z. B. Lieferengpässe oder eine Anlagenstörung, können ggf. nochmals zu einem *Re-Sequencing* der fertigen Perlenkette führen (MÄRZ ET AL. 2011A, MAYRHOFER ET AL. 2011).

Zur Lösung der Problemstellung der Reihenfolgeplanung existieren unterschiedliche Vorgehensweisen mit verschiedenen Zielstellungen (BOYSEN 2005, BOYSEN ET AL. 2009, MÄRZ ET AL. 2011A und HALUBEK 2012):

- Das *Level-Scheduling* verfolgt einen materialflussorientierten Ansatz, der auf das Toyota-Produktionssystem zurückzuführen ist (MONDEN 1998). Ziel ist es, den Materialbedarf möglichst gleichmäßig zu verteilen, damit auch vorgelagerte Produktionsstufen geglättet werden.
- Das überlastungsorientierte *Mixed-Model Sequencing* berücksichtigt die exakten Bearbeitungszeiten der unterschiedlichen Varianten sowie die Taktzeit und versucht reihenfolgebedingte Überlastungen an den Stationen bzw. bei den Werkern zu minimieren, indem möglichst nur die Driftmöglichkeiten ausgenutzt werden.
- Beim *Car-Sequencing* stehen ebenfalls reihenfolgebedingte Überlastungen im Fokus. In diesem Fall werden allerdings keine Bearbeitungszeiten betrachtet, sondern ausstattungsorientierte Regeln zur Reihenfolgebildung aufgestellt. Diese beinhalten für montagerelevante Ausstattungsvarianten Mindestabstände, die bei der Reihenfolgebildung einzuhalten sind. Ein Beispiel kann sein, dass eine bestimmte Motorisierungsvariante nur höchstens bei jedem dritten Fahrzeug auftreten darf.

Die überlastorientierten Ansätze sind für die vorliegende Aufgabenstellung besonders relevant. Eine Vielzahl von Varianten oder eine lange Montagelinie erschwert eine Umsetzung des Mixed-Model Sequencings stark. Da mithilfe des

²⁹ Einen Überblick zu Prognoseverfahren liefern MAKRIDAKIS ET AL. (1980) und WIEDEMANN (1990).

2.4 Auswirkungen von Nachfrageschwankungen auf variantenreiche Montagelinien

Car-Sequencings die Reihenfolgeplanung informationstechnisch handhabbarer wird, hat sich dieses Verfahren in der industriellen Praxis in Westeuropa durchgesetzt (DECKER 1993, MÄRZ ET AL. 2011A).

Aufgrund der hohen Praxisrelevanz beschäftigt sich die Wissenschaft sehr intensiv mit der Erforschung von Problemstellungen und Lösungsalgorithmen zur Reihenfolgeplanung unter verschiedensten Rahmenbedingungen. Einen Überblick über die Literatur liefern hierzu BOYSEN (2005), BOYSEN ET AL. (2009) und ALTEMEIER (2009). Aufgrund der Vielzahl an unternehmensspezifischen Einflussgrößen ist eine allgemeingültige Lösung des Reihenfolgeproblems allerdings nicht realistisch umsetzbar (WEIB 2000). In diesem Zusammenhang geben WEYER & SPATH (2009) Empfehlungen zur Realisierung des Perlenkettenkonzepts und gehen auf mögliche Hürden bei dessen Implementierung ein.

Zusammenfassend kann die Reihenfolgeplanung und somit die Festlegung der Perlenkette als Standardvorgehen in der Automobilindustrie angesehen werden. Aufgrund der Komplexität des Problems erfolgt die Festlegung der Reihenfolge meist aufgrund von Ausstattungsmerkmalen (= Car-Sequencing), wobei indirekt Belange bzgl. des Drift- und Springerverhaltens berücksichtigt werden können, allerdings keine konkreten Aussagen über mögliche Engpässe an einigen Stationen vorliegen. Die Reihenfolgeplanung stellt somit eine wichtige Rahmenbedingung zur Beherrschung der Variantenvielfalt in getakteten Montagelinien dar.

2.4 Auswirkungen von Nachfrageschwankungen auf variantenreiche Montagelinien

2.4.1 Überblick

Die wirtschaftliche Auslegung der Montagelinie ist maßgeblich durch das zu produzierende Produktionsprogramm beeinflusst. Allerdings können Montagelinien in der Regel nicht einmalig auf ein Nachfrageszenario ausgelegt werden, da aufgrund der Globalisierung und gesättigter Märkte ein dynamisches Umfeld mit hohen, schwer prognostizierbaren Schwankungen in der Nachfrage vorherrscht (KRÜGER 2004, ABELE ET AL. 2006, REINHART & SCHELLMANN 2012). Eine Nivellierung der Nachfrage zugunsten einer konstanten Belastung der Montagelinien ist bei diesen unvorhersehbaren Schwankungen und einer hohen Variantenzahl kaum möglich (HÜTTMEIR ET AL. 2009). Dementsprechend müssen Montagelinien an die Nachfrage angepasst werden können.

2 Theoretischer Hintergrund

Im Bereich der Austaktung ergeben sich zwei Arten von Nachfrageschwankungen, die sich hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Auslastung der Montagelinien unterscheiden (GOTTSCHALK 2007, OJHA ET AL. 2013, REINHART & PRÖPSTER 2012): *Variantenmix-* und *Stückzahlschwankungen* (vgl. Abbildung 13).

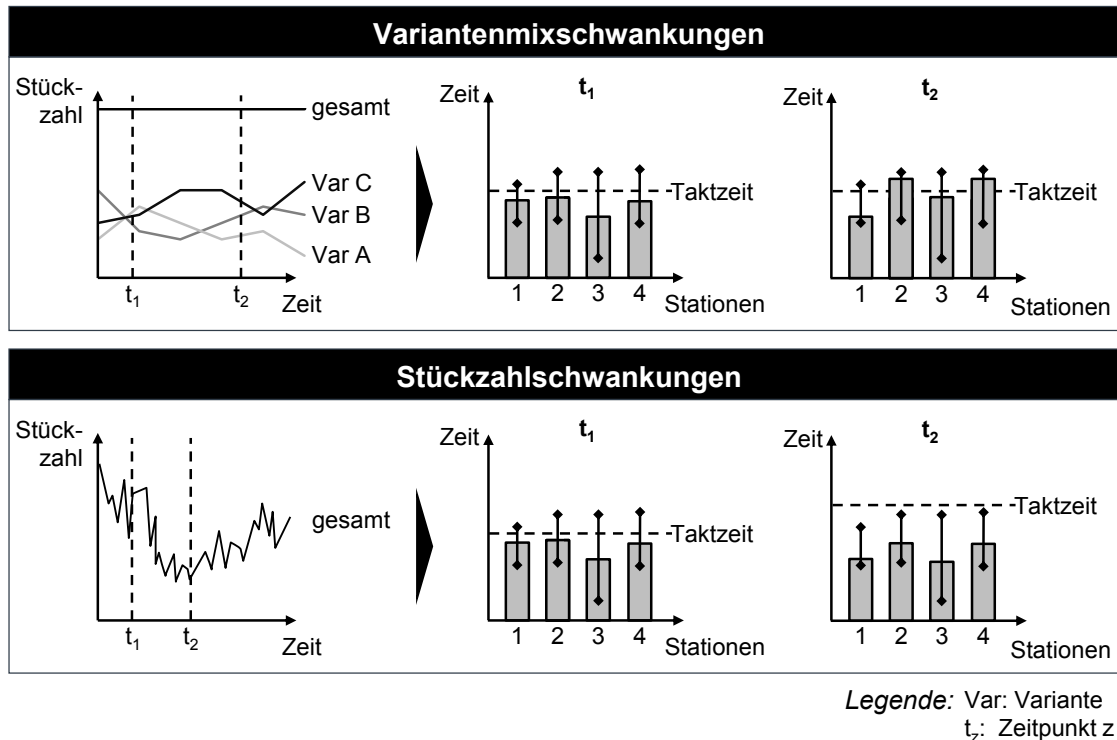


Abbildung 13: Einfluss von Variantenmix- und Stückzahlschwankungen auf die Auslastung variantenreicher Montagelinien (in Anlehnung an PRÖPSTER & REINHART (2013, S. 178))

Damit sich die hohen Investitionen in Montagelinien schnell amortisieren und sie eine hohe Produktivität aufweisen, ist eine hohe Auslastung unerlässlich (WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2002). In diesem Zusammenhang zeigen Studien eine direkte Korrelation zwischen der Auslastung und der Umsatzrendite von Unternehmen (ROSCHE 2007), weshalb die Veränderung der Auslastung der Montagelinie die wirtschaftlichen Folgen von Nachfrageschwankungen verdeutlicht. Die unterschiedlichen Auswirkungen der beiden Arten von Nachfrageschwankungen, die in Abbildung 13 dargestellt sind, werden im Folgenden genauer erläutert.

2.4.2 Auswirkungen von Variantenmixschwankungen

Variantenmixschwankungen sind durch eine Veränderung der Stückzahl der nachgefragten Varianten gekennzeichnet, während die Gesamtstückzahl identisch bleibt (GOTTSCHALK 2007, ROSCHER 2007). Somit ist keine Anpassung der Taktzeit notwendig, da sich die benötigte Produktionsmenge der Montagelinie nicht verändert. Aufgrund der Austaktung auf ein Durchschnittsprogramm (vgl. Abbildung 6, S. 24) führen die Schwankungen im Variantenmix dazu, dass sich die durchschnittliche Auslastung an denjenigen Stationen verändert, deren Montagezeiten von den betroffenen Varianten beeinflusst werden. Dementsprechend sind v. a. Stationen mit hohen variablen Inhalten und einer hohen Variantenspreizung betroffen (DOMBROWSKI & MEDO 2006). Abbildung 13 (oben) verdeutlicht diesen Zusammenhang beispielhaft. Durch die Schwankungen im Variantenmix weisen die Stationen 2, 3 und 4 eine höhere durchschnittliche Auslastung auf, während Station 1 geringer ausgelastet ist. Bereits dieses einfache Beispiel zeigt, dass ein hoher Umplanungsaufwand notwendig ist, um einen wirtschaftlichen Betrieb der Montagelinie aufrechtzuerhalten. Durch die veränderte Auslastungssituation und die Überlastung einiger Stationen reichen die Driftgrenzen zur Beherrschung der Variantenvielfalt nicht mehr aus und vermehrter Springereinsatz ist notwendig. Gleichzeitig sind auch unterausgelastete Stationen entstanden. Somit ist eine erneute Austaktung der Stationen erforderlich, deren Auslastung zu gering oder zu hoch ist, um die Montagelinie weiterhin wirtschaftlich betreiben zu können.

2.4.3 Auswirkungen von Stückzahlschwankungen

Stückzahlschwankungen haben mittelfristig eine Anpassung der Taktzeit zur Folge. Zwar kann auf eine veränderte quantitative Nachfrage auch mit Hilfe weiterer Kapazitätsanpassungsmaßnahmen reagiert werden, wie beispielsweise eine Änderung der Schichtdauer, der Arbeitstage oder der Schichtanzahl. Diese Maßnahmen können aber aufgrund der Rahmengrenzen von Arbeitszeitkonten oder aufgrund der Verfügbarkeit von Personal für eine zusätzliche Schicht nicht immer kurzfristig angewandt werden (RALLY & HÄMMERLE 2010, GOTTSCHALK 2007, PRÖPSTER ET AL. 2013)³⁰. Dementsprechend stellt die Anpassung der Taktzeit als Werkzeug der Austaktung eine weitere Möglichkeit dar.

³⁰ Auf eine detaillierte Erläuterung von Methoden und Werkzeugen zur Kapazitätsplanung und -anpassung wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Einen Literaturüberblick im Kontext der Automobilindustrie liefern hierzu VOLLING ET AL. (2013).

2 Theoretischer Hintergrund

Fließlinien werden technisch häufig zunächst auf eine minimale Taktzeit ausgelegt, die die Maximalkapazität der Linie vorgibt, während sie tatsächlich meist mit einer höheren Taktzeit betrieben werden. Somit soll der Montagelinie eine gewisse Taktzeitflexibilität ermöglicht werden (BAUDIN 2002). Die tatsächliche Anpassung der Taktzeit ist allerdings dennoch mit hohem Aufwand verbunden, insbesondere bei einer großen Anzahl an Stationen (WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2002). Das ist damit zu begründen, dass alle Stationen der Linie gleichermaßen von der Taktzeitänderung betroffen sind (vgl. Abbildung 13 unten) und somit die komplette Montagelinie umgetaktet werden muss. Somit ist die Taktzeitanpassung im Planungsaufwand vergleichbar mit einer Neuaustaktung (ROSCHE 2007).

Abbildung 14 stellt den Einfluss von Taktzeitänderungen auf eine getaktete Montagelinie grafisch in einer Sägezahnkurve dar. Unter der Annahme, dass die Zuordnung von Arbeitsinhalten unverändert bleibt, zeigt sich, dass aufgrund der ganzzahligen Zuordnung von Mitarbeitern zu Arbeitsstationen beim Senken der Taktzeit und gleichzeitigem Erreichen der Auslastungsgrenze sprunghaft die Anzahl der benötigten Mitarbeiter je Station steigt. Damit ist automatisch auch eine deutliche Verschlechterung der Auslastung verbunden. Es wird deutlich, dass bei einer bestehenden Konfiguration an einer Station nur bestimmte Taktzeiten optimal sind (vgl. Abbildung 14, oben).

Bei einer getakteten Montagelinie ergeben sich somit für jede Station eigene Sägezahnkurven, die aufgrund der unterschiedlichen Zuordnung von Arbeitsinhalten und Werkern unterschiedliche Verläufe aufweisen. Eine durchschnittliche Betrachtung aller Stationen durch Überlagerung deren einzelner Auslastungskurven (vgl. Abbildung 14, unten) führt folglich zu keiner einheitlichen Auslastung (LUTZ 1974, MEDO 2010). Da die erneute Austaktung der gesamten Montagelinie mit hohem Aufwand verbunden ist und dementsprechend bei mangelnder Planungszeit nicht immer vollständig im Detail durchgeführt wird, haben Taktzeitänderungen in der Praxis oftmals hohe Produktivitätsverluste zur Folge, insbesondere bei einer Vielzahl an zu berücksichtigenden Varianten (ROSCHE 2007).

Um sowohl die Variantenmix- als auch die Stückzahlflexibilität zu erhöhen und kurzfristiger auf Marktveränderungen reagieren zu können, müssen beide zuvor beschriebenen Arten der Nachfrageschwankung bereits im Rahmen der Austaktung berücksichtigt werden, um den Aufwand der Anpassung im auftretenden

2.5 Herausforderungen der Austaktung in der Nutzfahrzeugmontage

Fall zu minimieren. Somit ist es von hoher Bedeutung, beide Arten gleichzeitig zu betrachten, da sie sich gegenseitig beeinflussen.

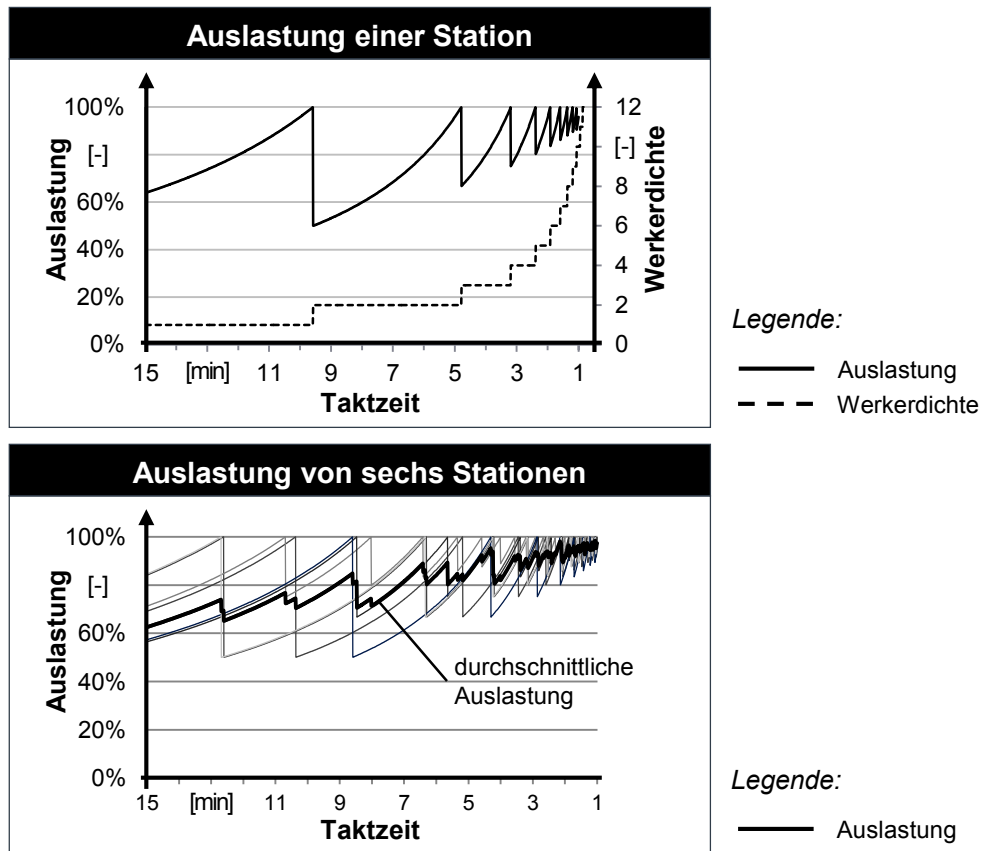


Abbildung 14: Einfluss von Taktzeitanpassungen auf die Auslastung einer Montagestation (in Anlehnung an MEDO (2010, S. 100)) bzw. einer getakteten Montagelinie mit sechs Stationen (in Anlehnung an PRÖPSTER & REINHART (2013, S. 179))

2.5 Herausforderungen der Austaktung in der Nutzfahrzeugmontage

Variantenreiche Montagelinien sind in der Automobilindustrie weit verbreitet (BECKER 2007, MEDO 2010). Dementsprechend bezieht sich auch ein Großteil der Forschungsaktivitäten zur Austaktung variantenreicher Montagelinien auf diese Branche. Exemplarisch seien stellvertretend für die Vielzahl an Publikationen WEIB (2000), BECKER (2007), ALTEMEIER (2009), WEYAND (2010) und HALUBEK (2012) genannt. Dennoch ist die Austaktung variantenreicher Montagelinien ebenfalls für andere Branchen, wie beispielsweise für die Luftfahrt (HEIKE ET AL. 2001), die Produktion von Landmaschinen (DECKER 1993) oder

2 Theoretischer Hintergrund

den Werkzeugbau (ZWANZIG 2010), relevant und es stehen individuell an die Rahmenbedingungen dieser Branchen angepasste Werkzeuge und Methoden zur Austaktung zur Verfügung. Auch die Nutzfahrzeugbranche stellt aufgrund ihrer unterschiedlichen Rahmenbedingungen andere Anforderungen an die Austaktung als die Automobilindustrie im Allgemeinen. Unterschiede bestehen v. a. im *Marktverhalten*, im *Produktportfolio* und daraus resultierend im *Produktionssystem* (WEBER & WEGGE 2004).

Der *Markt für Nutzfahrzeuge* ist deutlich kleiner als der PKW-Markt, wobei Wachstumspotentiale v. a. in den Entwicklungsländern bestehen (WEBER & WEGGE 2004). Nutzfahrzeuge stellen Investitionsgüter dar, deren Ersatzbedarf in konjunkturellen Abschwüngen aufgrund der technischen Reife problemlos für eine gewisse Zeit aufgeschoben werden kann. Daher ist der Markt sehr stark abhängig von Konjunkturschwankungen und weist somit ein zyklisches und gleichzeitig schwer prognostizierbares Verhalten auf. Insbesondere im gesättigten Markt Europa sind Schwankungen zwischen 20 und 40 Prozent keine Seltenheit (WEBER & WEGGE 2004, IFA 2006, SHELL 2010, FASSE 2012). Gleichzeitig herrscht aufgrund der hohen Preissensibilität der Kunden ein hoher Preisdruck am Markt (IFA 2006). Während weltweite Krisen wie in den Jahren 2002 bis 2004 und in den Jahren 2008 bis 2011 starke Einbrüche im Absatz zur Folge haben (SHELL 2010), können andererseits veränderte gesetzliche Rahmenbedingungen (z. B. die Einführung einer neuen Abgasnorm) innerhalb eines Jahres zu einem massiven Anstieg der Nachfrage führen (MAN 2013).

Die Größe des Marktes sowie die Ausprägung als Investitionsgut führen zu einer starken Kundenorientierung bzgl. des *angebotenen Produktportfolios*. Um Produkte für unterschiedlichste Transportaufgaben unter verschiedensten Umgebungsbedingungen anbieten zu können, werden aufbauend auf Grundfahrzeuge eine Vielzahl an individuellen Sonderausstattungsoptionen angeboten. WEBER & WEGGE (2004) verdeutlichen diesen Zusammenhang, indem sie die Teilevielfalt eines LKWs der eines PKWs gegenüberstellen: Während ein durchschnittlicher PKW einen Teileumfang von 8.000 bis 20.000 Teilen aufweist, ist die Komplexität bei LKWs mit einem Teileumfang von 20.000 bis 60.000 Teilen deutlich höher. Dieser Umstand ist auch durch die hohe regionale Ausprägung des Marktes geschuldet, weshalb eine Vielzahl an regionalen Besonderheiten und Kundenwünschen zu beachten ist (IFA 2006). Somit ist der Individualisierungsgrad von Nutzfahrzeugen deutlich höher als der von PKWs (MEDO 2010).

2.5 Herausforderungen der Austaktung in der Nutzfahrzeugmontage

Die zuvor dargestellte hohe Marktdynamik mit den damit verbundenen Stückzahlsschwankungen sowie die hohe Variantenvielfalt stellt das *Produktionssystem in der Nutzfahrzeugmontage* vor große Herausforderungen. Das Resultat sind eine steigende Varianz der Montageinhalte sowie eine erhöhte Variantenspreizung (DOMBROWSKI & MEDO 2006, PETERHÄNSEL 2011), die in ihren Ausmaßen und ihrer Komplexität die Rahmenbedingungen der PKW-Montage weit übersteigen (WEBER & WEGGE 2004). Aufgrund des geringeren Marktvolumens wird ein Großteil des Variantenprogramms oftmals auf derselben Linie montiert. Abbildung 15 visualisiert diesen Zusammenhang. Sie stellt die Kapazitätsanforderungen an eine Montagelinie des Nutzfahrzeugbaus durch reale Vorgabezeitdaten für verschiedene Zeiträume dar. Zum einen ist zu erkennen, dass ein hoher Unterschied in den Montagezeiten besteht und dass das aufwändigste Fahrzeug fast eine doppelt so hohe Vorgabezeit besitzt wie das mit dem niedrigsten Aufwand im betrachteten Zeitraum. Zum anderen wird deutlich, dass eine Verschiebung im Variantenmix, z. B. durch saisonale Schwankungen (vgl. THEUER 2013), zu einer Veränderung des Kapazitätsbedarfs führt (MÄRZ ET AL. 2012B).

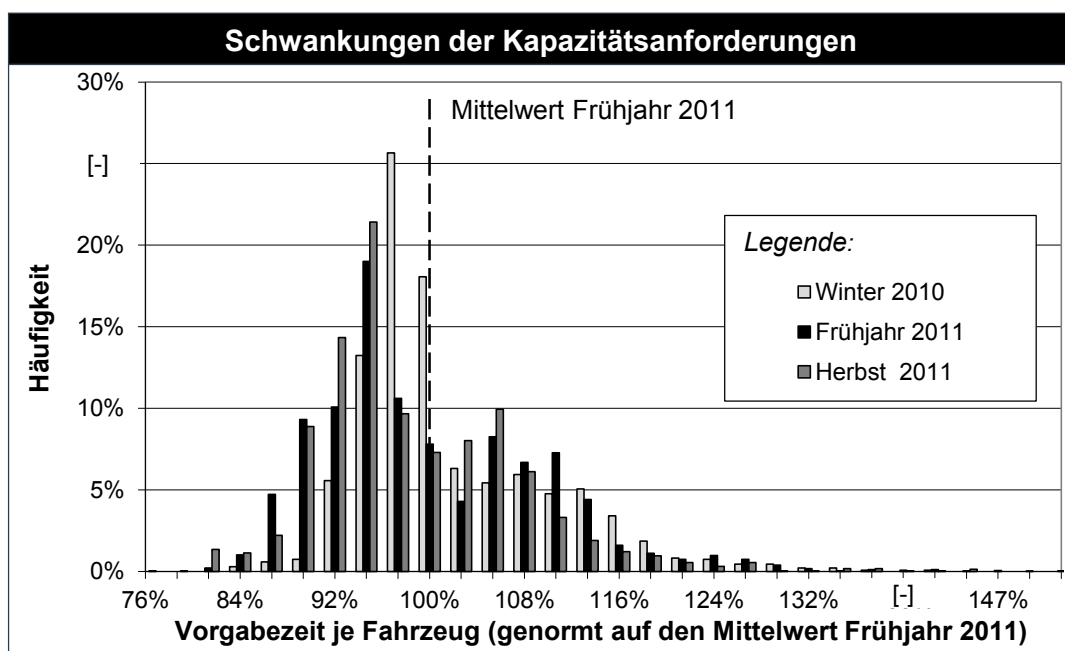


Abbildung 15: Schwankungen der Kapazitätsanforderungen im Nutzfahrzeugbau (in Anlehnung an MÄRZ ET AL. (2012B, S. 146))

Die zuvor genannten Rahmenbedingungen führen zu einer hohen Komplexität im Rahmen der Austaktung, da eine vergleichsweise hohe Anzahl an Varianten zu berücksichtigen ist. Gleichzeitig fordert die Volatilität am Markt eine hohe Dynamik und Flexibilität in der Montage, um im Falle eines Aufschwungs weiterhin

die vom Kunden geforderten kurzen Lieferzeiten zu erfüllen und bei Auftragsrückgang auch Kapazitäten abbauen zu können (IFA 2006). Letzteres ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten von hoher Bedeutung für Unternehmen der Nutzfahrzeugbranche, da die Personalkosten auf einem ähnlich hohen Niveau liegen wie im Fahrzeugbau im Allgemeinen (SCHUBERT 2005). Somit ist die Austaktung eines der wichtigsten Werkzeuge und Produktionsphilosophien für Produktionssysteme im Nutzfahrzeugbau (ENGELHORN ET AL. 2005). Aufgrund der hohen Variantenvielfalt gelten die zuvor genannten Hemmnisse zur Anwendung automatisierter Lösungsansätze der Austaktung im besonderen Maße, da der Aufwand zur Aufnahme aller relevanten Restriktionen, insbesondere der Vorrangbeziehungen, als zu hoch anzusehen ist. Gleichzeitig können im Nutzfahrzeugbereich die Vorzüge einer Reaktion auf Variantenmixschwankungen ausschließlich über eine Perlenkettenanpassung aufgrund der Vielzahl an Varianten und der hohen Zeitspreizung nicht genutzt werden (WEYER 2002).

2.6 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieses Kapitels wurden die variantenreiche Fließmontage als Organisationsform der Montage und die Herausforderungen einer kurzfristigen Reaktion auf Nachfrageschwankungen vorgestellt. Dabei wurden die Planung von Montagelinien, die Auswirkungen von Nachfrageschwankungen sowie die speziellen Rahmenbedingungen in der Nutzfahrzeugmontage betrachtet.

Die Organisationsform der Fließmontage hat eine sehr hohe Verbreitung in der Automobilindustrie und zeichnet sich durch einen gerichteten Materialfluss und einen strukturiert getakteten Montageablauf aus. Aufgrund der hohen Kundenanforderungen ist das klassische Anwendungsfeld der Einprodukt-Fließmontage kaum noch vorzufinden und die Variantenfließfertigung steht im Fokus der industriellen Praxis. Diese birgt viele Vorteile, weist allerdings als Nachteile auch eine geringe Flexibilität bzgl. Stückzahl- und Variantenmixschwankungen, Unproduktivität aufgrund der Zeitspreizung und eine hohe Planungskomplexität auf.

Die Untersuchung der Planungsprozesse für variantenreiche Montagelinien in der Literatur hat gezeigt, dass v. a. die Reihenfolgeplanung und die Personaleinsatzplanung als kurzfristige Werkzeuge angesehen werden. Die Reihenfolgeplanung ist als Standardvorgehen im Automobilbau etabliert. Aufgrund der hohen Komplexität erfolgt diese meist auf der Ebene von Ausstattungsmerkmalen, dem sog. Car-Sequencing. Im Rahmen des Personaleinsatzes gilt insbesondere das Driften

der Mitarbeiter als wirtschaftliche Alternative zur Beherrschung der Zeitspreizung. Ist dieser nicht möglich oder ausgeschöpft, hat sich der zusätzliche Einsatz von Springern zur Unterstützung bewährt. Aufgrund der höheren Personalkosten gilt es die Anzahl an eingesetzten Springern möglichst zu minimieren, weshalb die Berücksichtigung des Drift- und Springerbedarfs bereits in der Auslegung der Montagelinie zu berücksichtigen ist.

Die höchste Komplexität bei der Planung von variantenreichen Montagelinien besteht in deren Austaktung. Aufgrund der vielen zu berücksichtigenden Restriktionen und Varianten ist eine in der Wissenschaft stark erforschte rechnergestützte Automatisierung bislang in der Praxis nicht umsetzbar. Insbesondere die Aufnahme der Montagereihenfolgebeziehung jeglicher Varianten in einem Vorranggraph ist der begrenzende Faktor. Somit wird die Austaktung in der Realität weiterhin manuell in Probiervverfahren unter Zuhilfenahme von Expertenwissen durchgeführt. Dementsprechend ist die Austaktung aktuell bei Montagelinien mit hoher Variantenvielfalt dem mittelfristigen Planungshorizont zuzuordnen.

Die geringe Flexibilität von getakteten Montagelinien gegenüber Nachfrageschwankungen ist darin zu begründen, dass sie zu einer Veränderung des Kapazitätsbedarfs führen. Bei veränderten Stückzahlen ist ab einer gewissen Größenordnung die Taktzeit anzupassen, was zu Über- oder Unterauslastungen an allen Stationen der Linie führt und eine weitere Austaktung erforderlich macht. Durch die Auslegung der variantenreichen Montagelinien auf ein Durchschnittsprogramm können Veränderungen im Variantenmix ebenfalls an einem Teil der Stationen zu einer unwirtschaftlichen Auslastung führen, insbesondere wenn die Grenzen von Drift- und Springereinsatz sowie der Reihenfolgeplanung erreicht werden. Auch hier ist eine erneute Austaktung erforderlich.

Der Nutzfahrzeugbau ist in besonderem Maße von den zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen betroffen. Zum einen hat die Volatilität des Marktes sehr hohe Nachfrageschwankungen zur Folge. Zum anderen führen eine hohe Variantenvielfalt und Zeitspreizung zu einem komplexen Planungsprozess. Methoden der automatisierten Austaktung scheitern aufgrund des unwirtschaftlichen Aufwands zur Datengeneration und aufgrund der Vielzahl an Restriktionen.

Als Fazit ist festzuhalten, dass die vorhandenen, kurzfristig einsetzbaren Maßnahmen wie Driften, Springereinsatz und Reihenfolgeplanung bei den hohen Nachfrageschwankungen im Nutzfahrzeugbau für eine schnelle Reaktion nicht ausreichen und somit für eine durchgängig wirtschaftliche Montage eine kurzfristige Austaktung der Montagelinie erforderlich ist. Um dies zu erreichen, müssen

2 Theoretischer Hintergrund

die angewendeten Methoden sowohl eine schnelle Reaktion auf Stückzahl- als auch auf Variantenmixschwankungen ermöglichen. Gleichzeitig muss die hohe Komplexität der Austaktung, insbesondere bzgl. der Vielzahl an Varianten, beherrscht werden. Zusätzlich sind die Möglichkeiten zum Drift und zum Springereinsatz bereits bei der Austaktung umfangreich zu berücksichtigen, da sie eine schnelle, einfache und wirtschaftliche Alternative zur Austaktung darstellen.

3 Stand der Forschung

3.1 Kapitelüberblick

In Kapitel 2 wurden die Grundlagen zur Planung variantenreicher Montagelinien mit dem Hauptfokus auf deren Austaktung, die Auswirkungen von Nachfrageschwankungen auf diese sowie die besonderen Herausforderungen der Nutzfahrzeugmontage erläutert und somit die Handlungsfelder für eine schnelle Reaktion auf Nachfrageschwankungen samt deren Grenzen aufgezeigt. Darauf aufbauend untersucht dieses Kapitel den aktuellen Stand der Forschung in diesem Themengebiet, um die bereits vorhandenen Ansätze zu analysieren und den Handlungsbedarf für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik aufzuzeigen.

Hierzu spannt Abschnitt 3.2 zunächst den zu untersuchenden Betrachtungsrahmen auf, indem die für die Zielsetzung dieser Arbeit relevanten Bewertungskriterien erläutert werden. Anschließend werden in Abschnitt 3.3 die verschiedenen Ansätze des aktuellen Stands der Forschung und Wissenschaft dargestellt, bevor sie im Abschnitt 3.4 zusammenfassend bzgl. der in Abschnitt 3.2 aufgestellten Kriterien bewertet werden. Abschnitt 3.5 leitet daraus den Handlungsbedarf für die zu entwickelnde Methodik ab.

3.2 Betrachtungsrahmen

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht in der Befähigung variantenreicher Montagelinien zu einer schnelleren Reaktion auf Nachfrageschwankungen mittels Austaktung. Die Ausführungen im vorherigen Kapitel haben verdeutlicht, dass die Austaktung der Montagelinie aktuell allerdings kaum als kurzfristiges Werkzeug zur Adaption genutzt werden kann. Aufgrund der hohen Praxisrelevanz der Themengebiete zur Planung von variantenreichen Montagelinien im Allgemeinen und zu deren Austaktung im Speziellen liegt hierzu eine Vielzahl an wissenschaftlichen Arbeiten vor. In diesem Zusammenhang sei nochmals auf die ausführlichen Literaturreviews von BECKER & SCHOLL (2006), BOYSEN ET AL. (2007) und BOYSEN ET AL. (2009) verwiesen, die sich v. a. mit der Lösung der jeweiligen Problemstellungen mittels mathematischer Algorithmen beschäftigen. Neben dem Aspekt der Austaktung haben sich die Personaleinsatz- und die Reihenfolgeplanung als bereits im kurzfristigen Planungshorizont etablierte Maßnahmen herausgestellt. Demzufolge beschränkt sich die folgende Untersuchung

3 Stand der Forschung

auf kombinierte Ansätze, die neben der Austaktung auch diese Teilaspekte mit betrachten. Konzepte, die sich ausschließlich auf diese kurzfristigen Maßnahmen beschränken, wie beispielsweise WEYER (2002) mit der Perlenkettenbildung, werden somit nicht berücksichtigt. Aufgrund der Fokussierung dieser Arbeit auf den Nutzfahrzeugbau betrachtet die Untersuchung insbesondere verwandte Branchen, wie den Automobilbau oder die Luftfahrt, und keine Ansätze aus Bereichen mit grundsätzlich verschiedenen Rahmenbedingungen, wie z. B. die Elektroindustrie, Kleingeräte- oder Mikromontage (vgl. BALAKRISHNAN & VANDERBECK 1999). In Tabelle 3 sind die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Kriterien zur Einordnung und Bewertung des Stands der Forschung dargestellt. Während Einordnungskriterien nachfolgend zur Klassifikation der einzelnen Ansätze dienen, stellen Bewertungskriterien die Erfüllung von für die Zielsetzung relevanten Aspekten dar.

Tabelle 3: Kriterien zur Einordnung und Bewertung des Stands der Forschung

Einordnungskriterien	Bewertungskriterien
Einordnung in den Planungshorizont	Kurzfristige Reaktion auf Variantenmixschwankungen
kurzfristig	Einbezug unterschiedlicher Varianten
mittelfristig	Drifteinsatz
langfristig	Springereinsatz
Art des Planungsprozesses	Reihenfolgeplanung
einmalig	Taktzeitvariation
kontinuierlich	Kurzfristige Reaktion auf Stückzahlschwankungen
Art der Lösungsverfahren	Taktzeitanpassung ohne Neuaustaktung
Probiervverfahren	Bewertungsdimension
Simulation	Machbarkeitsanalyse
Heuristik	Qualitative Bewertung
Exakte Lösungsverfahren	Quantitative Bewertung (statisch)
	Quantitative Bewertung (dynamisch)
	Praxistauglichkeit
	unvollständige Daten ausreichend
	Einbezug relev. Rahmenbedingungen
	Datenbeschaffungsaufwand gering
	Anwendungsaufwand gering
	Nachvollziehbarkeit

Bei der Einordnung der zu untersuchenden Ansätze liegt der Hauptfokus im Bereich der Austaktung und v. a. in der **Einordnung in den Zeithorizont der Planung** sowie in der **Art des Planungsprozesses**. Letzteres umfasst die Differenzierung zwischen einem *einmaligen* und einem *kontinuierlichen Planungsprozess*. Gleichzeitig ist auch die **Art der Lösungsverfahren** nach KRATZSCH (2000) (vgl. Abbildung 8, S. 28) von Bedeutung, wobei die drei dort genannten Verfahren in Anlehnung an HALUBEK (2012) noch um die *Simulation* als Möglichkeit zur szenariobasierten Untersuchung von dynamischen Zusammenhängen und Wechselwirkungen erweitert wird.

Darüber hinaus ist bei der Bewertung der Ansätze von Bedeutung, inwieweit Möglichkeiten zum Umgang mit Nachfrageschwankungen berücksichtigt werden. Zur **Reaktion auf Variantenmixschwankungen** zählen hierzu eine ausreichend genaue *Berücksichtigung unterschiedlicher (Produkt-)Varianten*, der Einbezug der wichtigsten kurzfristigen Maßnahmen des Personaleinsatzes – *Drifteinsatz* und *Springereinsatz* – sowie der *Reihenfolgeplanung*. Bei sehr großvolumigen Produkten, wie beispielsweise Flugzeugen, stellt außerdem die *Taktzeitvariation* an einzelnen Stationen eine Möglichkeit zur Beherrschung unterschiedlicher Varianten dar.

Um auch eine **Reaktion auf Stückzahlschwankungen** zu ermöglichen, ist außerdem von Interesse, inwieweit *Taktzeitanpassungen* der gesamten Montagelinie in den Konzepten bereits vorab betrachtet werden und somit mit geringem Aufwand umsetzbar sind. Anderenfalls ist eine komplette Neuaustaktung bei veränderter Taktzeit erforderlich. Da der Aspekt der Taktzeitanpassung vergleichsweise wenig Beachtung in kombinierten Methoden findet, werden zu einer ganzheitlichen Betrachtung des Stands der Forschung im Folgenden zum Teil auch Konzepte analysiert, die diesen Aspekt hervorheben ohne im Detail auf die Austaktung der Linie einzugehen.

Des Weiteren ist zu untersuchen, in welcher **Bewertungsdimension** die Planungsergebnisse betrachtet werden. Eine *Machbarkeitsanalyse* zeigt auf, ob unter den vorhandenen Restriktionen eine Umsetzung möglich ist. Die *qualitative* und *quantitative Bewertung* unterscheiden sich darin, dass erstere die Qualität des Planungsergebnisses bzgl. bestimmter Kriterien bemisst, während letztere eine Messung der Performance der Montagelinie mit Hilfe von Kennzahlen durchführt (HALUBEK 2012). Die quantitative Bewertung kann nochmals in eine *statische* und eine *dynamische* Bewertung unterschieden werden. Die statische Bewertung untersucht das Planungsergebnis ohne Berücksichtigung der Dynamik

im Produktionsprogramm, beispielsweise anhand eines durchschnittlichen Variantenmixes. Die dynamische Bewertung berücksichtigt die genaue Zusammensetzung des Produktionsprogramms inklusive der zu betrachtenden Fahrzeugreihenfolge.

Als letztes ist der Anspruch der **Praxistauglichkeit** an die Methoden zu stellen, um durch einen verständlichen, nachvollziehbaren Aufbau einen Nutzen für die industrielle Praxis zu generieren (KREBS 2012). In diesem Zusammenhang sind insbesondere die Rahmenbedingungen des Nutzfahrzeugbaus mit zu berücksichtigen, der im Fokus dieser Arbeit steht. Daher ist es erforderlich, dass die Methoden auch unter einer *unvollständigen IT-technischen Datenbasis*, insbesondere in Bezug auf die Vorranggraphen aller möglichen Varianten, anwendbar sind. Diese Prämisse entspricht den Rahmenbedingungen des Nutzfahrzeugbaus und verhindert eine vollständige Nutzung mathematischer, algorithmenbasierter Lösungsverfahren. Gleichzeitig sind die *relevanten Austaktungsrestriktionen und Rahmenbedingungen* mit zu berücksichtigen, damit auch eine in der Praxis umsetzbare Lösung generiert werden kann. Darüber hinaus fördert ein *geringer Aufwand in der Datenbeschaffung und in der Anwendung* sowie die *Nachvollziehbarkeit* des Planungsvorgehens und der generierten Ergebnisse eine breite Akzeptanz beim Anwender. Letzteres ist insbesondere unter dem Aspekt zu verstehen, dass in den Austaktungsprozess auch die Experten aus der Montagelinie, wie Meister oder Teamsprecher, und in vielen Fällen der Betriebsrat mit eingebunden sind. In diesem Teilnehmerkreis können Black-Box Verfahren mit komplexen Abläufen zu einer geringen Akzeptanz führen.

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze aus dem aktuellen Stand der Forschung diskutiert, um diese anschließend nach den aufgestellten Kriterien zu bewerten.

3.3 Ansätze zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien

HEIKE ET AL. (2001) entwickeln Ansätze zur Taktzeitanpassung in der Kleinserienfließmontage und evaluieren sie am Beispiel der Luftfahrtindustrie. Kernaspekt ist die Variation des Mitarbeiterereinsatzes an den Stationen, indem zwischen flexibel und unflexibel einsetzbarem Personal unterschieden wird. Zum Ausgleich von Prozesszeitschwankungen der verschiedenen Flugzeugvarianten schlagen die Autoren eine variable Anpassung der Taktzeit an den unterschiedli-

3.3 Ansätze zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien

chen Stationen vor, was eine Pufferung erforderlich macht. Eine Veränderung der Stationszuordnung von Arbeitsinhalten wird in den insgesamt vier linearen bzw. nichtlinearen mathematischen Modellen branchenspezifisch nicht vorgenommen. Die Anpassung der Taktzeit dient insbesondere der Beherrschung der Zeitspreizung, was aufgrund der hohen Taktzeiten in der Kleinserie als sinnvoll erscheint, bei kürzeren Taktzeiten allerdings zu einer hohen Unruhe im System bzw. einer hohen Durchlaufzeit durch Puffer führt. Zur Reaktion auf Stückzahl-schwankungen können diese Modelle somit kaum angewendet werden.

BOYSEN (2005) stellt in seiner Dissertation Methoden zur Austaktung und Reihenfolgeplanung vor. Hierzu entwickelt er zunächst das zweistufige heuristische Verfahren APACHE³¹ für den Einprodukt-Fall, welches im ersten Schritt für gegebene Reihenfolgebeziehungen eines Vorranggraphen eine lineare Reihenfolge der AVOs bestimmt und anschließend in dieser Reihenfolge einer gegebenen Stationskonfiguration zuordnet. Für den Einsatz in der Variantenfließfertigung greift er auf einen Mischvariantengraphen zurück. Zielsetzung ist die gleichmäßige Auslastung aller Stationen bei gleichzeitiger Vermeidung von Zeitspreizungen. Aufbauend auf eine Programmplanung erfolgt abschließend im kurzfristigen Planungshorizont die Reihenfolgeplanung mithilfe eines integrativen Ansatzes für Mixed-Model- oder Car-Sequencing. Zur Anwendung für alle Schritte ist hierfür eine vollständige Datenbasis erforderlich.

BECKER (2007) entwickelt ein exaktes Lösungsverfahren zur Austaktung von Fließlinien in der Automobilindustrie, wobei es auch aufwandsarm in eine Heuristik überführt werden kann. Dabei werden erstmals die Rahmenbedingungen von mehreren, variablen Arbeitsplätzen an einer Station berücksichtigt, die ebenfalls im Nutzfahrzeugbereich vorzufinden sind. Es wird eine Minimierung der Anzahl einzurichtender Arbeitsplätze angestrebt. Die Anwendung des entwickelten Verfahrens ist für Linienabschnitte von bis zu 45 Werkern geeignet. Eine Abstimmung einer längeren Montagelinie ist nicht möglich und es wird ausschließlich der Einprodukt-Fall betrachtet. Eine Erweiterung über die Verwendung eines Mischgraphen erscheint aber möglich. Der Zeitaufwand zur eigentlichen Austaktung der Montagelinie wird für den Planer durch Anwendung des Verfahrens reduziert, allerdings bestätigt der Autor den hohen Aufwand zur Generierung des Vorranggraphen.

³¹ APACHE steht für „Algorithmus zur Erstellung praxisorientierter Bandabgleiche“ (BOYSEN 2005, S. 80).

3 Stand der Forschung

GANS (2008) erarbeitet mehrere Verfahren zur Neu- und Anpassungsplanung der Struktur getakteter Fließsysteme. Ein Ansatz beschäftigt sich mit der Varianten-zuordnung zu verschiedenen Produktionslinien mit geschlossenen Stationsgrenzen bereits während der Strukturplanung mit dem Ziel der Verringerung von Effizienzverlusten und somit der Minimierung von Produktionskosten. Der zweite Ansatz kann sowohl für die Neuplanung als auch zur Rekonfiguration von Linien mit offenen Stationsgrenzen verwendet werden. Mit Hilfe eines Zuordnungsalgorithmus werden Aufträge derart den verschiedenen Linien zugeteilt, dass die Varianz der Bearbeitungszeit an den einzelnen Stationen minimiert wird. Als letztes wird eine auf genetischen Algorithmen basierende Heuristik zur Bewertung von Anpassungsstrategien bei Nachfrageschwankungen für verteilte Produktionssysteme vorgestellt. Dabei werden unterschiedliche Szenarien generiert und mittels Kapitalwert bewertet. Die drei Verfahren fasst GANS (2008) abschließend in einem Planungsvorgehen zusammen, wobei alle Ansätze keine einzelnen AVOs, sondern die Bearbeitungsprozesse der Varianten in aggregierter Form betrachten. Eine detaillierte Austaktung der Linie ist somit nicht möglich.

ALTEMEIER (2009) stellt ein Verfahren zur kostenoptimalen Kapazitätsabstimmung von getakteten Variantenfließlinien vor und wendet es in der Automobilindustrie an. Hierzu entwickelt er ein mathematisches Modell zur Rekonfiguration der Austaktung als Planungsunterstützung durch Aufzeigen besonders wirkungsvoller Verschiebungen von Arbeitsinhalten sowie der Kosten der Anpassung. Ziel dabei ist eine Minimierung der Überlastsituationen. Da auch dieses Modell einen vollständigen Vorranggraph benötigt, entwickelt er weiterhin ein Verfahren zur teilautomatisierten Vorranggrapherstellung aufbauend auf bereits bestehenden Produktdokumentationen und alten Linienkonfigurationen. Als letztes stellt er ein Simulationsmodell zur Reihenfolgeplanung vor, welches mit Hilfe eines heuristischen Ansatzes die Minimierung der notwendigen Springeranzahl anstrebt. Somit betrachtet er als einer der wenigen Autoren auch explizit den Springer- und Drifteinsatz sowie den Einfluss der Produktreihenfolge, verbunden mit einem hohen Aufwand in der Datenbeschaffung.

MEDO (2010) präsentiert als Werkzeuge zur kontinuierlichen Planung der Variantenfließfertigung ein Simulationstool und Leitlinien zur Austaktung. Das Simulationswerkzeug linelogix berechnet zum einen den Personalbedarf bei bestehender Taktzeit und Austaktung, zum anderen die optimale Taktzeit bei bestehender Auslegung und festem Personaleinsatz, indem eine Taktzeit mit minimalen Verlustzeiten berechnet wird. Die Austaktung kann szenarienbasiert per Hand angepasst werden. Darüber hinaus stellt er Leitlinien zur Austaktung varianten-

3.3 Ansätze zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien

reicher Montagelinien auf, die explizit ohne vollständige Daten bzgl. der Zuordnungsrestriktionen aller Varianten anwendbar sind. Während alle bislang genannten Autoren eine Glättung der Auslastung über die Varianten vorschlagen, ist die Kernidee die getrennte Zuordnung von variantenabhängigen und -unabhängigen AVOs auf unterschiedliche Stationen. Somit können variantenunbehaftete Stationen hoch ausgelastet werden, während die nun stärker von der Varianz betroffenen Stationen gezielt mit Methoden der Personaleinsatzplanung beherrscht werden müssen. Allerdings gibt MEDO (2010) kein detailliertes Planungsvorgehen zur Umsetzung seiner Leitlinien an und schließt eine Anpassung der Taktzeit zur Reaktion auf Stückzahländerungen aufgrund der nicht aufeinander abgestimmten Auslastung der einzelnen Stationen aus. Stattdessen hält er eine Variation der Arbeitszeiten mit Hilfe von Zeitkonten für zielführend. Das Simulationstool wendet er in einer LKW-Montage im Bereich Rahmenbau und seine Leitlinien im Bereich Fahrerhausmontage an, wobei letztere eher den Montagebedingungen im PKW-Bereich entspricht (MAN 2008).

WEYAND (2010) beschreibt einen Ansatz zur risikoreduzierten Endmontageplanung und validiert diesen am Beispiel der Automobilindustrie. Zunächst wird in der Prozessplanung ein so genannter Prozessgraph erstellt, welcher über alle Varianten hinweg aufwändig die technische und zeitliche Varianz im Montageablauf dokumentiert. Die Austaktung erfolgt im Rahmen der Vorgehensweise zunächst auf Basis der durchschnittlichen Verbauzeit aller Varianten. Daran schließt eine Auflösung auf die einzelnen Varianten und eine Optimierungsschleife zur Verringerung der Überlast bei aufwändigen Varianten an. Zudem erfolgt eine frühzeitige Beurteilung der Volumenflexibilität der einzelnen Stationen anhand von unterschiedlichen Maßnahmen für manuelle, teilautomatische und automatische Stationen. Eine prototypische Umsetzung des Konzepts erfolgt am fiktiven Beispiel der Vormontage von PKW-Türen in drei unterschiedlichen Ausführungsvarianten.

TRACHT & FUNKE (2011) stellen ein Konzept zur Optimierung des Personaleinsatzes in der getakteten Fließmontage großvolumiger Bauteile vor. Kernaspekt ist eine auftragsorientierte Schichtplanung, wobei von einer einzigen Weitertaktung der Produkte pro Schicht ausgegangen wird. In einem zweistufigen, mathematischen Verfahren wird hierfür zunächst in Abhängigkeit des Produktionsprogramms die Anzahl benötigter Schichten je Station sowie die dafür notwendigen Mitarbeiter berechnet. Im zweiten Schritt werden die Arbeitsinhalte den Mitarbeitern zugeteilt. In einem Optimierungslauf werden abschließend bei Über- oder Unterkapazitäten die Zuordnungen nochmals angepasst, um ein optimales Ergeb-

3 Stand der Forschung

nis zu generieren. Ähnlich dem Konzept von HEIKE ET AL. (2001) wird hierbei über die Anpassung der Mitarbeiterkapazität auf Variantenschwankungen bei hohen Taktzeiten reagiert.

DEUSE ET AL. (2011) beschreiben verschiedene Einsatzmöglichkeiten der Gruppentechnologie zum Erreichen von Zielen der schlanken Produktion und zur Variantenbeherrschung. Ein Forschungsvorhaben ist der Bandabgleich auf Basis von Taktfamilien. Anstatt einer Austaktung auf eine Durchschnittsvariante sollen mittels Verfahren der multivarianten Statistik mehrere sog. „Master-Varianten“ identifiziert werden, die Ähnlichkeiten bzgl. der AVOs und deren Bearbeitungszeit sowie der Vorrangfolge aufweisen. Die Austaktung wird anschließend auf die verschiedenen Mastervarianten ausgelegt und auch mit unterschiedlichen Taktzeiten belegt. Um zu häufige Änderungen in der Auslegung der Linie zu vermeiden, ist eine integrierte Reihenfolgeplanung zur losweisen Einsteuerung der Master-Varianten vorgesehen. Aufgrund der vielfältigen kundenindividuellen Produkte in der Nutzfahrzeugbranche ist die Anzahl an Mastervarianten und somit an Planungsszenarien und Taktzeitwechselln als sehr hoch einzuschätzen, was zu einem hohen Aufwand in der Anwendung führt.

HALUBEK (2012) erarbeitet ein Konzept zur simulationsbasierten Planungsunterstützung für Variantenfließfertigungen. Ein Produktmodell bildet dabei die Vorrangbeziehungen sowie die AVOs und ein Produktionssystemmodell die Linienkonfiguration samt Mitarbeiter ab. Ein Produktionsplanungsmodell wird zur Austaktung per Hand oder mit Hilfe einer einfachen Heuristik herangezogen sowie zur Reihenfolgeplanung mittels Car-Sequencing. Die Inhalte dieser drei Modelle werden in einem vierten Modell zur Simulation des Produktionsablaufs zusammengeführt und die Ergebnisse anschließend hinsichtlich der Produktionsperformance sowie des Driftverhaltens der Mitarbeiter bewertet. Ein präventiver Springereinsatz wird ebenfalls berücksichtigt, wobei der Autor weder auf die Implementierung noch auf Auswertungsmöglichkeiten diesbezüglich eingeht. Das vorgestellte Konzept bietet umfassende Möglichkeiten zur Unterstützung bei der Planung. Eine Auslegung der Linie unter dem Aspekt eines verringerten Umplanungsaufwandes findet nicht statt.

3.4 Zusammenfassende Bewertung der Ansätze

Tabelle 4 liefert einen Überblick über die zuvor erläuterten Ansätze und deren Bewertung hinsichtlich der in Abschnitt 3.2 aufgestellten Kriterien.

Tabelle 4: Überblick über die bewerteten Ansätze

		HEIKE ET AL. 2001	BOYEN 2005	BECKER 2007	GANS 2008	ALTEMEIER 2009	MEDO 2010	WEYAND 2010	TRACHT & FUNKE 2011	DEUSE ET AL. 2011	HALUBEK 2012	
Legende:												
▨ nicht bewertbar												
○ nicht erfüllt / betrachtet												
◐ teilweise erfüllt / betrachtet												
● nahezu vollständig erfüllt / betrachtet												
Einordnungskriterien	Einordnung in den Planungshorizont											
	kurzfristig	●	◐	●	●	●	●	◐	●	◐	◐	
	mittelfristig	○	●	○	●	●	○	●	○	◐	◐	
	langfristig	○	◐	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Art des Planungsprozesses											
	einmalig	○	◐	●	●	●	○	●	○	○	○	
	kontinuierlich	●	◐	○	●	●	●	◐	●	●	●	
	Art der Lösungsverfahren											
	Probierverfahren	○	○	○	○	○	●	●	○	▨	●	
	Simulation	○	○	○	○	●	●	●	●	▨	●	
Heuristik	○	●	◐	●	●	○	○	●	▨	◐		
Exakte Lösungsverfahren	●	○	●	●	○	○	○	○	▨	○		
Bewertungskriterien	Kurzfristige Reaktion auf Variantenmixschwankungen											
	Einbezug unterschiedlicher Varianten	●	●	◐	●	●	●	●	●	●	●	
	Drifteinsatz	○	◐	○	◐	●	◐	○	○	○	●	
	Springereinsatz	◐	◐	○	○	●	◐	○	◐	○	◐	
	Reihenfolgeplanung	○	●	○	○	●	○	○	○	●	●	
	Taktzeitvariation	●	○	○	○	○	○	○	◐	●	○	
	Kurzfristige Reaktion auf Stückzahlschwankungen											
	Taktzeitanpassung ohne Neuaustaktung	◐	○	○	○	○	○	◐	○	◐	○	
	Bewertungsdimension											
	Machbarkeitsanalyse	○	●	○	○	○	●	○	●	▨	○	
	Qualitative Bewertung	○	○	○	●	●	○	●	○	▨	○	
	Quantitative Bewertung (statisch)	○	●	●	●	○	●	●	○	▨	●	
	Quantitative Bewertung (dynamisch)	●	○	○	○	●	○	○	●	▨	●	
	Praxistauglichkeit											
	unvollständige Daten ausreichend	●	○	○	●	◐	●	○	◐	▨	○	
Einbezug relev. Rahmenbedingungen	◐	●	○	○	◐	◐	◐	◐	▨	◐		
Datenbeschaffungsaufwand gering	●	○	○	◐	○	◐	○	◐	▨	◐		
Anwendungsaufwand gering	◐	◐	●	●	◐	◐	○	●	▨	◐		
Nachvollziehbarkeit	◐	◐	○	○	○	●	●	◐	▨	○		

3 Stand der Forschung

Es wird deutlich, dass die vorgestellten Ansätze verstärkt einen kurzfristigen Einsatz anstreben, dies oftmals allerdings zu Lasten der Praxistauglichkeit geschieht, insbesondere durch den Einsatz mathematischer Lösungsverfahren, die nur bei vollständiger Datenbasis anwendbar sind bzw. nicht alle zur Verteilung der Arbeitsinhalte relevanten Rahmenbedingungen berücksichtigen können. Ein Großteil der vorgestellten Konzepte ist auch auf die kontinuierliche Planung ausgelegt. Zudem ist zu erkennen, dass trotz der vergleichsweise hohen Verbreitung in der Industrie und der hohen Praxistauglichkeit Probiervverfahren in der Forschung eine geringere Durchdringung haben. Des Weiteren ist klar ersichtlich, dass alle Konzepte auf eine softwaretechnische Unterstützung des Planungsprozesses setzen, sei es durch exakte Algorithmen bzw. Heuristiken oder durch Simulation.

Bei der Reaktion auf Variantenmixschwankungen zeigt sich, dass die drei primären kurzfristigen Maßnahmen - Drifteinsatz, Springereinsatz und Reihenfolgeplanung - nur von ALTEMEIER (2009) durchgängig betrachtet werden, wobei, wie in Abschnitt 2.3.4 erläutert, die Reihenfolgeplanung für sich allein stehend in der Forschung ausführlich untersucht wird. Der Aspekt der Taktzeitanpassung zur Variantenbeherrschung bei HEIKE ET AL. (2001), DEUSE ET AL. (2011) und teilweise bei TRACHT & FUNKE (2011) stellt einen Sonderfall für großvolumige Produkte dar. Die Anpassung der Taktzeit an einzelnen Stationen bei besonders aufwändigen Produkten erscheint insbesondere für Montagelinien mit wenig Stationen und hohen Taktzeiten im Bereich mehrerer Stunden zielführend und somit kaum geeignet für die Rahmenbedingungen im hier fokussierten Nutzfahrzeugbau. Der Ansatz ist daher v. a. für den Aspekt der Stückzahlanpassung interessant.

Die Hauptidee aus der Untersuchung des aktuellen Stands der Forschung ist, dass die kurzfristige Reaktion auf Stückzahlschwankungen mit Hilfe von Taktzeitanpassung kaum untersucht und in die Vorgehensweisen integriert ist. MEDO (2010) schließt diese Möglichkeit sogar explizit in seinen Leitlinien aus. Die meisten Autoren gehen auf den Aspekt von Stückzahlanpassungen nicht ein oder nennen als Maßnahmen die Anpassung der Arbeitszeiten und Schichten. So kann mit einem Großteil der vorgestellten Konzepte eine Taktzeitanpassung nur durch eine vollständige Neuaustaktung erreicht werden, allerdings verbunden mit dem entsprechenden Aufwand der Erstaustaktung. Lediglich WEYAND (2010) beurteilt die Volumenflexibilität einzelner Stationen und die Anpassung der Mitarbeiteranzahl, beschränkt sich dabei allerdings auf die Rahmenbedingungen im PKW-Bereich mit weniger Arbeitsplätzen je Station und überträgt diese nicht

in ein Planungsvorgehen für die gesamte Linie. Die Ansätze von HEIKE ET AL. (2001) und DEUSE ET AL. (2011) zur Taktzeitanpassung bei Variantenschwankungen ermöglichen prinzipiell auch eine Reaktion auf Stückzahlschwankungen auf gleiche Weise, diese ist aber implizit nicht vorgesehen und auch nur für deren spezifische Rahmenbedingungen mit sehr großvolumigen Produkten, wie beispielsweise Flugzeuge, und für lange Taktzeiten im Bereich einer Schichtdauer anwendbar.

Die Analyse hinsichtlich der Bewertungsdimension zeigt, dass nur wenige Autoren eine quantitative Bewertung unter Berücksichtigung der Dynamik von Fahrzeugreihenfolgen vornehmen und die statische Bewertung überwiegt. Im Bereich der Praxistauglichkeit ergibt sich insbesondere bei der Anwendung unter nicht vollständiger Datenbasis, wie einen voll beschriebenen Vorranggraphen, und bei der Nachvollziehbarkeit der Generierung des Austaktungsergebnisses großes Potential. Zusätzlich erweist sich erwartungsgemäß die Integration aller für die Austaktung relevanten Rahmenbedingungen als schwierig, da entweder der Aufwand für die Datenakquise zu hoch wäre oder diese in den mathematischen Modellen nicht abbildbar sind.

3.5 Ableitung des Handlungsbedarfs

Aus den vorhergehenden Abschnitten leitet sich der Handlungsbedarf der vorliegenden Arbeit ab. Eine Vielzahl an Konzepten und Ansätzen zur Planung und insbesondere auch zur Austaktung variantenreicher Montagelinien bestehen. Aufgrund der hohen Dynamik am Markt ist eine kurzfristige Anpassung der Montagelinien erforderlich. Neben den bereits etablierten kurzfristigen Maßnahmen im Rahmen der Personaleinsatz- und Reihenfolgeplanung versuchen bereits erste Ansätze die Austaktung als kurzfristige, kontinuierliche Maßnahme zur Reaktion auf Nachfrageschwankungen einzusetzen. Dennoch ergibt sich durch die Untersuchung des aktuellen Stands der Forschung weiterer Handlungsbedarf.

Primär ist zu erkennen, dass bislang kein Ansatz besteht, der bereits im Rahmen der Austaktung gleichzeitig kurzfristige Maßnahmen sowohl zur Reaktion auf Variantenmix- als auch auf Stückzahlschwankungen berücksichtigt. Für eine hohe Anpassungsfähigkeit auf Veränderungen am Markt sind allerdings beide Aspekte von gleichbedeutend hoher Relevanz. Daraus ergibt sich der Bedarf einer Methodik, die zum einen den Einfluss unterschiedlicher Produktvarianten auf die getaktete Linie mit einbezieht und die Nutzung bereits vorhandener Mög-

3 Stand der Forschung

lichkeiten der Personaleinsatz- und Reihenfolgeplanung zur kurzfristigen Reaktion integriert. Dies beinhaltet auch die Möglichkeit zur dynamischen Bewertung der Planungsergebnisse unter Berücksichtigung des Einflusses der Perlenkette. Zum anderen muss eine kurzfristige Adaptierbarkeit der Taktzeit bereits im Rahmen der Ausplanung der Austaktung ein wichtiger Bestandteil der Planungsprämissen sein.

Darüber hinaus sind für die Anwendung in der Praxis weitere Aspekte von Bedeutung, die bislang nicht vollumfänglich in bestehenden Ansätzen erfüllt sind. Die aktuelle Forschung beschäftigt sich insbesondere mit der Untersuchung mathematischer Algorithmen zur Beschleunigung des Austaktungsprozesses. Für die industrielle Praxis sind diese aus unterschiedlichsten, zuvor ausführlich erläuterten Gründen kaum anwendbar, insbesondere aufgrund der Notwendigkeit zur vollständigen und nachvollziehbaren IT-technischen Abbildung aller relevanten Restriktionen, die zusätzlich kontinuierlich aktuell gehalten werden müssen. Demgegenüber steht der Bedarf zur genaueren Erforschung von Probierv Verfahren, die in der Praxis eine weite Verbreitung haben. Deren Nachteile bestehen v. a. in der Beherrschung der Komplexität des Austaktungsproblems, die insbesondere durch eine Vielzahl produktionspezifischer Produktvarianten, wie sie beispielsweise im Nutzfahrzeugbau vorliegen, und durch die Berücksichtigung der unterschiedlichen relevanten Restriktionen und Zusatzaspekte, wie Drift- und Springereinsatz, hervorgerufen wird. Somit liegt ein weiterer Forschungsbedarf in der Beherrschung dieser Komplexität bei gleichzeitiger Anwendung einfacher Werkzeuge und Methoden.

4 Konzept der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

4.1 Kapitelüberblick

Im vorherigen Kapitel wurde der aktuelle Stand der Wissenschaft untersucht und aufgezeigt, welcher weitere Forschungsbedarf zur Befähigung der kurzfristigen Austaktung besteht, insbesondere unter den Rahmenbedingungen des Nutzfahrzeugbaus. Im folgenden Kapitel wird in Abschnitt 4.2 zunächst die daraus resultierenden sowie allgemeinen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik vorgestellt. Zum besseren Verständnis erläutert Abschnitt 4.3 anschließend zunächst die Kerninhalte der Methodik, indem die Ansätze zur Lösung der identifizierten Herausforderungen unabhängig vom eigentlichen Planungsablauf vorgestellt werden. Abschließend wird in Abschnitt 4.4 ein Überblick über den Gesamttablauf der Methodik gegeben, welcher im darauffolgenden Kapitel 5 im Detail betrachtet wird.

4.2 Anforderungen an die Methodik

Um die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit zu erreichen, wird eine Austaktungsmethodik entwickelt, um eine kurzfristige Reaktionsfähigkeit zu ermöglichen. Aufbauend auf dieser Zielsetzung und auf den Ergebnissen der Untersuchungen des Stands der Forschung in Kapitel 3 lassen sich folgende spezifischen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik stellen:

- *Berücksichtigung von Variantenmix- und Stückzahlschwankungen:* Wie in Abschnitt 2.4 deutlich wurde, stellen Variantenmix- und Stückzahlschwankungen die entscheidenden Veränderungen am Markt dar, die einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit getakteter Montagelinien haben. Allerdings findet in den bisherigen Methoden zur Austaktung von Montagelinien eine gleichzeitige Berücksichtigung dieser beiden Aspekte nicht statt. Dementsprechend stellt dies eine Hauptanforderung dar.
- *Erhöhung der Anpassungsgeschwindigkeit:* Direkt aus der Zielsetzung ergibt sich die Anforderung einer kurzfristigen Austaktung als Reaktion auf die beiden zuvor genannten Nachfrageschwankungsarten. Die Ausführungen in Abschnitt 2.3.1 und 3.4 haben verdeutlicht, dass hierzu eine

4 Konzept der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

schnellere Adaptionsgeschwindigkeit notwendig ist, da die Austaktung bislang in der Praxis meist als mittelfristige Maßnahme eingesetzt wird. Die Methodik soll somit eine schnellere Reaktionsfähigkeit auf Nachfrageschwankungen ermöglichen.

- *Berücksichtigung anderer kurzfristiger Maßnahmen:* Die Austaktung stellt nicht die einzige Möglichkeit zur Reaktion auf Nachfrageschwankungen dar. Hierzu zählen neben der kurzfristigen Personaleinsatzplanung (Springer- und Drifteinsatz) und der Optimierung der Perlenkette in der Reihenfolgeplanung auch andere Kapazitätsanpassungsmaßnahmen wie z. B. die Veränderung der Schichtdauer oder der Arbeitstage. Demzufolge muss das zu entwickelnde Vorgehen deren Existenz mit berücksichtigen und in die Planungs- und Anpassungsüberlegungen mit einbeziehen.
- *Beherrschung der Planungskomplexität:* Die Vielzahl an zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen und Restriktionen führen dazu, dass eine rein rechnergestützte Lösung des Planungsproblems in der industriellen Praxis aktuell nicht möglich ist. Die daraus resultierende Anwendung von Probiervverfahren unter Einbezug von Expertenwissen erfordert die Beherrschung dieser Planungskomplexität, insbesondere da auch die zuvor genannte Vielzahl an kurzfristigen Maßnahmen mit einzubeziehen ist.
- *Dynamische Bewertung von Austaktungsszenarien:* Um die Güte der erzielten Planungsergebnisse abschätzen zu können, muss die Methodik auch deren Bewertung vorsehen. Da die Perlenkette der Fahrzeuge bei hoher Variantenvielfalt eine wichtige Rolle spielt und einen großen Einfluss auf die unterstützenden kurzfristigen Maßnahmen wie Driften und Springereinsatz hat, ist auch deren Einfluss auf das Planungsergebnis mit zu berücksichtigen und zu bewerten.
- *Erkennen des Anpassungsbedarfs:* Die Möglichkeit zur kurzfristigen Austaktung kann nur dann sinnvoll genutzt werden, wenn der entsprechende Bedarf auch rechtzeitig erkannt wird. Daher ist in die Methodik ein Monitoringkonzept zu integrieren, welches die Notwendigkeit einer Adaption abschätzen kann und auf die durch die Methodik geschaffenen Möglichkeiten zur Reaktion aufbaut.

Darüber hinaus sind weitere, allgemeingültige Anforderungen an die Methodik zu beachten, die für eine praktische Anwendung immer an ein methodisches Vorgehen unabhängig von der Zielsetzung zu stellen sind (LINDEMANN 2009, KREBS 2012, ALTEMEIER 2009):

- *Präskriptiver Charakter*: Das beschriebene Vorgehen ist als operative, zielorientierte Vorschrift zu verstehen. Es soll „*Vorschläge für die Abfolge bestimmter Tätigkeiten (...) und die Art und Weise, in der diese Tätigkeiten durchzuführen sind*“ (LINDEMANN 2009, S. 57), anbieten.
- *Praxistauglichkeit*: Die Methodik muss für eine Anwendung in der industriellen Praxis geeignet sein und einen Mehrwert generieren. Das beinhaltet neben einem vertretbaren Aufwand in der Datenakquise und in der Anwendung insbesondere eine verständliche und übersichtliche Struktur sowie die Integration des Anwenders in den Entscheidungsprozess. Letzteres ist insbesondere auch aufgrund der im speziellen an die Methodik gestellte Anforderung zur Beherrschung der Planungskomplexität erforderlich, die nur durch Einbezug von Expertenwissen erreicht werden kann.
- *Transparenz*: Der vorherige Aspekt beinhaltet auch implizit die Forderung nach einer transparenten Entscheidungsfindung. Auswirkungen von Entscheidungen müssen deutlich nachvollziehbar sein und mit Hilfe visueller Unterstützung anschaulich gemacht werden, um verschiedene Planungsalternativen transparent miteinander vergleichen zu können.
- *Übertragbarkeit*: Um einen möglichst breiten Anwenderkreis anzusprechen, muss die Methodik auf unterschiedliche Montagelinien anwendbar sein. Im Fokus dieser Arbeit stehen die Randbedingungen des Nutzfahrzeugbaus, auf die die folgende Methodik ausgelegt ist. Eine Diskussion zur Übertragbarkeit der Methodik auf andere Branchen erfolgt im Anschluss an das Anwendungsbeispiel in Abschnitt 6.4.2.

4.3 Kerninhalte der Methodik

4.3.1 Überblick

Um den zuvor aufgestellten Anforderungen gerecht zu werden, beruht die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik auf mehreren Kerninhalten, die anschließend in Kapitel 5 in einen zusammenhängenden methodischen Ablauf integriert sind. Diese werden im Folgenden zunächst einzeln kurz in einen gemeinsamen Kontext gebracht und in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

Die Hauptanforderungen an die Methodik bestehen in der gleichzeitigen Berücksichtigung von Stückzahl- und Variantenmixschwankungen sowie in der Beschleunigung der Reaktionsfähigkeit durch eine Anpassung der Austaktung. Um

4 Konzept der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

das zu erreichen, wird die manuelle Austaktung durch Probiervverfahren unter Einbezug von Expertenwissen um zwei weitere regelbasierte Planungsaspekte erweitert und die Ergebnisse anschließend mittels Simulation validiert (REINHART & PRÖPSTER 2012 und PRÖPSTER & REINHART 2013). Abbildung 16 zeigt diese drei Kerninhalte, die in den folgenden Abschnitten 4.3.2 bis 4.3.4 genauer erläutert werden.

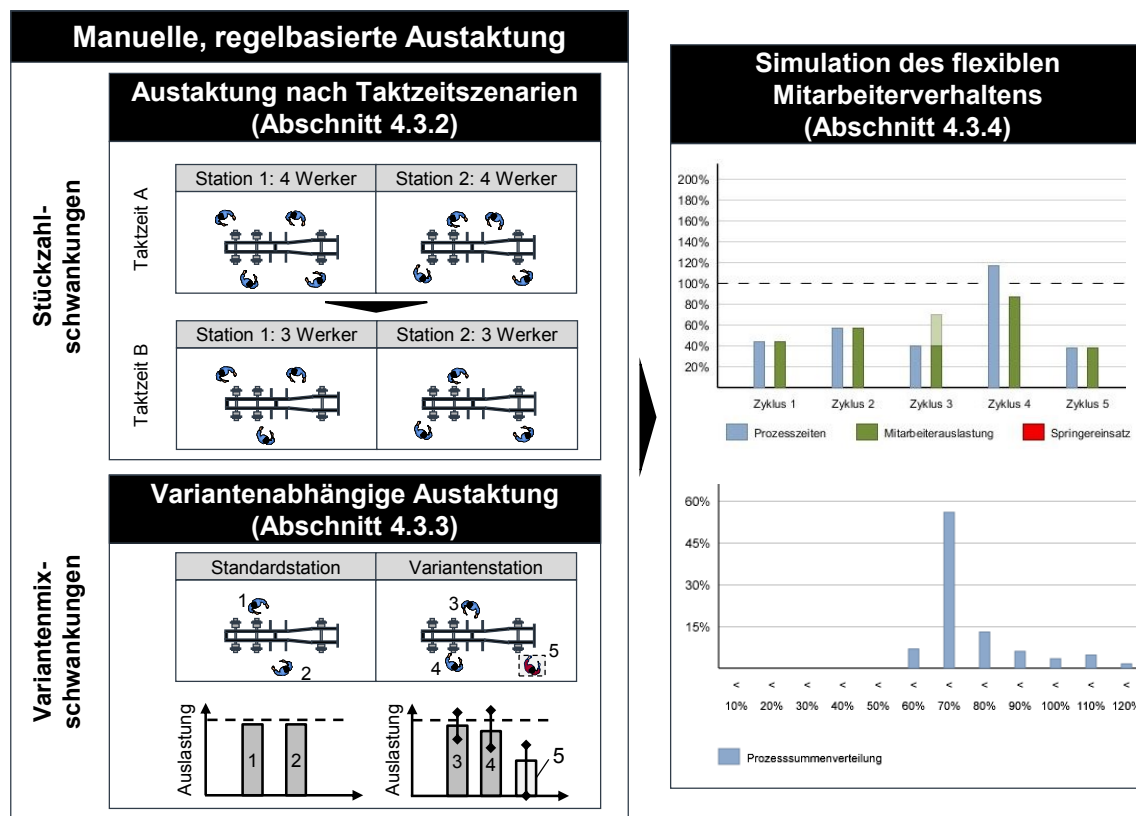


Abbildung 16: Kerninhalte der Austaktungsmethodik

Zur Reaktion auf *Stückzahlsschwankungen* wird eine *Austaktung nach sog. Taktzeitszenarien* angestrebt. Darunter ist zu verstehen, dass verschiedene, vorgeplante Taktzeiten ohne oder zumindest mit nur geringer Anpassung der Tätigkeitszuordnung zu Stationen ausschließlich durch eine Anpassung der Mitarbeiterzuordnung eingestellt werden können. Schwankungen im *Variantenmix* werden gleichzeitig in Anlehnung an MEDO (2010) durch eine *variantenabhängige Austaktung* mit einbezogen. Ziel ist es, variantenabhängige und -unabhängige Arbeitsinhalte aufzutrennen und unterschiedlichen Stationen, sog. Standard- oder Variantenstationen, zuzuordnen. Dadurch wird der Einfluss von Variantenmixschwankungen möglichst gering gehalten, da er sich auf die Variantenstationen konzentriert. Gleichzeitig besteht eine große Herausforderung in der Vielzahl an zu berücksichtigenden Varianten und deren Einfluss auf andere kurzfristige Reaktions-

maßnahmen. Zur Beherrschung dieser Komplexität, zur Bewertung unterschiedlicher Planungsszenarien sowie zur Visualisierung der Planungsergebnisse wird eine *Simulation des flexiblen Mitarbeiterverhaltens* als Teil des Austaktungsvorgehens eingesetzt.

4.3.2 Berücksichtigung von Stückzahlschwankungen durch Taktzeitszenarien

Wie aus den Ausführungen in Kapitel 2, insbesondere in den Abschnitten 2.3.2 und 2.4, deutlich wurde, stellt eine unabgestimmte Anpassung der Taktzeit einer Montagelinie einen sehr hohen Planungsaufwand dar, da die Arbeitsinhalte an allen Stationen der Linie auf die neue Kapazitätsgrenze ausgelegt werden müssen. Insbesondere sei nochmals auf Abbildung 14 (S. 45) verwiesen, welche die Veränderung der Auslastung in Abhängigkeit der Taktzeit bei gleichbleibender Tätigkeitszuordnung in Form einer Sägezahnkurve visualisiert. Aufgrund der voneinander unabhängigen, unterschiedlichen Auslegung der einzelnen Stationen liegt keine andere Taktzeit vor, auf die sofort mit geringem Planungsaufwand bei ähnlicher Wirtschaftlichkeit umgestellt werden kann. Dementsprechend gilt das langfristige Festhalten an der Taktzeit, auf die die Linie erstmalig ausgelegt wurde, als ein Dogma der Austaktung (ROSCHE 2007, MEDO 2010).

Auf dem zuvor erläuterten Zusammenhang beruht die Grundidee zum Umgang mit Stückzahlschwankungen durch eine beschleunigte Anpassung der Taktzeit in der vorliegenden Arbeit. Ziel ist es, bereits bei der aktuellen Austaktung der Montagelinie verschiedene Taktzeiten vorzuplanen, auf die das Montagesystem ohne großen Aufwand umgestellt werden kann. In Analogie zu Abbildung 14 (S. 45) ist das gleichbedeutend mit überlappenden Sägezahnkurven der einzelnen Stationen bzw. mit einer hohen Anzahl an gemeinsamen Maxima. Um dies zu erreichen, muss die Mitarbeiteranzahl an den einzelnen Stationen einer einheitlichen Logik folgend aufeinander abgestimmt werden, sodass durch eine gleichartige Anpassung des Mitarbeiterantritts an allen Stationen mit geringem Aufwand eine neue Taktzeit entsprechend einem Maximum in der Auslastungskurve eingestellt werden kann. Dementsprechend gibt die entwickelte Austaktungsmethodik als neue, zusätzliche Bedingung zur manuellen Austaktung vor, die Mitarbeiteranzahl an den einzelnen Stationen, auch als „Werkerdichte“ bezeichnet (BECKER 2007), nach einem vorgegebenen Regelwerk aufeinander abzustimmen. Optimal ist eine einheitliche Werkerdichte an allen Stationen (PRÖPSTER ET AL. 2013), die der zuvor genannten Überlappung der Sägezahnkurven aller Stationen

4 Konzept der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

entspricht. Falls aufgrund von Stationsrestriktionen dies nicht möglich ist, sind weitere Maßnahmen zu ergreifen, die im späteren Verlauf der Arbeit (Abschnitt 5.3) genauer erläutert werden.

Abbildung 17 verdeutlicht diesen Zusammenhang an einem Beispiel. Im Rahmen der Austaktung wird eine möglichst einheitliche Werkerdichte von vier Mitarbeitern angestrebt. Somit kann über eine Anpassung der Werkerdichte mit der 1,33-fachen Taktzeit (drei Mitarbeiter) oder der doppelten Taktzeit (zwei Mitarbeiter) montiert werden bei gleicher Zuordnung der Arbeitsinhalte zu den Stationen. Falls die Vorgabe an gewissen Stationen nicht erfüllt werden kann, ist es z. B. zielführend benachbarte Stationen zusammenzufassen (vgl. Abbildung 17, Station 3 und 4). Somit entsteht bei der Taktzeitumstellung lediglich ein geringer Anpassungsaufwand, da entweder die wenigen Inhalte der „nicht-ganzzahligen“ Mitarbeiter an einer Station zusammengefasst werden müssen oder aufgrund von Restriktionen ggf. Laufwege zwischen den Stationen zu berücksichtigen sind.

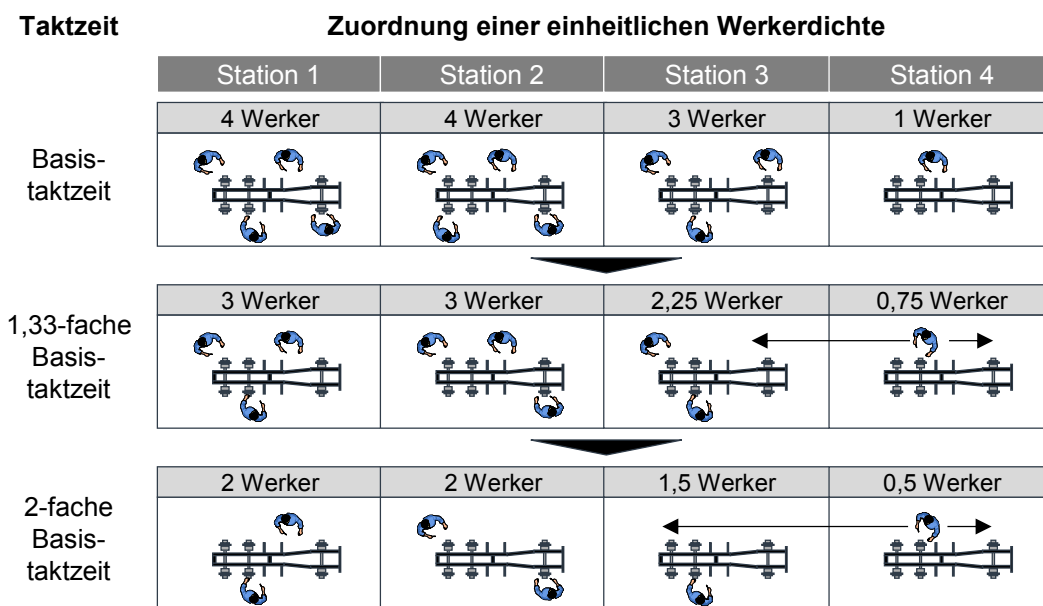


Abbildung 17: Grundidee der Anpassung der Taktzeit durch einheitliche Mitarbeiterzuordnung im Rahmen einer Austaktung nach Taktzeitszenarien (in Anlehnung an PRÖPSTER & REINHART (2013, S. 180))

Aufgrund der ganzzahligen Mitarbeiterzuordnung zu Stationen und der Einschränkungen auf eine minimal und maximal umsetzbare Werkerdichte wird ersichtlich, dass nur eine gewisse Anzahl an Taktzeiten durch dieses Konzept realisierbar ist. Diese Taktzeiten bauen der ganzzahligen Logik der Mitarbeiterzuordnung folgend mathematisch aufeinander auf und lassen sich durch Vielfache einer Basistaktzeit beschreiben. Abbildung 18 verdeutlicht, dass sich dadurch

der abdeckbare Stückzahlkorridor einer Montagelinie trotz der geringen Anzahl an möglichen Taktzeiten stark erweitern lässt, da dem Unternehmen zusätzlich noch weitere Kapazitätsanpassungsmaßnahmen, wie eine Verlängerung der Schicht oder eine zusätzliche Wochenendschicht (RALLY & HÄMMERLE 2010), zur Verfügung stehen. Dabei stellt die gestrichelte Linie in Abbildung 18 die Stückzahl der jeweiligen Taktzeit ohne weitere Kapazitätsmaßnahmen dar, während im Stückzahlkorridor einer jeden Taktzeit noch die zusätzlichen Effekte dieser Maßnahmen auf die produzierbare Stückzahl deutlich werden. Die Herausforderung im Rahmen der Austaktungsmethodik liegt somit in der Identifikation der möglichen Taktzeitvielfachen und in der Festlegung der Basistaktzeit. Letztere wird als Grundlage für die Ausplanung der Austaktung herangezogen und soll in Kombination mit den zusätzlichen Kapazitätsanpassungsmaßnahmen den gewünschten bzw. prognostizierten Stückzahlkorridor vollständig abdecken. Durch die neuen Regeln zum Einbezug der Werkerdichte als Rahmenbedingung in den Austaktungsprozess ist nach diesem zusätzlichen, einmaligen Planungsaufwand anschließend ein kurzfristiges Umstellen der Taktzeit in den entsprechenden Sprüngen möglich.

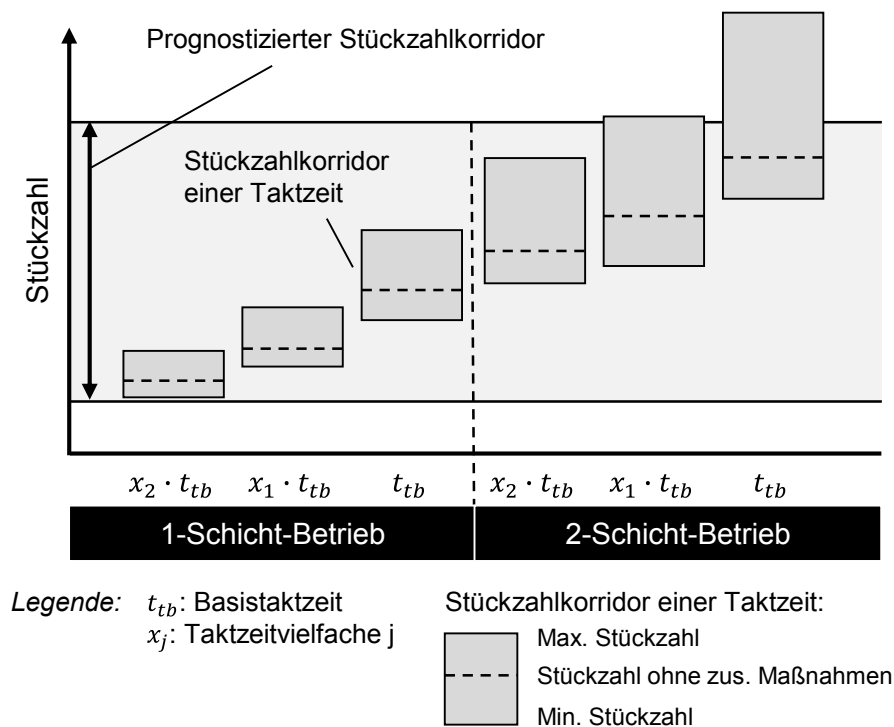


Abbildung 18: Taktzeitszenarien als Werkzeug zur Erhöhung der Stückzahlflexibilität (in Anlehnung an REINHART & PRÖPSTER (2012, S. 405), PRÖPSTER & REINHART (2013, S. 180))

4 Konzept der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

Neben dem bezüglich der Zielsetzung dieser Arbeit direkten Nutzen zur schnellen Umstellung von Taktzeiten bietet das Konzept der einheitlichen Werkerdichte auch noch weitere Vorteile. Die Standardisierung erhöht die Transparenz des Montageprozesses, da Drifteinsätze oder Störungsfälle sofort durch die Abweichung von der einheitlichen Werkeranzahl ersichtlich sind. Gleichzeitig können Standards zur Materialbereitstellung leichter erfüllt werden und durch die klare Zuteilung der Mitarbeiter zu den verschiedenen Ansprechzonen des Produkts (vgl. BOGUSCHEWSKI ET AL. 1990) verringern sich die Laufwege der Werker zwischen Materialaufnahme und Verbauort³².

4.3.3 Berücksichtigung von Schwankungen im Variantenmix durch variantenabhängige Austaktung

Neben Stückzahlschwankungen führen auch Veränderungen im Variantenmix zu einer abweichenden Auslastungssituation in der Variantenfließmontage, da sich die durchschnittliche Auslastung an den einzelnen Stationen verändert. Bei einer zuvor gleichmäßig hoch ausgelasteten Montagelinie hat dies unwirtschaftliche Überkapazitäten oder eine Überlastung der Mitarbeiter zur Folge (vgl. Abbildung 13, S. 42). Dementsprechend ist eine Austaktung aller von den aktuellen Variantenmixschwankungen betroffenen Stationen erforderlich. Um eine schnelle Reaktionsfähigkeit zu erreichen, verfolgt die vorgestellte Austaktungsmethodik in Anlehnung an die Leitlinien von MEDO (2010) eine variantenabhängige Zuordnung der Arbeitsinhalte zu den Stationen (vgl. Abbildung 19). Ausgangsbasis dafür ist die Unterteilung der Arbeitsinhalte in variantenunabhängige Tätigkeiten, die bei jedem Produkt durchzuführen sind, und in variantenabhängige, die nur bei bestimmten Varianten benötigt werden. Ziel ist anschließend eine getrennte Zuordnung der derart eingeteilten Arbeitsinhalte zu unterschiedlichen Stationen oder zumindest Arbeitsplätzen.

Dieses Konzept birgt mehrere Vorteile. Im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit spricht dafür v. a. der verringerte Umplanungsaufwand bei Veränderungen im Variantenmix, da sich der Fokus des Anpassungsbedarfs auf die variantenbetroffenen Arbeitsplätze beschränkt. Gleichzeitig reduziert sich auch der Planungshorizont der variantenbeherrschenden Maßnahmen auf diese Arbeitsplätze und

³² Der Laufweg entlang des Materialaufnahmebereichs und hin zum Montageort wird auch als „Werkerdreieck“ bezeichnet. Für eine wege- und somit zeitoptimierte Bereitstellung sollte das Dreieck möglichst flach (= bandnahe Bereitstellung) und mit einer geringen Dreiecksfläche (= materialintensive Bereitstellung) ausgeprägt sein (KLUG 2010). Diese Aspekte werden, wie oben beschrieben, durch die angestrebte einheitliche Werkerdichte unterstützt.

insbesondere die Möglichkeiten des Drift- und Springereinsatzes können zielgerichteter genutzt werden. Die getrennte Zuordnung fördert zudem die Standardisierung der Arbeitsprozesse und die Spezialisierung der Mitarbeiter in den variantenunabhängigen Arbeitsplätzen. Zusätzlich zeigt sich die Montagelinie durch die getrennte Zuordnung stabiler und flexibler gegenüber Variantenmixschwankungen. Während in den variantenbehafteten Bereichen die Zeitspreizung steigt und gezielt entgegengesteuert werden kann, sinkt die mittlere Abweichung der Vorgabezeiten für den gesamten Bandabschnitt³³. Dahingegen steigt der Qualifikationsbedarf in den von Varianten betroffenen Bereichen und der erstmalige Planungsaufwand ist aufgrund der zusätzlichen Randbedingung höher (REINHART & PRÖPSTER 2012, PRÖPSTER & REINHART 2013, EGBERS ET AL. 2012, MEDO 2010).

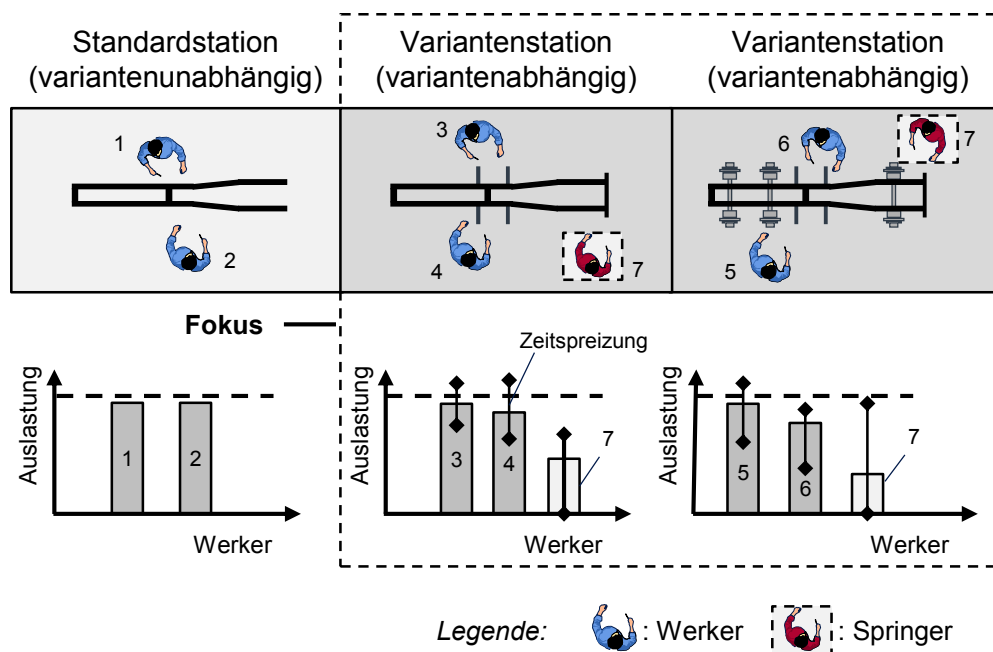


Abbildung 19: Grundidee der variantenabhängigen Austaktung (REINHART & PRÖPSTER 2012, S. 405)

In der Literatur, insbesondere in der betriebswissenschaftlich geprägten Erforschung von mathematischen Lösungsalgorithmen, findet eine variantenbehaftete Aufteilung von Arbeitsinhalten im Rahmen der Austaktung keine Beachtung (MEDO 2010). Das Gegenteil ist der Fall: Eine der häufigsten Zielfunktionen besteht in der Glättung der Schwankungen über alle Stationen hinweg und somit in einer Minimierung der Zeitspreizung. BOYSEN (2005) untergliedert in diesem

³³ MEDO (2010) begründet diesen Zusammenhang aufgrund des nicht additiven Verhaltens von mittleren Abweichungen normalverteilter Größen.

4 Konzept der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

Zusammenhang die Zielkriterien in der Literatur und stellt folgende Klassen an Zielgrößen heraus:

- Vermeidung von Abweichungen der Taktzeit über alle Varianten und Stationen
- Gleichmäßige Verteilung der gesamten Vorgabezeit einer Variante über alle Stationen
- Vermeidung von Schwankungen der Vorgabezeit zwischen Varianten an den Stationen
- Gleichmäßige Belastung aller Stationen

Lediglich die Ausführungen von MEDO (2010)³⁴ betrachten die Möglichkeit der variantenabhängigen Austaktung in knappen Planungsleitlinien. Jedoch wird darin eine Anpassung der Taktzeit explizit ausgeschlossen. Auch SWIST (2014) bezieht sich in seinen Ansätzen der Leistungsabstimmung zur Taktverlustprävention auf diese Idee, verzichtet allerdings auf eine detaillierte Beschreibung in einem Planungsvorgehen. Darauf aufbauend wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur gleichzeitigen Steigerung der Varianten- und Stückzahlflexibilität das Konzept von MEDO (2010) aufgegriffen und zu einer schnellen Adaption der Taktzeit befähigt und erweitert. Beide Konzepte beeinflussen sich zunächst negativ gegenseitig, da ersteres eine feste Anzahl an Arbeitsplätzen je Station vorgibt ohne Berücksichtigung der eigentlichen Arbeitsinhalte, während zweiteres eine variantenabhängige Aufteilung der Tätigkeiten auf Stationen vorgibt unabhängig von der daraus resultierenden Anzahl an Arbeitsplätzen. Des Weiteren ist für einen möglichst hohen Anteil an Standardtätigkeiten das Klassifikationsvorgehen zu konkretisieren und zu erweitern. Insbesondere für variantenbehaftete Stationen entsteht ein hoher Planungsaufwand mit verstärkter Komplexität zur Beherrschung der gewollt noch höheren Zeitspreizung. Dementsprechend wird im Rahmen des folgenden Planungsvorgehens zusätzlich die frühzeitige Berücksichtigung der anzuwendenden Maßnahmen, wie Drift- und Springereinsatz, forciert.

4.3.4 Beherrschung der Komplexität durch Simulation des flexiblen Mitarbeiterverhaltens

Die zuvor erläuterten Aspekte der Taktzeitszenarien und der variantenabhängigen Austaktung stellen erweiterte Regeln für die manuelle Austaktung von Montagelinien unter Anwendung von Probierverhalten mit Einbezug von Experten

³⁴ sowie die vorhergehende Beschreibung des Vorhabens in DOMBROWSKI & MEDO 2006

auf. Wie bereits in Abschnitt 2.3.2.4 deutlich wurde, haben diese Verfahren den Vorteil einer hohen Praxisanwendbarkeit und der Berücksichtigung einer Vielzahl an relevanten Restriktionen. Gleichsam sind sie aber auch geprägt von einem hohen Aufwand in der Anwendung, einer geringeren Nachvollziehbarkeit der Planungsergebnisse und von der Herausforderung der hohen Planungskomplexität, insbesondere gesteigert durch die Anzahl an montagerelevanten Varianten und die kurzfristigen Maßnahmen der Personaleinsatzplanung. Um insbesondere den beiden zuletzt genannten Nachteilen entgegenzuwirken, werden im Rahmen der entwickelten Austaktungsmethodik die Planungsergebnisse mittels Simulationsunterstützung³⁵ bewertet. Gleichzeitig hilft die Simulation nach durchgeführter Austaktung auch bei der Identifikation des Anpassungsbedarfs, um die durch die Austaktungsmethodik generierten Möglichkeiten zur Reaktion auf Nachfrageschwankungen gezielt nutzen zu können. Der einmalige Aufwand zur Erstellung des Simulationsmodells generiert somit nicht nur einen Nutzen für die Planungsunterstützung, sondern auch im laufenden Betrieb der Montagelinie.

Simulationswerkzeuge sind in den Bereichen der Produktions- und Logistikplanung weit verbreitet und können dort für unterschiedlichste Fragestellungen, wie beispielsweise in der Prozess-, der Kapazitäts- oder der Materialflussplanung, verwendet werden (MÄRZ ET AL. 2011B). Die Simulation bietet im Vergleich zu anderen Bewertungsmöglichkeiten³⁶ den Vorteil, dass sie insbesondere zur Analyse von bzgl. ihrer Struktur oder ihres zeitlichen Verhaltens komplexen Systemen geeignet ist und einen hohen Detaillierungsgrad aufweisen kann (ROSE & MÄRZ 2011).

Aufbauend auf der an die Methodik gestellte Zielsetzung und den beiden schon zuvor genannten Kerninhalten sind an das Simulationsmodell mehrere Anforderungen zu stellen. Zunächst ist im Allgemeinen ein nachvollziehbarer Ansatz zur Modellbeschreibung sowie eine intuitiv anwendbare Experimentierumgebung für die praktische Anwendung erforderlich (ROSE & MÄRZ 2011), um eine hohe Transparenz und Praxistauglichkeit zu erreichen. Dementsprechend muss für eine hohe Akzeptanz in der industriellen Praxis eine kurze Dauer der Simulationsläufe angestrebt werden. Bezugnehmend auf die Zielsetzung der Arbeit muss die Analyse, Visualisierung und Bewertung der kurzfristigen Maßnahmen der Personal-

³⁵ „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt“ (VDI 3633, S. 2).

³⁶ wie beispielsweise den in Abschnitt 2.3.2.4 erläuterten Optimierungsalgorithmen oder Warteschlangenanalysen (vgl. u. a. WEIß 2000, GANS ET AL. 2011).

4 Konzept der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

einsatzplanung, wie Driftverhalten und Springereinsatz, ermöglicht werden. Dadurch werden zum einen diese Aspekte bereits in die Planung der Austaktung mit integriert und können zum anderen auch in den Prozess zur Identifikation des Handlungsbedarfs mit einbezogen werden. In diesem Zusammenhang ist darüber hinaus notwendig, unterschiedliche Fahrzeugreihenfolgen abbilden zu können und somit in Abhängigkeit des Variantenmix und der daraus resultierenden Fahrzeugreihenfolge Auswirkungen auf die Qualität der Austaktung untersuchen zu können. Da zudem mit Hilfe des Simulationswerkzeugs unterschiedliche Austaktungsszenarien bewertet werden sollen, muss das Simulationsmodell eine Anpassung der Taktzeit und ein aufwandarmes Verschieben von Arbeitsinhalten am Montageband sowie eine Veränderung der Mitarbeiterzuordnung ermöglichen, ohne direkt Anpassungen im operativen Arbeitsplanungssystem vornehmen zu müssen. Eine Diskussion unterschiedlicher Simulationswerkzeuge, eine genaue Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Simulationssoftware sowie die Beurteilung der an sie gestellten Anforderungen erfolgt in Abschnitt 5.4.

4.4 Gesamtablauf der Methodik

Im vorherigen Abschnitt wurden die drei Kerninhalte der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodik vorgestellt:

- Kerninhalt 1: Austaktung nach Taktzeitszenarien
- Kerninhalt 2: Variantenabhängige Austaktung
- Kerninhalt 3: Simulationsunterstützung

Diese sind im Folgenden in einen gemeinsamen Planungsablauf integriert, um ein Planungsergebnis zu erreichen, dass allen genannten Teilaspekten gerecht wird. Abbildung 20 stellt diesen Ablauf in vier Schritten vor, der gleichzeitig auch den Ordnungsrahmen für das nachfolgende Kapitel 5 darstellt.

Das Planungsvorgehen beginnt mit der *Bestimmung der Taktzeitszenarien*. Dieser vorbereitende Schritt dient zur langfristigen Definition der angestrebten Stückzahlflexibilität und ist somit dem Kerninhalt 1 der Methodik zuzuordnen. Die Austaktung auf Taktzeitszenarien baut auf zwei grundlegenden Planungsgrößen auf (vgl. Abbildung 18), die nacheinander festgelegt werden. Zunächst ist unter Einbezug der vorherrschenden Linien- und Produktrahmenbedingungen zu bestimmen, welche Werkerdichten überhaupt möglich sind. Aus den verschiedenen Varianten ergeben sich die Taktzeitvielfachen, in denen die Taktzeit angepasst

werden kann. Darauf aufbauend kann als zweites unter Einbezug des angestrebten Stückzahlkorridors die Basistaktzeit ermittelt werden, um durch die verschiedenen, diskreten Taktzeitsprünge einen möglichst großen Teil des Stückzahlkorridors abzudecken. Beide Parameter dienen als Planungsgrundlage für den nachfolgenden Austaktungsprozess.

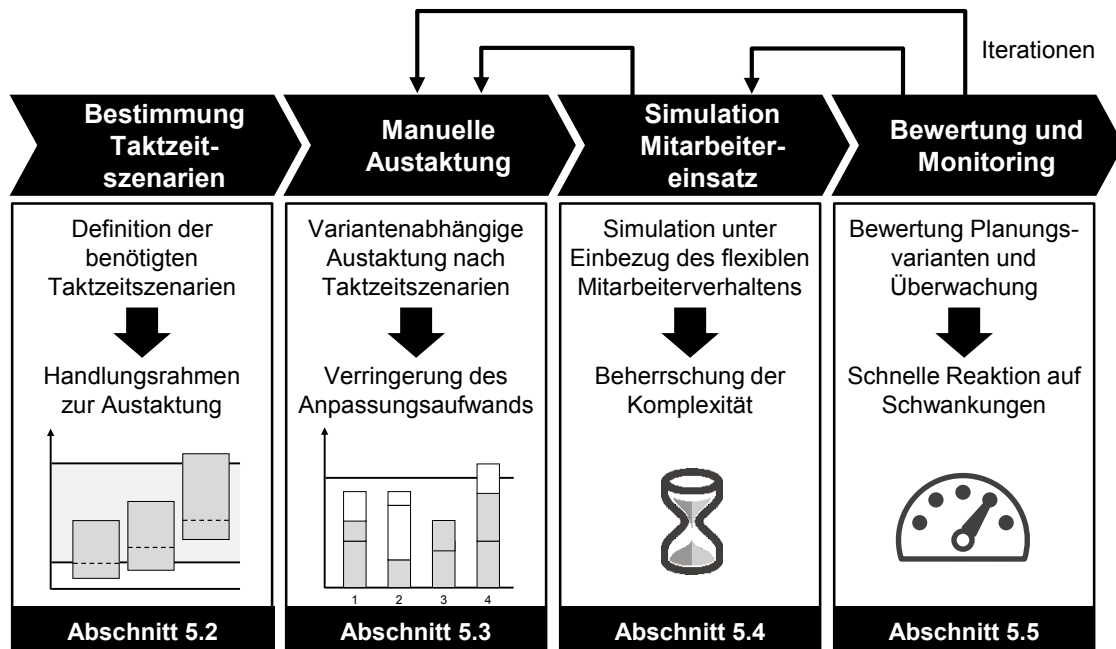


Abbildung 20: Überblick über den Ablauf der Gesamtmethode

Die *manuelle Austaktung* im zweiten Schritt stellt den Kern der Planungsmethodik dar. Mit Hilfe von Planungsrichtlinien werden im Rahmen von Workshops in Probierversuchen Arbeitsinhalte den Stationen der Montagelinie zugeordnet. Die enthaltenen Planungsrichtlinien gewährleisten die Einhaltung der durch Kerninhalt 1 geforderten einheitlichen Werkerdichte und der sich aus Kerninhalt 2 ergebenden Auftrennung von variantenbehafteten und -unbehafteten Montageinhalten. Durch Berücksichtigung dieser beiden Aspekte wird erreicht, dass bei späteren kurzfristigen Nachfrageschwankungen unabhängig von der Art der Schwankungen kurzfristiger reagiert werden kann. Nach einer Grobplanung unter Einbezug dieser Aspekte ist eine Feinplanung durchzuführen, um zum einen die Maßnahmen zum Umgang mit der Zeitspreizung an den variantenbehafteten Arbeitsplätzen festzulegen und zum anderen die Austaktung für die Taktzeitanpassung in den Bereichen vorzunehmen, die aufgrund der vorherrschenden Rahmenbedingungen nicht eindeutig den Regeln der einheitlichen Werkerdichte entsprechen konnten.

4 Konzept der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

Ergebnis des zweiten Schritts sind ausgeplante Austaktungsszenarien. Diese werden im nächsten Schritt durch *Simulation des Mitarbeiterereinsatzes* visualisiert. Wie zuvor im Kerninhalt 3 erläutert, steht dabei insbesondere der Umgang der Mitarbeiter mit den variantenabhängigen Vorgabezeiten im Fokus, also der Drift- und Springereinsatz. Durch die Simulation werden die Planungsergebnisse visualisiert und für die Vielzahl an unterschiedlichen Varianten, die im Detail im vorherigen Schritt nicht alle in ihrer Gesamtheit betrachtet werden konnten, bestätigt. In einem Vorgehen zur simulativen Validierung werden zum einen die Annahmen für die Variantenbeherrschung in den variantenbehafteten Arbeitsplätzen und zum anderen die Auswirkungen der Anpassung der Werkerdichte bei Taktzeitwechseln untersucht. Dementsprechend ergibt sich ein iterativer Ablauf des Planungsvorgehens, da Ergebnisse der Simulation in das manuelle Austaktungsvorgehen zurückgespiegelt werden und somit Anpassungen geplant und erneut simuliert werden können.

Der letzte Schritt der Methodik dient der *Bewertung der Planungsergebnisse und des Monitorings im laufenden Betrieb* zur schnellen Anpassung der Auslegung der Montagelinie. Mit Hilfe eines Kennzahlensystems werden die Planungsergebnisse hinsichtlich der Zielerreichung der durch die Methodik vorgegebenen Kerninhalte bewertet. Dabei wird auf die Simulationsergebnisse des vorherigen Schrittes zurückgegriffen. Die Kennzahlen dienen auch zusätzlich zur Überwachung der Montagelinie und des Einflusses der aktuellen Nachfragesituation auf diese. Sie zeigen zielgerichtet einen Anpassungsbedarf genau in den entsprechenden Bereichen auf, die die Methodik für eine kurzfristige Reaktion geschaffen hat. Ergebnis des letzten Schrittes ist ein simulativ bewertetes Austaktungsszenario, welches den Anforderungen der Planungsrichtlinien, bestehend aus den Kerninhalten 1 und 2, entspricht und mit Hilfe einer Überwachung durch Kennzahlen schnell auf eine veränderte Nachfrage angepasst werden kann.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

5.1 Kapitelüberblick

In diesem Kapitel wird die entwickelte Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung variantenreicher Montagelinien im Detail erläutert. Der Aufbau des Kapitels entspricht dem im vorherigen Abschnitt 4.4 vorgestellten Gesamtkonzept in vier Schritten (vgl. Abbildung 20). Im ersten Schritt werden die Taktzeitszenarien bestimmt (Abschnitt 5.2), die den Rahmen für die anschließende manuelle Austaktung durch Vorgabe der einzuplanenden Werkerdichte und Taktzeit vorgibt. Die manuelle Austaktung erfolgt in Abschnitt 5.3 und gliedert sich nach einer bereichsspezifischen Analysephase in eine Grob- und Feinplanung auf. Die erzielten Ergebnisse werden im dritten Schritt mit Hilfe eines Werkzeugs zur Simulation des flexiblen Mitarbeitereinsatzes validiert und ggf. iterativ angepasst (Abschnitt 5.4). Das hierzu verwendete Kennzahlensystem wird abschließend in Abschnitt 5.5 vorgestellt. Das Kennzahlensystem wird zusätzlich auch zur Überwachung der Montagelinie verwendet, um die durch die Methodik neu geschaffene Flexibilität zur Reaktion auf Nachfrageschwankungen nutzen und zielgerichtet Anpassungsmaßnahmen identifizieren zu können.

5.2 Bestimmung von Taktzeitszenarien

5.2.1 Überblick

Ziel des vorgestellten Planungsvorgehens ist, bereits bei der Austaktung der Montagelinie den Wechsel zwischen mehreren, vorgeplanten Taktzeiten zu ermöglichen und somit die Stückzahlflexibilität zu erhöhen. Im ersten Schritt des Planungsprozesses sind diese Taktzeiten zu bestimmen.

Um nicht unabhängig voneinander unterschiedliche Taktzeiten auszuplanen und dadurch den Aufwand bei der Planung sowie bei der Umstellung der Taktzeiten (insbesondere auch bzgl. der Qualifikation der Mitarbeiter) zu erhöhen, wurde im vorherigen Kapitel hierzu das Konzept zur Austaktung nach Taktzeitszenarien eingeführt. Ziel ist die Schaffung einer einheitlichen Werkerdichte an allen Stationen, um darauf aufbauend durch eine ganzzahlige Anpassung der Werkeranzahl

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

ohne großen Umplanungs- und Schulungsaufwand diskrete Taktzeitsprünge zu realisieren. Abbildung 21 zeigt die beiden Schritte zur Bestimmung der Taktzeitszenarien, die in den folgenden Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 genauer erläutert werden.

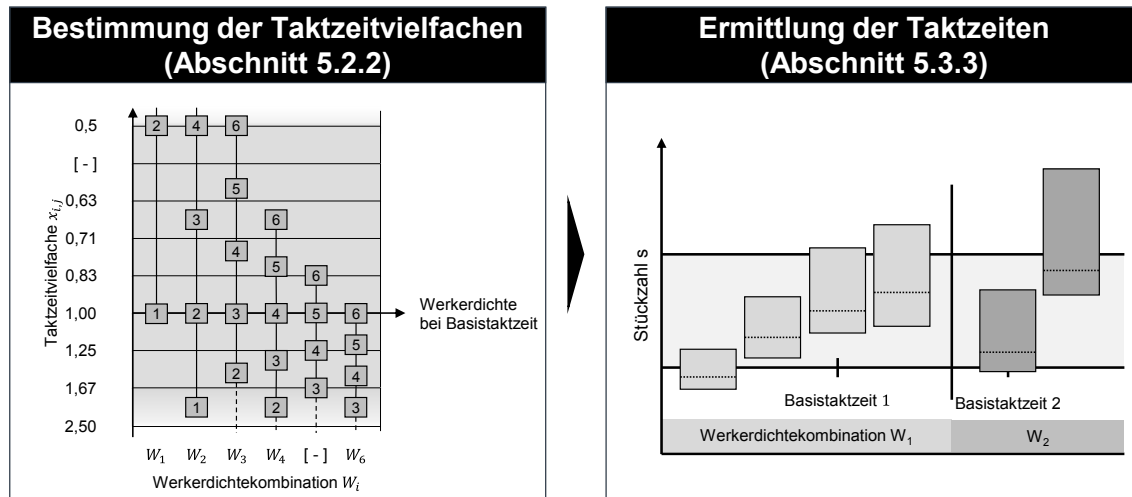


Abbildung 21: Ablauf zur Bestimmung der Taktzeitszenarien

Zunächst sind aufbauend auf den Rahmenbedingungen der auszutaktenden Montagelinie und des zu montierenden Produkts die möglichen *Taktzeitvielfachen zu bestimmen*. Abhängig von der Anzahl an Montagestationen und von den realisierbaren Werkerdichten an den Stationen ergeben sich aufeinander aufbauende Kombinationen aus Werkerdichten und daraus resultierend Taktzeitsprünge. Anschließend sind die dadurch umsetzbaren konkreten *Taktzeiten zu ermitteln*. Unter Einbezug des Beitrags weiterer Kapazitätsanpassungsmaßnahmen, wie z. B. die Veränderung der Schichtdauer, und der realisierbaren Taktzeitsprünge, beschrieben durch die Taktzeitvielfachen, werden die Taktzeiten derart berechnet, dass der prognostizierte Stückzahlkorridor möglichst vollständig abgedeckt wird. Da dieser Planungsschritt die Grundlage für die Stückzahlflexibilität der gesamten Montagelinie schafft, ist die Bestimmung der Taktzeitszenarien einmalig für das gesamte Montageband durchzuführen.

Für diesen ersten Planungsschritt der Austaktungsmethodik werden folgende Eingangsgrößen benötigt:

- Realisierbare Werkerdichten (sowohl produkt- als auch stationspezifisch)
- Prognose des Stückzahlkorridors
- Weitere vorhandene Kapazitätsanpassungsmaßnahmen
- Minimal bzw. maximal realisierbare Taktzeiten ($t_{t,min}$ bzw. $t_{t,max}$)

Als Ergebnis liefert dieser Schritt die in der nachfolgenden Austaktung einzuplanende identische Anzahl an Arbeitsplätzen je Station zur Einhaltung der einheitlichen Werkerdichte sowie die Taktzeiten, auf die die Montagelinie auszutakten ist.

5.2.2 Bestimmung der realisierbaren Taktzeitvielfachen

Die Einstellung verschiedener Taktzeiten und somit die Möglichkeit zur kurzfristigen Reaktion auf Stückzahlschwankungen erfolgt durch eine gleichartige Anpassung der Werkeranzahl an den einzelnen Stationen, die zuvor auf eine einheitliche Werkerdichte³⁷ ausgetaktet wurden. Ziel des ersten Planungsschrittes ist die Bestimmung der realisierbaren Werkerdichten und der daraus folgenden Taktzeitvielfachen. Abbildung 22 zeigt, welche Taktzeitvielfachen sich in Abhängigkeit der zur Basistaktzeit vorhandenen Werkerdichte ergeben und welche Stückzahlanpassung daraus resultieren kann. Die für den nachfolgenden Schritt der Taktzeitermittlung besonders relevanten Taktzeitvielfachen $x_{i,j}$ der Werkerdichtekombinationen W_i berechnen sich über folgenden Zusammenhang der Werkerdichten $w_{i,j}$ ³⁸:

$$x_{i,j} = \frac{w_{i,0}}{w_{i,j}} \quad (2)$$

So ergibt sich beispielhaft bei einer Werkerdichte zur Basistaktzeit von fünf Mitarbeitern ($w_{i,0} = 5$) durch eine Anpassung auf sechs Werker ($w_{i,1} = 6$) ein Taktzeitvielfaches von $x_{i,1} = 0,83$, was einer Kapazitätssteigerung um 20 Prozent entspricht (vgl. Abbildung 22)³⁹.

Eine höhere Werkerdichte in der Basiskonfiguration ermöglicht kleinere Taktzeitsprünge und somit eine granularere Kapazitätsanpassung. Allerdings ist die realisierbare Werkerdichte von mehreren Faktoren abhängig und sowohl nach oben als auch nach unten begrenzt. Für die Bestimmung der einstellbaren Taktzeitsprünge ist somit zunächst relevant, welche Werkerdichten w an der Montagelinie überhaupt umgesetzt werden können. Im Fokus steht dabei zunächst die

³⁷ Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 erläutert, wird die Anzahl an Mitarbeitern je Station als „Werkerdichte“ bezeichnet (BECKER 2007).

³⁸ Im Folgenden stellt i die Laufvariable für die Werkerdichtekombinationen W und j die Laufvariable für die Taktzeitvielfachen x dar, wobei $j = 0$ der Basistaktzeit t_{tb} entspricht und I die Anzahl an Werkerdichtekombinationen angibt.

³⁹ In Tabelle 18 im Anhang 9.2 ist der Zusammenhang zwischen der Anpassung der Werkerdichte und daraus resultierenden Taktzeitvielfachen und Stückzahländerungen nochmals in einer Matrix dargestellt.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Ausstattung

maximal mögliche Werkerdichte w_{max} und die minimale mögliche Werkerdichte w_{min} .

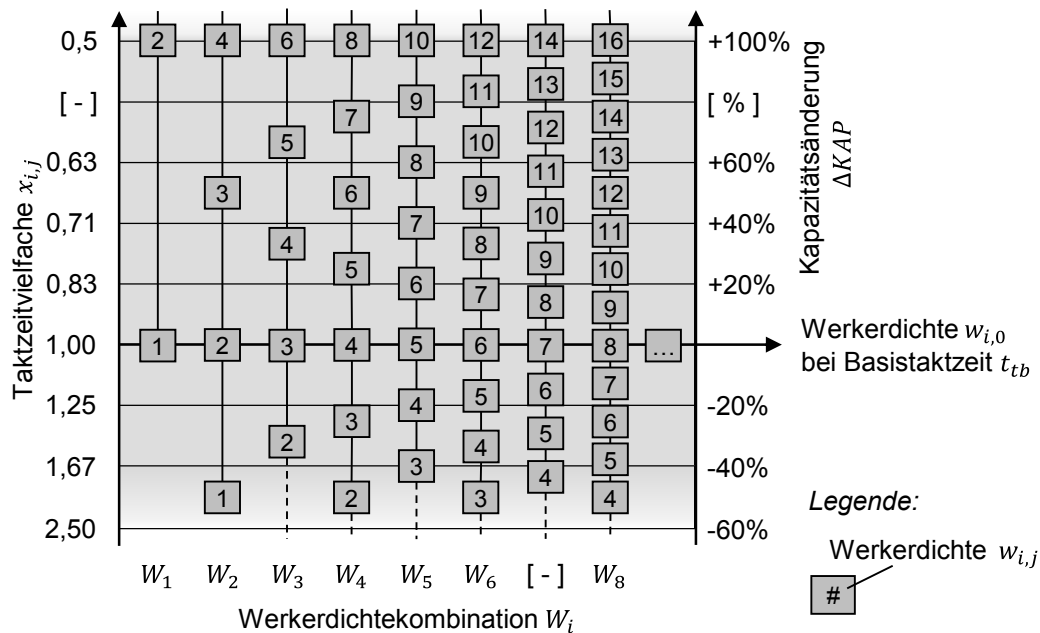


Abbildung 22: Mögliche Taktzeitvielfache x in Abhängigkeit der Werkerdichte w samt resultierender Kapazitätsänderung

Für die Bestimmung realisierbarer Werkerdichten ist v. a. die maximal mögliche Werkerdichte w_{max} von Bedeutung. Sie wird insbesondere durch das Montageobjekt beeinflusst. Da den Workern ein paralleles Arbeiten ohne gegenseitige Behinderung ermöglicht sein muss, ist die theoretisch realisierbare Werkerdichte je größer, desto mehr Platz am zu montierenden Produkt vorhanden ist. Im vorliegenden Konzept wird für die Festlegung der maximalen Werkerdichte empfohlen, den benötigten Platz je Montagemitarbeiter mindestens zu verdoppeln bzw. die resultierende Werkerdichte zu halbieren, begründet durch Erfahrungen aus der praktischen Anwendung. In der PKW-Montage werden beispielsweise insgesamt zwölf mögliche Arbeitsräume für die Mitarbeiter beschrieben (jeweils vier links bzw. rechts sowie zwei innen und jeweils einer vorne bzw. hinten, vgl. WEIB (2000)), weshalb diesem Konzept folgend eine maximale Werkerdichte von sechs Workern anzusetzen wäre. Der Grund für diese Halbierung ist zum einen, dass bei variantenreichen Produkten zusätzlich der Drifteinsatz und dadurch gegenseitige Behinderung an vorherigen und nachfolgenden Stationen zu berücksichtigen ist. Zum anderen können an bestimmten Stationen nicht für alle Bereiche des Produkts gleichermaßen Arbeitsinhalte vorliegen und müssen benachbarte Bereiche zusammengefasst werden. Da in diesem Planungsschritt global für

die gesamte Linie ein Maximalwert festgelegt wird, sind diese Überlegungen an dieser Stelle ausreichend und Ausnahmefälle an vereinzelt Stationen zunächst zu vernachlässigen, um den möglichen Lösungsraum nicht zu vorschnell einzugrenzen. Eine Detailplanung für den Umgang mit Ausnahmefällen erfolgt im späteren Verlauf der Methodik (vgl. Abschnitt 5.3.4).

Die theoretisch für die gesamte Montagelinie realisierbare minimale Werkerdichte w_{min} liegt in der Regel bei einem Mitarbeiter. Analog zur vorherigen Erläuterung der maximalen Werkerdichte können Ausnahmefälle, bei denen beispielsweise an vereinzelt Stationen zur Ausführung der Montage Tätigkeit zwei oder mehrere Mitarbeiter gleichzeitig benötigt werden, zunächst bei der globalen Auslegung vernachlässigt werden, um diesen Aspekt in der Feinplanung (vgl. Abschnitt 5.3.4) genauer zu betrachten. Sollte allerdings aus montage-technischen Gründen an einem Großteil der Stationen eine Werkerdichte größer eins notwendig sein oder ist aufgrund einer geringen Anzahl an realisierbaren Montagestationen schon zu Beginn der Planung ersichtlich, dass eine Werkerdichte von einem Mitarbeiter selbst bei hohen Taktzeiten nicht eintreten kann, dann ist dieser Zusammenhang bereits in diesem Schritt zu berücksichtigen und die entsprechende minimal umsetzbare Werkerdichte festzulegen.

Nach der Bestimmung der minimalen und maximalen Werkerdichte ist das Intervall festgelegt, in dem sich die einheitlichen Werkerdichten w im Nachgang bewegen können, um in diskreten Sprüngen verschiedene Taktzeiten abzudecken:

$$[w_{min}, w_{max}] := \{w \in \mathbb{N} \mid w_{min} \leq w \leq w_{max}\} \quad (3)$$

Dieses Intervall stellt den Input für den nächsten Planungsschritt, die Bestimmung der realisierbaren Taktzeiten, dar. Die möglichen Taktzeitsprünge ergeben sich, wie zuvor erläutert, über den Zusammenhang der möglichen Werkerdichten und der damit korrespondierenden Taktzeitvielfachen (vgl. Abbildung 22 bzw. Tabelle 18 im Anhang 9.2).

Bei einer Neuplanung⁴⁰ oder einer kompletten Umplanung wird dieses komplette Intervall mit seinen unterschiedlichen Möglichkeiten an Taktzeitvielfachen für die Bestimmung der Taktzeiten im nächsten Planungsschritt übergeben. Bei der Rekonfiguration einer bestehenden Linie ist zusätzlich der aktuelle Ist-Stand zu

⁴⁰ In diesem Zusammenhang wird auch der Begriff „Greenfieldplanung“ verwendet, da die Planung bildlich „auf der grünen Wiese“ stattfinden kann. Die Rekonfiguration im Bestand unter Berücksichtigung der vorhandenen Gegebenheiten wird diesem Bild folgend als „Brownfieldplanung“ bezeichnet (WOMACK & JONES 1997).

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

analysieren. Dadurch kann der Umplanungsaufwand reduziert werden, indem eine Vereinheitlichung der Werkerdichte an allen Stationen auf die aktuell häufigste Werkerdichte angestrebt wird.

5.2.3 Ermittlung der resultierenden Taktzeiten

5.2.3.1 Weitere Eingangsgrößen

Als Ergebnis des vorherigen Planungsschrittes sind die realisierbaren Werkerdichten an der auszutaktenden Montagelinie und somit die im Sinne der vorgestellten Methodik resultierenden Taktzeitsprünge bekannt. Im Folgenden werden daraus die tatsächlich angestrebten Taktzeiten bestimmt. Neben den Taktzeitvielfachen stellen der *prognostizierte geplante Stückzahlkorridor* und weitere zusätzlich vorhandene *Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung* wichtige Eingangsgrößen des Planungsvorgehens dar.

Die Stückzahlflexibilität eines Produktionssystems kann mit Hilfe eines *Stückzahlkorridors* beschrieben werden (vgl. Abbildung 18, S. 69). Der angestrebte Stückzahlkorridor, den ein Montagesystem abdecken soll, wird im Rahmen der lang- bis mittelfristigen Produktionsprogrammplanung (vgl. Abschnitt 2.3.1) festgelegt. Dabei spielen zum einen unternehmenspolitische Aspekte, wie beispielsweise die Zuordnung von Produkten zu Standorten und Montagelinien, die gewünschte Flexibilität und Personalkosten, und zum anderen die prognostizierten Absätze eine Rolle. Verfahren zur Absatzprognose stellen u. a. MAKRIDAKIS ET AL. (1980) und WIEDEMANN (1990) vor. Da der Stückzahlkorridor eine Eingangsgröße der diskutierten Planungsmethodik darstellt, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Erläuterung der Prognoseverfahren mit Hinweis auf die oben genannten Autoren verzichtet. Für den weiteren Planungsverlauf sind die minimale Stückzahl $s_{ges,min}$ sowie die maximale Stückzahl $s_{ges,max}$ des gesamten Stückzahlkorridors von Bedeutung. Zusätzlich spielt noch die Stückzahl mit der am höchsten prognostizierten Eintrittswahrscheinlichkeit $s_{ges,ml}$ ⁴¹ eine Rolle.

Darüber hinaus sind bei der Bestimmung der Taktzeiten die *zusätzlich vorhandenen Kapazitätsanpassungsmaßnahmen* zu berücksichtigen. Darunter sind Maßnahmen zu verstehen, die ohne eine Anpassung der Taktzeit die Kapazität einer Montagelinie derart verändern, dass der Ausstoß innerhalb eines Zeitraums er-

⁴¹ ml: Abkürzung für „most likely“ (englisch: am wahrscheinlichsten)

höht oder gesenkt wird. In diesem Zusammenhang werden im weiteren Verlauf folgende Maßnahmen berücksichtigt (GOTTSCHALK 2007, SCHELLMANN 2012):

- Verkürzung/ Verlängerung der Schichtdauer
- Hinzu-/ Wegnahme von Arbeitstagen einer Schicht, z. B. durch Wochenendarbeit oder Verkürzung / Verlängerung des Betriebsurlaubs
- Veränderung der Schichtanzahl pro Tag, z. B. durch Einführung einer Nachtschicht

Abbildung 23 veranschaulicht das Potential dieser Maßnahmen am Beispiel der Auswirkungen einer Schichtverlängerung oder der Einführung einer Zusatzschicht mit bestehendem Personal. Dadurch ergibt sich insgesamt eine Kapazitätserhöhung um 50%. Allerdings sind die genannten Maßnahmen nicht dauerhaft nutzbar, da ein kontinuierlicher Einsatz die vorhandenen Stundenkonten der Mitarbeiter überbelasten würde bzw. auf Dauer gesetzliche oder tarifrechtliche Grenzwerte überschritten werden (RALLY & HÄMMERLE 2010).

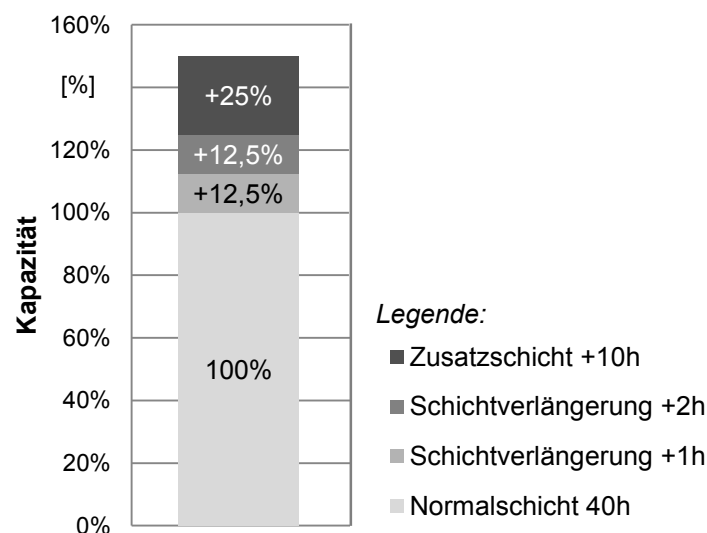


Abbildung 23: Kapazitätserweiterung bei bestehendem Personalstamm und gleichbleibender Schichtanzahl pro Tag (RALLY & HÄMMERLE 2010, S. 672)

Weitere in der Literatur genannte Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung, wie beispielsweise die Verringerung von Ausfallzeiten, die Fremdvergabe von Aufträgen oder Routenflexibilität innerhalb des Montagesystems (GOTTSCHALK 2007, SCHELLMANN 2012), finden im Rahmen dieser Arbeit keine Berücksichtigung, da sie entweder nicht auf die Organisationsform der Fließmontage anwendbar sind oder über den Betrachtungsrahmen dieser Arbeit, eine einzelne Montagelinie, hinausgehen.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

Zur Modellierung von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen führt GOTTSCHALK (2007) mehrere Parameter ein, die den Kapazitätsbetrag, den zeitlichen Rahmen zur Nutzung der Maßnahme sowie deren Kosten abdecken. Für die Bestimmung der benötigten Taktzeiten ist hierfür zunächst die resultierende Kapazitätsänderung der Maßnahme ΔKAP relevant, welche die Erhöhung oder Reduktion der montierten Stückzahl in Prozent darstellt⁴². Zusätzlich wird noch die Grundkapazität der Montagelinie KAP_g benötigt, die in Arbeitsstunden die Kapazität angibt, die ohne Einsatz von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen vorhanden ist. KAP_g und ΔKAP jeder vorhandenen Maßnahme sind neben den Taktzeitvielfachen $x_{i,j}$ und dem Stückzahlkorridor weitere Eingangsgrößen zur Bestimmung der Taktzeiten.

5.2.3.2 Bestimmung der Taktzeiten

Wie bereits in Formel 1 (S. 20) bei der Definition der Taktzeit deutlich wurde, steht die produzierbare Stückzahl s der Montagelinie in einem direkten Zusammenhang mit der Taktzeit t_t und der vorhandenen Arbeitszeit einer betrachteten Periode. Durch die zuvor erläuterten Möglichkeiten zur Anpassung der verfügbaren Kapazität ergibt sich ein Stückzahlkorridor für eine feste Taktzeit t_t , wobei s_{g,t_t} die Grundstückzahl ohne zusätzliche Kapazitätsmaßnahmen darstellt und s_{min,t_t} bzw. s_{max,t_t} entsprechend die minimal bzw. maximal mögliche Stückzahl einer Taktzeit bei den vorhandenen Maßnahmen (vgl. Abbildung 24).

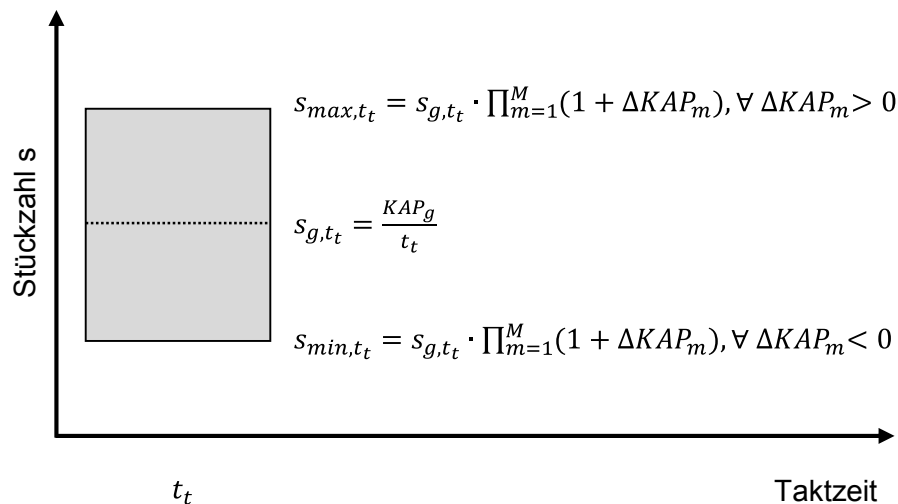


Abbildung 24: Stückzahlkorridor bei einer festen Taktzeit t_t

Bei der Berechnung des Kapazitätsbeitrags ΔKAP_m der M Maßnahmen sind deren gegenseitige Wechselwirkungen zu beachten. Beispielsweise kann in ei-

⁴² Weitere Parameter nach GOTTSCHALK (2007) werden in Abschnitt 5.5.3 genauer erläutert.

nem 3-Schicht-Betrieb die durchschnittliche Dauer der Schichten nicht über acht Stunden liegen, während bei weniger Schichten auch eine längere Dauer möglich ist.

Durch die vordefinierte einheitliche Werkerdichte der Methodik ist jetzt nicht nur die verfügbare Kapazität eine dynamische Größe, sondern auch die Taktzeit kann im Rahmen der daraus resultierenden Taktzeitvielfachen angepasst werden. Dies verdeutlicht Abbildung 25 durch einen Taktzeitsprung von der Basistaktzeit t_{tb} um die Taktzeitvielfache $x_{i,j}$ der Werkerdichtekombination W_i anhand der mathematischen Zusammenhänge dieser Größen.

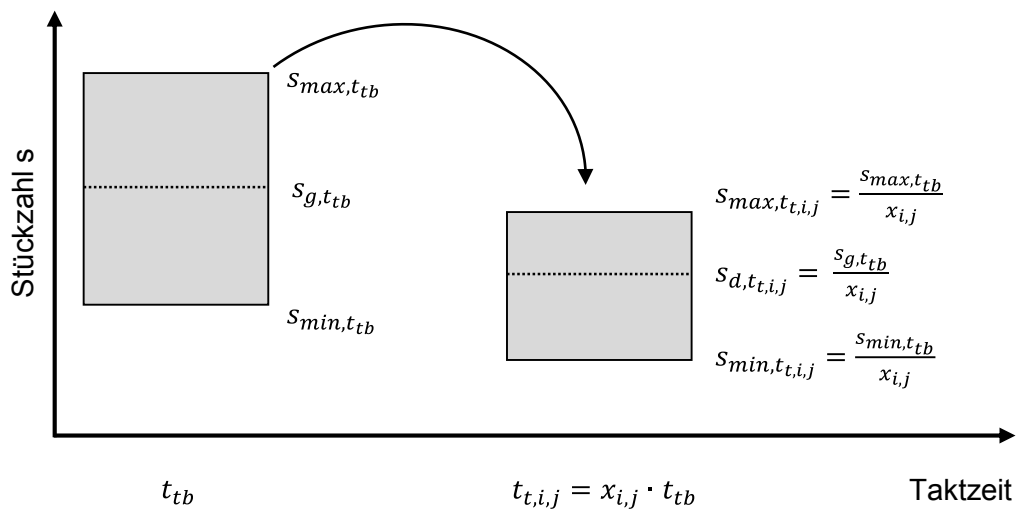


Abbildung 25: Verschiebung des Stückzahlkorridors durch eine Anpassung um das Taktzeitvielfache $x_{i,j}$

Mit Hilfe dieser mathematischen Zusammenhänge innerhalb des Stückzahlkorridors bei einer bestimmten Taktzeit und zwischen den Korridoren der voneinander abhängigen Taktzeiten können im Folgenden die tatsächlichen Taktzeiten bestimmt werden, auf die die Montagelinie ausgetaktet werden soll. Dabei sind zwei Fragen zu beantworten (vgl. Abbildung 26):

1. Welche Basistaktzeit t_{tb} und somit resultierende anderen Taktzeiten ergeben sich aufgrund der Kombination von Taktzeitvielfachen, Stückzahlanforderungen und vorhandenen zusätzlichen Maßnahmen?
2. Welche der in Abschnitt 5.2.2 theoretisch ermittelten Werkerdichtekombinationen W_i ist darauf aufbauend auszuwählen, um deren Werkerdichten in der nachfolgenden Ausplanung zu berücksichtigen?

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Ausstattung

2. Entscheidung zwischen alternativen Werkerdichtekombinationen W_i

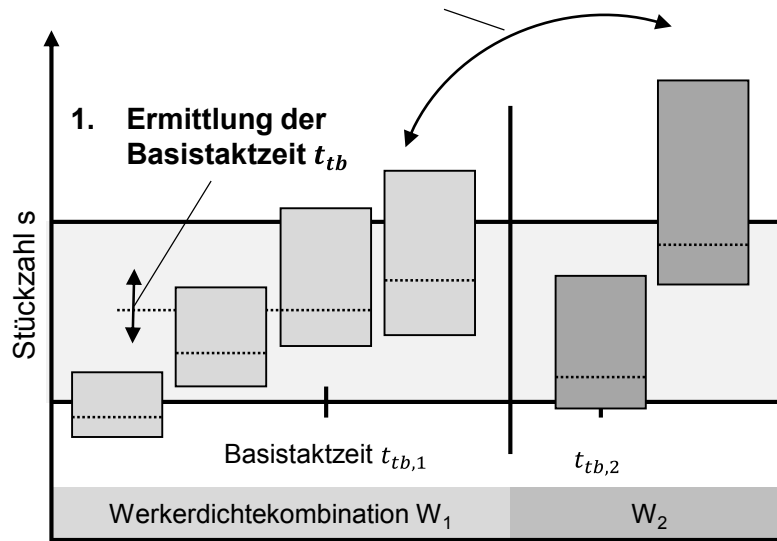


Abbildung 26: Entscheidungsbedarf bei der Bestimmung der Taktzeiten

Zur Einordnung der Taktzeiten im möglichen Lösungsraum inkl. der Auswahl der zusätzlich vorhandenen Kapazitätsanpassungsmaßnahmen können unterschiedliche Strategien verfolgt werden. Ein Ziel kann das Anstreben von möglichst hohen Taktzeiten sein, um möglichst vielfältige Arbeitsinhalte je Werker und somit eine Humanisierung der Arbeitsverhältnisse zu erreichen. Eine andere Möglichkeit besteht in der Bestimmung möglichst niedriger Taktzeiten, um eine möglichst hohe Auslastung der Betriebsmittel- und Personalkapazität zu erreichen⁴³. PRÖPSTER ET AL. (2013) liefern einen Überblick über sechs mögliche Strategien zur Bestimmung der Taktzeit im Rahmen von Taktzeitszenarien.

Die im Rahmen dieser Arbeit bei der Bestimmung der Taktzeiten⁴⁴ berücksichtigten Randbedingungen verfolgen zum einen das Ziel einer möglichst hohen Stückzahlflexibilität und zum anderen im Rahmen einer Brownfieldplanung eines geringen Umsetzungsaufwands. Die in der Beschreibung verwendeten Stückzahlgrößen sind in Abbildung 27 zusammenfassend visualisiert. Der Gesamtablauf der Taktzeitbestimmung ist abschließend nach der Erläuterung der einzelnen Bewertungsparameter in Abbildung 28 (S. 89) dargestellt.

⁴³ Niedrige Taktzeiten führen tendenziell zu einer höheren Auslastung des Gesamtsystems, wie auch durch Abbildung 14 (S. 45) deutlich wird.

⁴⁴ In den folgenden Ausführungen werden Taktzeiten bestimmt. In Abbildung 27 sind deren resultierende Stückzahlen s_{g,t_t} , s_{min,t_t} und s_{max,t_t} visualisiert, die sich über die in Abbildung 24 dargestellten Formeln unter Einbezug der jeweiligen Taktzeiten berechnen lassen.

Die Taktzeiten können nur innerhalb des vorgegebenen Intervalls der minimal und maximal umsetzbaren Taktzeiten [$t_{t,min}$, $t_{t,max}$] liegen (vgl. innere Iterationsschleife in Abbildung 28 (S. 89)). Die minimale Taktzeit wird dabei direkt von der Dauer des längsten, technisch unteilbaren Montageprozesses festgelegt, wie z. B. durch einen Befüllprozess oder einen komplexen anlagegebundenen Montagevorgang. Die Vorgabe einer maximalen Taktzeit ist hingegen meist weniger an direkt quantifizierbaren Werten festzumachen und kann beispielsweise durch den für die Werker maximal sinnvoll erlernbaren Arbeitsumfang beschränkt werden.

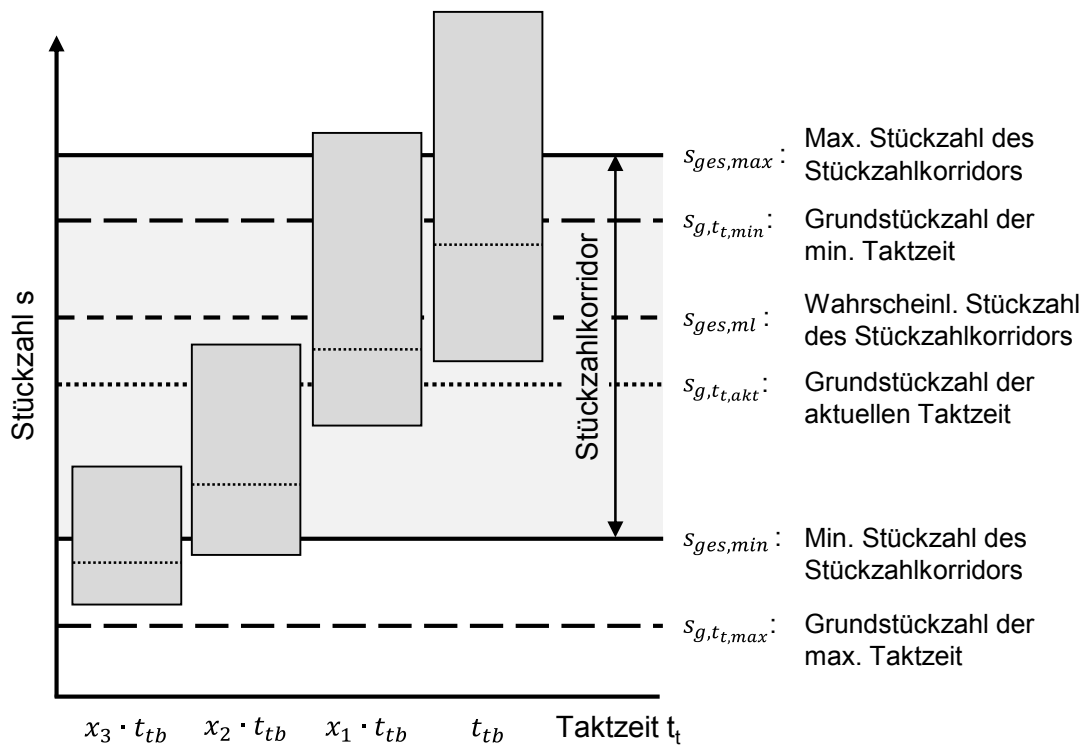


Abbildung 27: Parameter zur Bestimmung der resultierenden Taktzeiten am Beispiel einer Werkerdichtekombination

Weiterhin sind in jedem Planungsfall, ob Green- oder Brownfield, folgende Bewertungskriterien zu beachten, deren Reihenfolge auch der Priorisierung entspricht (vgl. Abbildung 28):

1. Gleichzeitig werden die Taktzeiten den Ausführungen zu Abbildung 24 und Abbildung 25 folgend derart bestimmt, dass mit Hilfe aller Stückzahlkorridore der zusammenhängenden Taktzeiten der gesamte prognostizierte Stückzahlkorridor möglichst vollständig abgedeckt wird.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

2. Ein weiteres Kriterium beim Vergleich unterschiedlicher Werkerdichtekombinationen W_i ist, dass möglichst viele Taktzeiten $t_{t,i,j}$ innerhalb des Gesamtstückzahlkorridors liegen.
3. Zusätzlich werden Kombinationen bevorzugt, bei denen eine der berechneten Taktzeiten $t_{t,i,j}$ möglichst nahe an der „Most-likely“-Stückzahl $s_{ges,ml}$ liegt, um im wahrscheinlichsten Stückzahlscenario ohne zusätzliche Kapazitätsmaßnahmen auskommen zu können.
4. Außerdem ist anzustreben, dass möglichst alle zu berücksichtigenden Taktzeiten der j einzelnen Taktzeitszenarien innerhalb des angestrebten Gesamtstückzahlkorridors mit dem Intervall $[s_{ges,min}, s_{ges,max}]$ liegen. Dadurch wird erreicht, dass alle optimalen Betriebspunkte des Szenarios (die Stückzahl ohne zusätzliche Kapazitätsmaßnahmen $s_{g,t_{t,i,j}}$) innerhalb des gewünschten Stückzahlkorridors liegen.

Im Rahmen einer Brownfieldplanung sind zusätzlich noch weitere Randbedingungen, wie folgend beschrieben, zu berücksichtigen, um den Anpassungsaufwand einzugrenzen. Deren Priorisierung gegenüber den zuvor genannten Randbedingungen ist unternehmensspezifisch zu entscheiden (vgl. Abbildung 28):

1. Eine der berechneten Taktzeiten $t_{t,i,j}$ soll möglichst nahe an der aktuellen Taktzeit $t_{t,akt}$ liegen, um den erstmaligen Aufwand bzgl. Umtaktung und Werkerqualifikation möglichst gering zu halten.
2. Darüber hinaus ist ebenfalls aus den zuvor genannten Gründen noch mit einzubeziehen, in welcher der Werkerdichtekombinationen W_i das Taktzeitszenario mit der aktuellen durchschnittlichen Werkerdichte $w_{\emptyset,akt}$ am nächsten an der aktuellen Taktzeit $t_{t,akt}$ liegt.

Die zuvor aufgeführten Punkte sind zur Bestimmung der geeignetsten Werkerdichte-/ Taktzeitkombination in einem Bewertungsschema abgebildet (vgl. Abbildung 28). Hierzu werden für die verschiedenen in Abschnitt 5.2.2 erarbeiteten Werkerdichtekombinationen W_i für alle möglichen Basistaktzeiten im Intervall der minimal und maximal möglichen Taktzeit die zuvor erläuterten Parameter berechnet. Je nach Anwendungsfall erscheint es zur Verringerung des Auswertungsaufwands sinnvoll, die Basistaktzeit in der Bewertung schrittweise zu erhöhen, z. B. um fünf, zehn oder 30 Sekunden. Nach Durchlauf aller möglichen Kombinationen wird die Werkerdichte-/ Taktzeitkombination ausgewählt, die den genannten Kriterien in der oben dargestellten Priorität am besten entspricht.

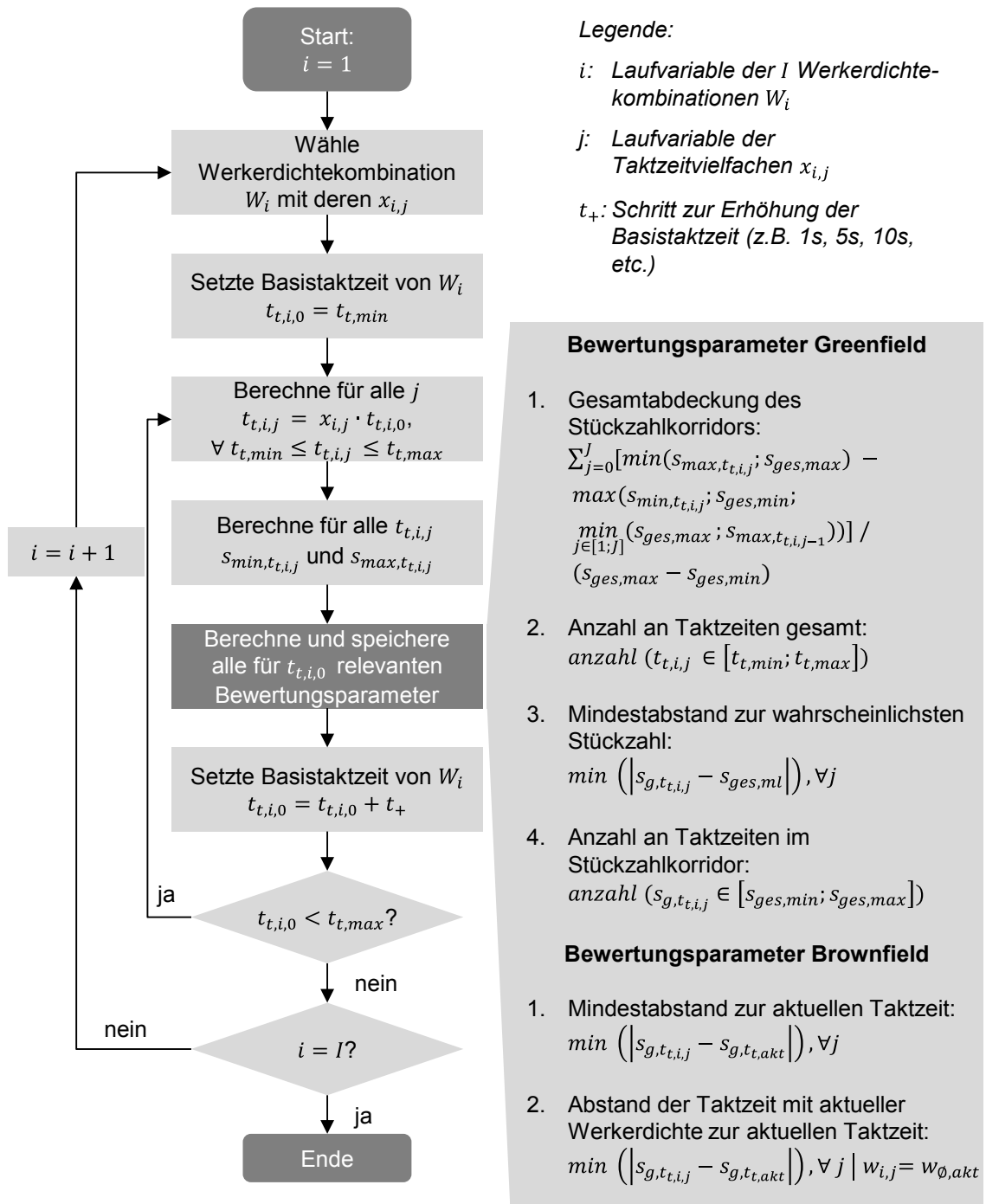


Abbildung 28: Ablauf der Bewertung der verschiedenen Werkerdichte-/ Taktzeitkombinationen

Ergebnis des in diesem Abschnitt vorgestellten Vorgehens zur Bestimmung der Taktzeitszenarien ist eine Werkerdichte-/ Taktzeitkombination, die unter Berücksichtigung der zusätzlich vorhandenen Kapazitätsmaßnahmen den prognostizierten Stückzahlkorridor bestmöglich abdeckt. Hierfür wurden unterschiedliche Kriterien definiert, die die Güte der vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

bewertbar machen. Diese Kombination aus Taktzeit und Werkerdichte ist Ausgangsbasis für die Austaktung der Montagelinie, die im nachfolgenden Abschnitt 5.3 erläutert wird. Somit wird durch diesen Planungsschritt die Grundlage für das weitere Vorgehen gelegt. Eine genauere Betrachtung, welche Taktzeit in Kombination mit welchen Kapazitätsmaßnahmen nach erfolgter Austaktung konkret für eine bestimmte Nachfragesituation herangezogen werden soll, erfolgt in Abschnitt 5.5.

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

5.3.1 Überblick

Nach der vorbereitenden Bestimmung der umsetzbaren Taktzeitszenarien erfolgt im nächsten Schritt die eigentliche Planung der Austaktung der Montagelinie. Diese wird manuell in Workshops unter Einbezug aller relevanten Wissensträger und Experten durchgeführt. Aus dem vorherigen Planungsschritt ist als Input die geeignete Werkerdichtekombination W_i ermittelt worden, sodass die folgenden für das weitere Vorgehen relevanten Eingangsparameter bekannt sind:

- Die J resultierenden Taktzeiten $t_{t,i,j}$
- Die jeweils mit diesen Taktzeiten verbundenen Werkerdichten $w_{i,j}$

Darüber hinaus sind für den beschriebenen Austaktungsprozess noch folgende Eingangsgrößen besonders relevant:

- Die Arbeitsvorgänge (AVOs) der einzelnen Varianten samt Montagedauer
- Die Häufigkeiten der zu produzierenden Varianten, z. B. aus Vergangenheitswerten oder Prognosen

Weitere typische Randbedingungen der Austaktung, wie die Qualifikation der Mitarbeiter, die Verknüpfung von Montageinhalten mit ortsgebundenen Betriebsmitteln etc., sind ebenfalls zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.3.2.3). Das wird durch die Integration aller relevanten Experten in den Planungsprozess gewährleistet und ist in einigen Planungsschritten auch mit Restriktionen verbunden. Sie werden im Folgenden zur Übersichtlichkeit und aufgrund der Übereinstimmung zu gängigen Austaktungsvorgehen hier nicht weiter im Detail aufgeführt, sind aber obligatorisch miteinzubeziehen. Ziel des in drei Schritte aufgeteilten Planungsprozesses ist die Vereinigung der beiden in Abschnitt 4.3 be-

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

schriebenen Kerninhalte der Austaktung nach Taktzeitszenarien (Abschnitt 4.3.2) sowie der variantenabhängigen Austaktung (Abschnitt 4.3.3). Abbildung 29 stellt diesen Planungsprozess in drei Schritten dar, die in den folgenden Abschnitten 5.3.2 bis 5.3.4 genauer betrachtet werden.

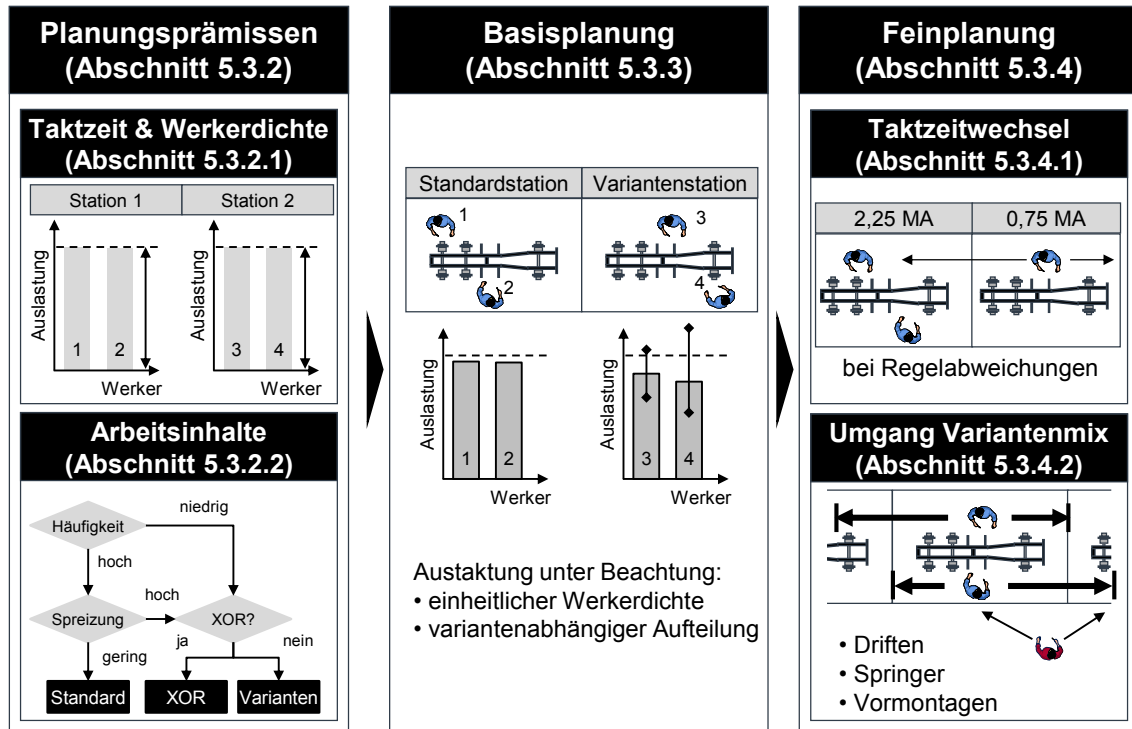


Abbildung 29: Überblick über den Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

Zunächst werden die *Planungsprämissen* festgelegt. Auf Seiten der Taktzeitszenarien ist aufbauend auf den vorherigen Untersuchungen die Taktzeit mit der dazugehörigen Werkerdichte auszuwählen, auf die im nächsten Schritt die Linie zuerst ausgetaktet werden soll. Um eine variantenabhängige Austaktung zu ermöglichen, müssen zudem die Arbeitsinhalte bzgl. ihrer Häufigkeit und ihrer Zeitspreizung in verschiedene Kategorien eingeteilt werden.

Anschließend erfolgt eine *Basisplanung* des Gesamtkonzepts im Rahmen von Workshops. Dabei wird die Montagelinie für die zuvor ausgewählte Taktzeit im Detail regelbasiert ausgetaktet, sodass eine schnelle Anpassungsfähigkeit auf die vorbestimmten Taktzeiten sowie auf einen sich verändernden Variantenmix ermöglicht wird. Im Abschluss erfolgt die *Feinplanung*, in der bei möglichen Regelabweichungen in der Basisplanung die detaillierte Austaktung der Taktzeitwechsel erfolgt. Außerdem wird in dieser Phase der Umgang mit varianten-

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

abhängigen Kapazitätsspitzen betrachtet. Diese drei Schritte werden in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

5.3.2 Festlegung der Planungsprämissen Taktzeit und Arbeitsinhalte

5.3.2.1 Planungsprämisse Taktzeit

Nachdem über das zuvor in Abschnitt 5.2 beschriebene Bewertungsschema die geeignete Werkerdichtekombination W_i zusammen mit den J resultierenden Taktzeiten $t_{t,i,j}$ bestimmt wurde, ist vor dem nachfolgenden Schritt der eigentlichen Austaktung die Taktzeit festzulegen, die im Rahmen der Grobplanung als „Starttaktzeit“ dienen soll. Mit ihr verbunden ist damit auch automatisch die entsprechende Werkerdichte w , die bei der Zuordnung von Arbeitsinhalten zu Stationen zu berücksichtigen ist. Theoretisch kann beliebig eine der zuvor bestimmten Taktzeit- / Werkerdichtekombinationen ausgewählt werden, da sie der Logik der Methodik folgend aufeinander aufbauen und mit geringem Aufwand ineinander umstellbar sind. Dennoch erscheint es sinnvoll, im Rahmen der Grobplanung die Kombination auszuwählen, die zum einen den geringsten Aufwand bei der erstmaligen Ausplanung bedeutet und die zum anderen auch mit einer hohen Wahrscheinlichkeit den „Hauptbetriebspunkt“ der Montagelinie innerhalb des prognostizierten Zeithorizonts darstellt. Letzteres ist deshalb von Bedeutung, da das zuerst betrachtete Szenario sehr detailliert geplant wird. Die Austaktung der anderen Taktzeiten wiederum erfolgt über die regelbasierte Anpassung der Werkerdichte, weshalb für diese Taktzeiten nur Regelabweichungen genauer betrachtet werden. Dementsprechend ergeben sich bei der Auswahl der „Starttaktzeit“ für die Ausplanung, im Folgenden als *Grundtaktzeit* t_{tg} bezeichnet, drei Alternativen:

1. Auswahl der Taktzeit $t_{t,i,j}$, die am nächsten an der aktuellen Taktzeit liegt, um den erstmaligen Planungsaufwand zu verringern
2. Auswahl der Taktzeit $t_{t,i,j}$, deren resultierende Stückzahl $s_{g,t_{t,i,j}}$ am nächsten an der am wahrscheinlichsten prognostizierten Stückzahl $s_{ges,ml}$ liegt, um das wahrscheinlichste Szenario am detailliertesten zu planen
3. Auswahl der Taktzeit $t_{t,i,j}$, die innerhalb der möglichen Taktzeiten eine mittlere Position einnimmt, damit die Taktzeitumstellung in beide Richtungen ausgehend von der Grundtaktzeit erfolgt und somit alle anderen Taktzeiten über möglichst wenige Sprünge angepasst werden

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

Welche der drei Alternativen herangezogen wird, ist abhängig vom vorliegenden Planungsproblem, wobei sie sich nicht zwangsläufig gegenseitig ausschließen. Folgt beispielsweise die Stückzahlprognose einer Gleichverteilung, stimmen Alternative 2 und 3 überein. Wird gleichzeitig im zukünftigen Stückzahlbedarf keine extreme Marktveränderung erwartet, liegt auch die aktuelle Taktzeit tendenziell in der Mitte des prognostizierten Korridors, was wiederum der Alternative 1 entspricht.

5.3.2.2 Planungsprämissen Arbeitsinhalte

Neben der Zuteilung einer einheitlichen Werkerdichte zu den Stationen wird im Rahmen des beschriebenen Austaktungsprozesses auch die Auftrennung von variantenbehafteten und -unbehafteten Arbeitsinhalten in Anlehnung an MEDO (2010) angestrebt. Dadurch kann der Handlungsbedarf bei Variantenmischschwankungen verringert und können gleichzeitig Maßnahmen zum Umgang mit Zeitspreizungen fokussieren werden. Dementsprechend sind die Arbeitsinhalte zunächst hinsichtlich ihrer Variantenabhängigkeit einzuteilen. Ziel ist eine hohe Anzahl an variantenunabhängigen Stationen bzw. Arbeitsplätzen zu erreichen.

Zur Systematisierung und Handhabbarkeit der Vielzahl an Montageprozessen ist es sinnvoll, diese zunächst in bereits möglichst einheitliche Gruppen zusammenzufassen. Es bietet sich eine Betrachtung der unterschiedlichen Bauteile an, um gleichartige Teile anschließend zu Teilefamilien (TF)⁴⁵ zu gruppieren. Das bietet den Vorteil, dass bei dieser Einteilung zunächst keine speziellen Kenntnisse des Montageprozesses notwendig sind und tendenziell dadurch sehr ähnliche Bauteile, die i. d. R. auch einem vergleichbaren Montageprozess folgen sollten, bereits zusammengefasst sind. Anschließend sind die Teilefamilien nach vier Kriterien zu bewerten, um sie dem Konzept der variantenabhängigen Austaktung in Standard- und Variantenarbeitsinhalte vorsortieren zu können. Dieser Ablauf ist in Abbildung 31 dargestellt und wird im Folgenden zusammen mit den dazu notwendigen Kennzahlen genauer erläutert. Die hierzu benötigte Häufigkeitsbetrachtung von Teilefamilien und Varianten kann entweder auf Vergangenheits- oder auf Prognosedaten beruhen.

⁴⁵ Einzelteile, die sich in ihrer Endform stark ähneln, aus dem gleichen Material bestehen und somit oft auf denselben Anlagen produziert werden können, können nach REFA (1993) zu sog. „Teilefamilien“ zusammengefasst werden. Diese auf die Fertigung fokussierte Definition kann gleichbedeutend auch auf die Montage übertragen werden.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Auslastung

Zur Identifikation von Standardmontageprozessen ist zunächst die Verbauhäufigkeit der Teilefamilie im gesamten Variantenprogramm zu untersuchen. Nur Teilefamilien, die in einem Großteil des zu montierenden Programms enthalten sind, eignen sich für die Zuordnung zu einem Standardarbeitsplatz. Die hierfür relevante Kennzahl wird im Folgenden als Verbaquote $v_{q,TF}$ bezeichnet:

$$v_{q,TF} = \frac{\text{Anzahl Fahrzeuge mit Teilefamilie } TF}{\text{Anzahl Fahrzeuge gesamt}} \quad (4)$$

Der Grenzwert für $v_{q,TF}$ ist unternehmens- und fallspezifisch festzulegen und sollte sich an die Zielvorgabe für die durchschnittliche Auslastung a_\emptyset der Montagelinie richten. Wird beispielsweise eine a_\emptyset von mindestens 80% gefordert, sollte auch der Grenzwert für $v_{q,TF}$ bei der Klassifizierung bei 80% liegen.

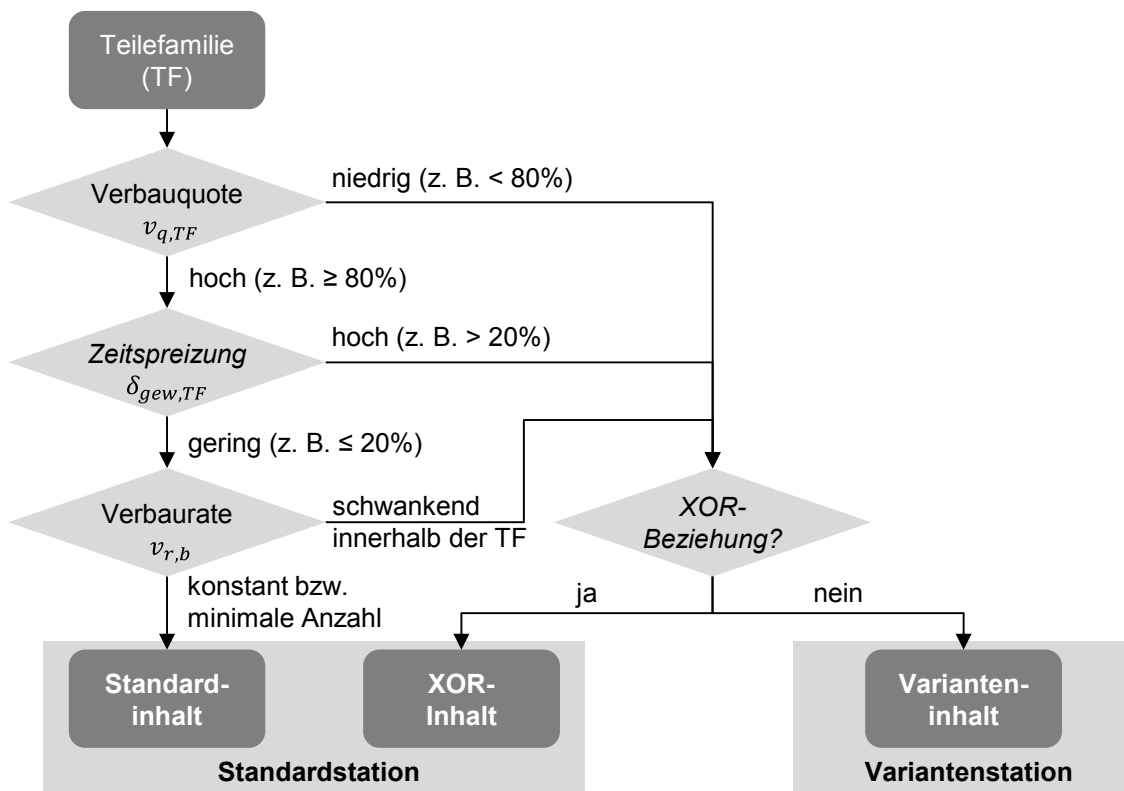


Abbildung 31: Vorgehen zur variantenabhängigen Einteilung der Arbeitsinhalte

Als zweites spielen bei Teilefamilien mit hoher Verbaquote die Montagezeitunterschiede innerhalb der Teilefamilie eine Rolle, da nur eine homogene Montagedauer ein variantenunabhängiges Arbeiten ermöglicht. Dementsprechend ist die gewichtete Zeitspreizung $\delta_{gew,TF}$ der Teilefamilie TF , die insgesamt B Bauteile mit der Vorgabezeit $t_{v,b}$ beinhaltet, zu bestimmen. Sollten innerhalb der Teilefamilien noch unterteilbare Montageprozesse vorliegen, z. B. aufgrund eines

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

Verbaus über mehrere Stationen mit unterschiedlichen Betriebsmitteln, sind diese einzelnen, dann nicht mehr sinnvoll teilbaren Prozesse separat zu bewerten und zuzuordnen. Die Gewichtung erfolgt bezogen auf die minimale Vorgabezeit:

$$\delta_{gew,TF} = \frac{\max_{b \in [1;B]} (t_{v,b}) - \min_{b \in [1;B]} (t_{v,b})}{\min_{b \in [1;B]} (t_{v,b})} \quad (5)$$

Der Grenzwert für die Einteilung ist individuell festzulegen, sollte allerdings im Bereich $1 - a_\emptyset$ liegen, um die angestrebte Auslastung zu erreichen. Im vorherigen Beispiel liegt der Grenzwert somit bei 20%.

Anschließend ist für häufige Teilefamilien mit geringer Zeitspreizung noch zu überprüfen, inwieweit sich die Verbauhäufigkeit der Teile innerhalb der Teilefamilie unterscheidet. Ein Beispiel kann hier die Montage einer unterschiedlichen Anzahl an Achsen oder Haltern sein. Zur eindeutigen Unterscheidung zur Verbaquote wird diese Kennzahl im Folgenden als Verbaquote $v_{r,b}$ des Bauteils b innerhalb der Teilefamilie TF bezeichnet:

$$v_{r,b} = \frac{\text{Anzahl Bauteile } b \text{ im Fahrzeugprogramm}}{\text{Anzahl Fahrzeuge mit Bauteil } b} \quad (6)$$

Teilefamilien, die nach dieser Bewertung eine konstante Verbaquote über alle Bauteile hinweg aufweisen, können als Standardarbeitsinhalt klassifiziert werden. Bei einer schwankenden Verbaquote kann nur die minimale, einheitliche Anzahl an Bauteilen den Standardinhalten zugeordnet werden, wobei im Rahmen der Austaktung zu überprüfen ist, ob eine Aufteilung gleicher Bauteile auf verschiedene Arbeitsplätze sinnvoll umsetzbar ist.

Die restlichen Arbeitsinhalte, also Teilefamilien mit geringer Verbaquote, mit hoher gewichteter Zeitspreizung oder Arbeitsinhalte mit uneinheitlicher Verbaquote, sind noch einer letzten Bewertung zu unterziehen, um die Anzahl an Standardarbeitsplätzen erhöhen zu können. Dazu wird neben den Standard- und Variantenarbeitsinhalten eine dritte Kategorie eingeführt: XOR-Arbeitsinhalte⁴⁶. Unter Einbezug von Experten ist zu untersuchen, ob Arbeitsinhalte vorliegen, die sich gegenseitig ausschließen, aber zusammengenommen eine hohe Verbaquote verbunden mit einer geringen Zeitspreizung und einer einheitlichen Verbaquote aufweisen. Als Beispiel aus dem Nutzfahrzeugbereich können die beiden Teilefamilien Sattel- und Anhängerkupplung dienen. Ein LKW erhält in der Regel

⁴⁶ Eine XOR-Verknüpfung (engl.: exclusive or) stellt in der Aussagenlogik eine entweder-oder-Logik dar und wird auch als Anti- oder Kontravalenz bezeichnet (KOHN & ÖZTÜRK 2012).

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

entweder das eine oder das andere Bauteil, was zusammengenommen zu einer hohen Verbauquote mit einheitlicher Verbaurrate führt. Um diese Teilefamilien als XOR-Arbeitsinhalte klassifizieren zu können, ist somit nur noch zu untersuchen, ob die Montageprozesse eine ähnliche Vorgabezeit aufweisen.

Zusammenfassend sind nach der Analyse der Arbeitsinhalte alle für den betrachteten Bereich relevanten Montageprozesse in die Kategorien Standard-, XOR- oder Variantenarbeitsinhalt eingeteilt. In der nachfolgenden Austaktung stellen die beiden erstgenannten ein Potential für Standardstationen/-arbeitsplätze dar.

5.3.3 Basisplanung der Austaktung

5.3.3.1 Visuelle Unterstützung der Planung mit variantenabhängigen Yamazumi-Diagrammen

Die regelbasierte Planung der Austaktung der Montagelinie nach den in Abschnitt 4.3 vorgestellten Kerninhalten ist im Rahmen von Workshops unter Einbezug aller relevanten Experten durchzuführen, um die Vielzahl an IT-technisch nicht erfass- bzw. abbildbaren Restriktionen mit berücksichtigen zu können. Folgende Rollen sollten im Workshopteam vertreten sein⁴⁷:

- Operative Führungskraft des Montageabschnitts (i.d.R.: Meister)
- Werker
- Montage- bzw. Anlagenplaner
- Logistikplaner
- Lean-Experte /-Moderator
- Mitarbeitervertretung (Betriebsrat, Vertrauenskörper o. ä.)

Um diese unterschiedlichen Teilnehmer mit ihrem unterschiedlichen Qualifikationshintergrund bestmöglich in die Planungen einbinden zu können, ist die Visualisierung des aktuellen Planungsstandes sowie ggf. auch der Ist-Situation notwendig. Ein geeignetes Werkzeug hierfür ist das sog. Yamazumi-Diagramm⁴⁸, welches in Säulendiagrammen die Auslastung der Mitarbeiter analog zu Abbildung 5 (S. 21) darstellt und gleichzeitig durch eine unterschiedliche Farbgebung der AVOs auch die Wertschöpfung und Verschwendung im Montageprozess

⁴⁷ Abhängig von Größe und Struktur des Unternehmens können mehrere Personen zusammen eine der genannten Rollen übernehmen oder, bei vorhandener Kompetenz, eine einzelne Person mehrere Rollen einnehmen.

⁴⁸ auch: Auslastungs- oder Arbeitsverteilungsdiagramm

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

verdeutlicht (ELMER 2012). Yamazumi-Diagramme können sowohl digital mit Hilfe gängiger Tabellenkalkulationssoftware als auch per Hand, z. B. mit Papier- oder Magnetstreifen, erstellt werden. Während die digitale Variante die Vorteile einer leichteren Anpassung von Prozessen, eines geringeren Vorbereitungsaufwands und insbesondere einer nachhaltigen Dokumentation bietet, kann aufgrund des höheren interaktiven Charakters, und somit der stärkeren Einbindung aller Beteiligten⁴⁹, die manuelle Variante dennoch empfohlen werden. Die finale Dokumentation sollte aus praktischen Gründen allerdings digital erfolgen.

Zur Umsetzung des vorgestellten Vorgehens ist eine Zuordnung der Arbeitsinhalte gemäß der in Abschnitt 5.3.2.2 diskutierten Klassifizierung erforderlich. Abbildung 32 zeigt die Erweiterung der herkömmlichen Yamazumi-Darstellung um die drei dort eingeführten Kategorien Standard-, XOR- und Variantenarbeitsinhalte.

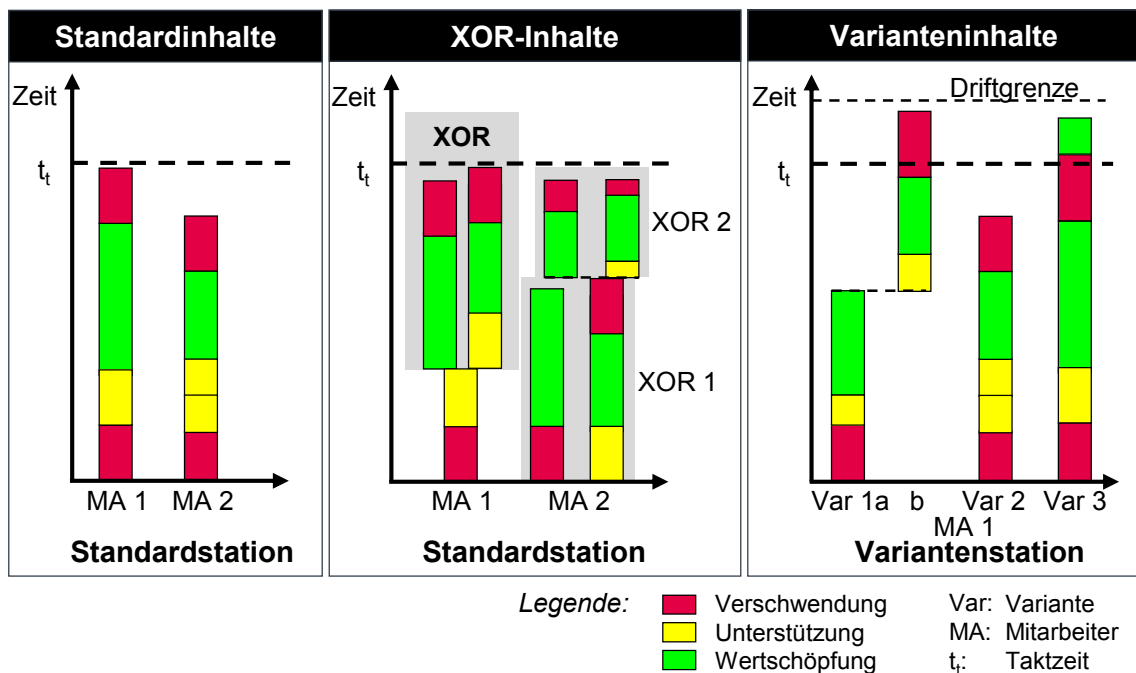


Abbildung 32: Variantenabhängige Yamazumi-Diagramme

Standardarbeitsinhalte sind entsprechend der klassischen Anwendung des Yamazumi-Diagramms übereinander anzuordnen. Um mit Hilfe der Erstellung der Diagramme nicht nur die Austaktung durchzuführen, sondern auch die Wertschöpfung zu analysieren, ist es sinnvoll die einzelnen AVOs der Teilefamilien separat aufzuführen und sie bzgl. ihres Beitrags zur Wertschöpfung zu analysie-

⁴⁹ Dieser Zusammenhang hat sich in vielen Workshops beim später vorgestellten Anwender als auch in Industrieprojekten des *iwb* bestätigt.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

ren⁵⁰. *XOR-Arbeitsinhalte* werden nebeneinander angeordnet. Sollten mehrere, voneinander unabhängige XOR-Inhalte an einer Station verbaut werden, dann ist zur Vermeidung einer Überlastung der Mitarbeiter der längere Prozess für die Addition der Prozesse heranzuziehen (vgl. XOR 1 und XOR 2 in Abbildung 32). Zur besseren Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit sind für die *Varianteninhalte* repräsentative Varianten auszuwählen, die in den Yamazumi-Diagrammen separat betrachtet werden sollen. Bei nur leichten Unterschieden können die Balken auch nebeneinander abgebildet werden (vgl. Variante 1a und b in Abbildung 32). Bei größeren Unterschieden ist eine getrennte Aufnahme der Varianten sinnvoll.

Da im Diagramm nur einige repräsentative Varianten abgebildet werden, sind zur Vollständigkeit alle weiteren Teilefamilien noch zusätzlich den Variantenstationen zuzuordnen ohne direkte kapazitive Einordnung. Für eine vollständige Betrachtung aller Varianten ist das Werkzeug Yamazumi-Diagramm nicht geeignet⁵¹, weshalb im Nachgang mittels Simulation (vgl. Abschnitt 5.4) die Austaktung über das gesamte Variantenprogramm hinweg bewertet wird. Dementsprechend sind für die variantenbehaftete Anwendung der Yamazumi-Diagramme noch die Referenzfahrzeuge auszuwählen, die die wichtigsten Varianten repräsentieren. Ein geeignetes Werkzeug hierfür ist die ABC-Analyse⁵² unterstützt durch eine Untersuchung der variantentreibenden Ausstattungsmerkmale für den betrachteten Montagebereich.

5.3.3.2 Regelbasierte Austaktung für die Grundtaktzeit

Die Austaktung wird in einem manuellen Probierversahren unter Berücksichtigung aller vorhandenen Restriktionen (vgl. Abschnitt 2.3.2.3) sowie unter Anwendung gängiger Methoden der schlanken Produktion⁵³, wie 5S, Poka Yoke, Verschwendungsanalyse, Wegediagramm etc., durchgeführt. Da diese Methoden in der Wissenschaft und Praxis vielfach diskutiert und erprobt sind, wird auf deren Beschreibung im Folgenden verzichtet. Im Kern der anschließenden Erläuterungen des Planungsvorgehens stehen vielmehr die entwickelten Regeln, die

⁵⁰ Detaillierte Ausführungen zur Verschwendungsanalyse finden sich u. a. bei MONDEN (1998).

⁵¹ Der Einbezug aller Varianten über eine nach der Häufigkeit gewichtete kapazitive Abbildung der AVOs ist prinzipiell möglich. In der Praxis hat sich gezeigt, dass hier zum einen die Akzeptanz bei den Anwendern nicht sehr hoch ist und zum anderen gerade bei AVOs mit sehr geringer Häufigkeit aufgrund der niedrigen Balken keine übersichtliche Darstellung möglich ist.

⁵² vgl. DAENZER & HABERFELLNER 2002, LINDEMANN 2009

⁵³ vgl. MONDEN 1998, SYSKA 2006, LIKER 2007

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

die gleichzeitige Berücksichtigung der Stückzahl- und Variantenflexibilität ermöglichen.

Aufbauend auf den in Abschnitt 4.3.2 und 4.3.3 eingeführten Aspekten der Austaktung nach Taktzeitszenarien und der variantenabhängigen Austaktung ergeben sich die beiden Hauptregeln des Austaktungsvorgehens (vgl. Abbildung 33):

Hauptregel H1:

Die Arbeitsinhalte sind derart zuzuordnen, dass an den einzelnen Montagestationen eine einheitliche Werkerdichte eingehalten wird. Als Taktzeit wird die zuvor festgelegte Grundtaktzeit t_{tg} (vgl. Abschnitt 5.3.2.1) vorgegeben, aus der sich die einzuhaltende Werkerdichte ergibt. Ist die einheitliche Werkerdichte an einer Station aufgrund von Stationsrestriktionen (vgl. Abschnitt 2.3.2.3) nicht umsetzbar, so ist sie durch Gruppenbildung über benachbarte Stationen oder über bandnahe Vormontagen hinweg zu generieren.

Hauptregel H2:

Die Arbeitsinhalte sind variantenabhängig den einzelnen Stationen zuzuordnen: Standard- und XOR-Arbeitsinhalte zu Standardstationen, Varianteninhalte entsprechend zu Variantenstationen. Bei Standardstationen ist eine hohe Auslastung nahe 100% anzustreben, während in Variantenstationen die Auslastung abhängig der Zeitspreizung und der Möglichkeiten zum flexiblen Umgang mit Kapazitätsspitzen (Drift, Springereinsatz) ggf. niedriger zu wählen ist⁵⁴.

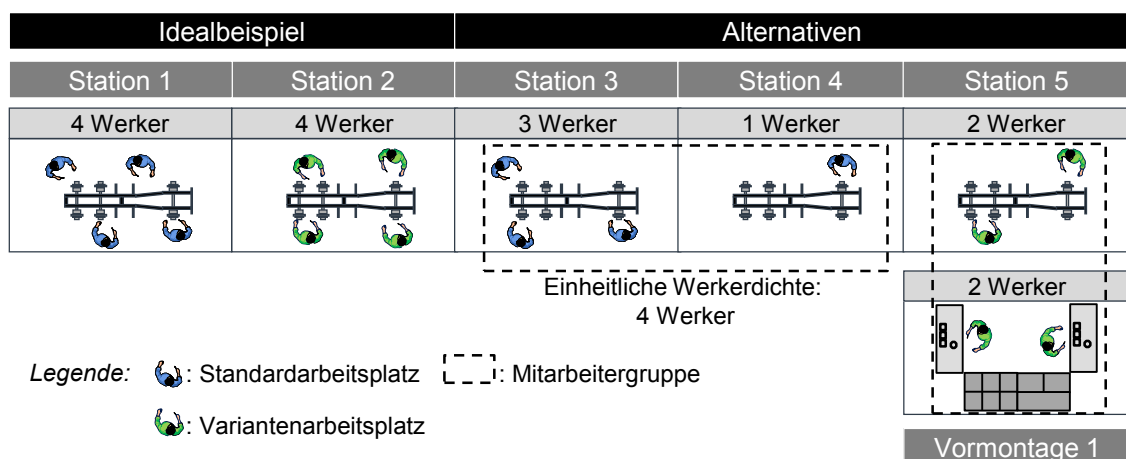


Abbildung 33: Regeln H1 und H2: Einplanung einer einheitlichen Werkerdichte und variantenabhängige Zuordnung von Arbeitsinhalten

⁵⁴ Diese Zielvorgabe für die Auslastung entspricht den Leitlinien von MEDO (2010). Der Wirkzusammenhang zwischen der durchschnittlichen Auslastung von Stationen und deren Zeitspreizung wird auch von SWIST (2014) bestätigt.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

Es wird deutlich, dass diese beiden Hauptregeln, die das Grundkonzept der vorgestellten Methodik widerspiegeln, sich stark gegenseitig beeinflussen und in der reellen Anwendung zu Konfliktpotentialen führen können, die eine gleichzeitige Anwendung erschweren oder gar unmöglich machen können. Insbesondere folgende Aspekte stellen Konfliktpotentiale dar:

- Nach Regel H1 ist die Werkerdichte und somit die Kapazität einer jeden Station fest vorgegeben. Über Regel H2 ergibt sich die Kapazität der Station primär aus der Klassifikation der Arbeitsinhalte. Es erscheint unwahrscheinlich, dass eine gleichmäßige Verteilung über das Band hinweg möglich ist. Insbesondere in der Nutzfahrzeugmontage dürfte trotz der Bemühungen zur Schaffung von Standardinhalten der Bedarf an variantenbehafteten Kapazitäten tendenziell höher liegen.
- Selbst unabhängig von der Werkerdichte an sich entsteht durch die variantenabhängige Auftrennung der Arbeitsinhalte die Gefahr, dass unter Berücksichtigung weiterer Restriktionen, insbesondere der Montagevorrangbeziehungen, nicht ausreichend Arbeitsinhalte für eine bestimmte Kategorie vorhanden sind. Dies kann an bestimmten Stationen zu einer Über- oder Unterauslastung führen.
- Um bei Stationsrestriktionen dennoch eine einheitliche Werkerdichte zu erreichen, ist nach Regel H1 eine Gruppenbildung über die Stationsgrenze hinweg vorgesehen. Aufgrund der variantenabhängigen Zuteilung aus Regel H2 kann dadurch eine Vermischung der beiden Stationskategorien erfolgen.

Um mit diesen Konfliktpotentialen umzugehen und eine gleichzeitige Anwendung beider Gesichtspunkte zu ermöglichen, sind zusätzliche Regeln erforderlich, im Folgenden als Nebenregeln bezeichnet. Sie erweitern z. T. die bestehenden Hauptregeln, schwächen sie in manchen Fällen aber auch ab bzw. gewichten sie untereinander in ihrer Priorisierung, um in der Gesamtheit eine gemeinsame Anwendung und somit eine schnelle Anpassungsfähigkeit sowohl auf Stückzahl- als auch auf Variantenmixschwankungen zu ermöglichen. Solange die Regeln H1 und H2 ohne Einschränkungen umsetzbar sind, müssen die Nebenregeln dementsprechend nicht berücksichtigt werden.

Die erste Nebenregel N1 hat die bislang angestrebte Einhaltung der einheitlichen variantenspezifischen Klassifikation von Arbeitsinhalten an einer Station im Fokus. Um eine möglichst hohe Standardisierung und Transparenz des Montageablaufs zu erreichen und gleichzeitig bei variantenbehafteten Stationen Spiel-

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

raum zum gegenseitigen Ausgleich bei Variantenmixschwankungen sowie auch für variantenbeherrschende Maßnahmen zu haben, ist diese Vorgabe in Regel H2 auf jeden Fall sinnvoll. Wie bereits zuvor diskutiert, wird diese Einschränkung in der Realität oft zu einer geringen Auslastung der Stationen führen, falls für den entsprechenden Montageabschnitt nicht ausreichend Arbeitsinhalte für Standard- bzw. Variantenstationen vorhanden sind. Daraus ergibt sich folgende Nebenregel, die in Abbildung 34 veranschaulicht ist:

Nebenregel N1:

Die Auftrennung von Standard-/ XOR- und Variantentätigkeiten kann auch auf Arbeitsplatzebene erfolgen und somit können variantenbehaftete und -unbehaftete Mitarbeiter gemeinsam an einer Station eingesetzt werden. Die Einhaltung der einheitlichen Mitarbeiteranzahl innerhalb der zwei Mitarbeitergruppierungen hat oberste Priorität und ist ggf. über benachbarte Stationen zu erreichen. Im Rahmen der Austaktung oder bei Anpassungsbedarfen sind beide Gruppen dementsprechend separat zu betrachten. Ist dies nicht möglich, ist eine Einhaltung der einheitlichen Werkerdichte auf Stationsebene unabhängig der Klassifikation der Arbeitsplätze anzustreben. Um letzteres zu vermeiden, können zusätzlich auch mehrere gleichartige Mitarbeitergruppen, die jeweils der einheitlichen Werkerdichte entsprechen, einer Station zugeordnet werden, z. B. aufgrund von ortsfesten Betriebsmitteln. Bei der späteren Ausplanung einer Taktzeiterhöhung ist stationsübergreifend auf die maximale Werkerdichte zu achten.

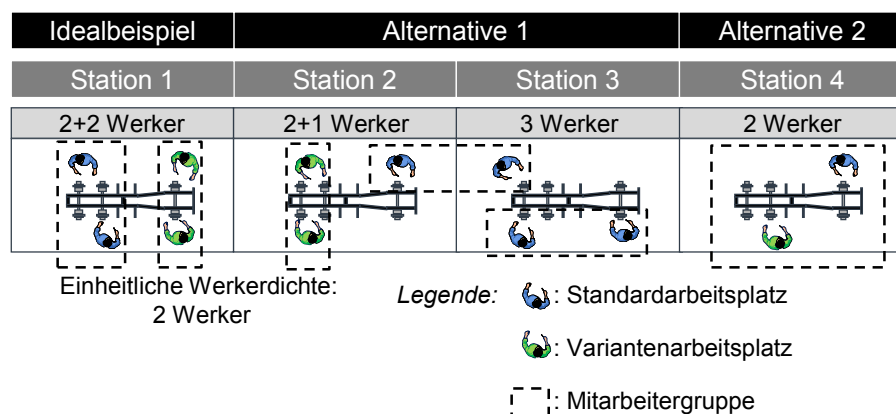


Abbildung 34: Regel N1: Trennen der Arbeitsinhalte auf Arbeitsplatz- anstatt auf Stationsebene

Mit Hilfe dieser Regel wird erreicht, dass ein starres Einhalten der Hauptregeln nicht zu einer zu geringen Auslastung der Montagelinie führt. Durch den gleichzeitigen Fokus auf die Einhaltung der einheitlichen Werkerdichte wird die Stück-

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Ausstattung

zahlflexibilität durch die Taktzeitszenarien gegenüber der Variantenflexibilität priorisiert. Dies geschieht nicht aufgrund einer höheren Bedeutung der einen gegenüber der anderen Flexibilitätsart, sondern ist vielmehr dem damit verbundenen Anpassungsaufwand bei Nachfrageschwankungen geschuldet. Dieser liegt bei einer Neuplanung von Taktzeitwechseln mit unabgestimmter Werkerdichte deutlich höher als durch zusätzlichen, auch noch unsicheren Aufwand, der durch den geringeren Anteil an Standardarbeitsplätzen bei der Taktzeitumstellung entsteht. Um dennoch den Anteil an Standardtätigkeiten bei Taktzeitwechseln zu erhöhen, wird in Abschnitt 5.3.4 eine Zusammenfassung über mehrere Stationen hinweg diskutiert.

Die nachfolgenden Nebenregeln N2 und N3 zielen auf die Problemstellung der geringen Auslastung einzelner Arbeitsplätze bei einer strikten Einhaltung der bisherigen Regeln ab (siehe Abbildung 35 und Abbildung 36):

Nebenregel N2:

Ist aufgrund von stationsbedingten Restriktionen ein Verschieben von Arbeitsinhalten einer Kategorie auf eine bestimmte Station nicht möglich, dann können diese Arbeitsinhalte stationsübergreifend in einem Arbeitsplatz oder einer Mitarbeitergruppe zusammengefasst werden.

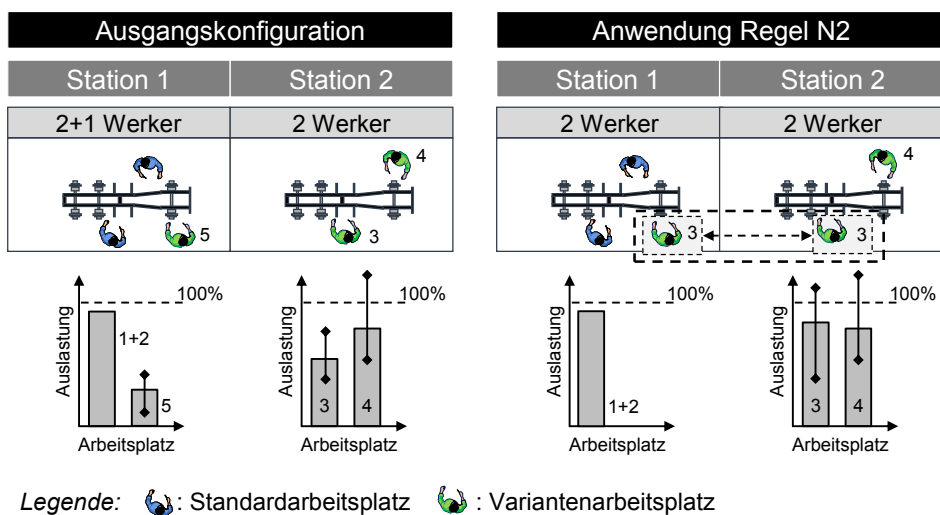


Abbildung 35: Regel N2: Stationsübergreifendes Zusammenfassen von Arbeitsinhalten

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

Nebenregel N3:

Ist es aufgrund der vorhandenen Arbeitsinhalte eines Bandabschnittes nicht möglich, eine strikte Trennung zwischen Standard- und Variantenarbeitsplätzen zu erreichen, können beide Inhalte auch zu einem Arbeitsplatz zusammengefasst werden. In Abhängigkeit der Zusammensetzung des so geschaffenen Arbeitsplatzes kann er entweder als Standardarbeitsplatz betrachtet werden, an dem auch geringe variantenbedingte Schwankungen und somit auch ggf. geringe Springer-einsätze auftreten können. Oder es handelt sich dabei um einen Variantenarbeitsplatz, der eine gewisse standardisierte Grundlast aufweist und somit einer geringeren variantenbedingten Schwankung unterliegt, weshalb tendenziell weniger Flexibilitätsmaßnahmen notwendig sind.

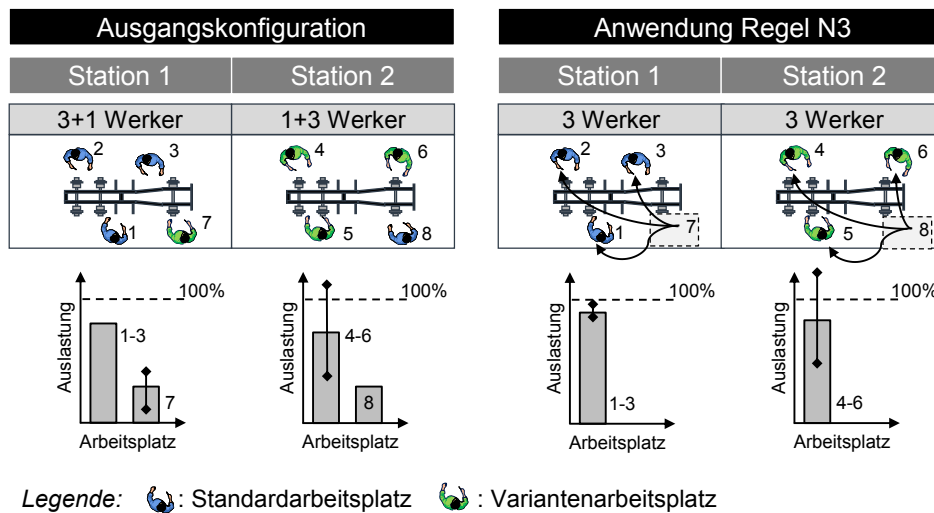


Abbildung 36: Regel N3: Zusammenfassen von Standard- und Varianteninhalten

Ziel ist es, zunächst mit Hilfe einer Gruppenbildung und Zusammenfassung von Arbeitsinhalten über Stationsgrenzen hinweg bei stationsgebundenen Tätigkeiten eine hohe Auslastung innerhalb einer Arbeitsplatzkategorie zu erreichen (Regel N2). Sollte auch mit dieser Maßnahme keine zufriedenstellende Auslastung bei Einhaltung der einheitlichen Werkerdichten erreicht werden können, kommt Regel N3 zum Einsatz. Gerade letztere Regel führt zu einem erhöhten Mehraufwand bei Umstellungen der Auslegung der Montagelinie im Falle von Variantemixschwankungen. Demgegenüber wird der Aufwand bei einem Taktzeitwechsel möglichst gering gehalten. Auf die Feinplanung des Umgangs mit beiden Arten der Nachfrageschwankung wird im folgenden Abschnitt genauer eingegangen.

5.3.4 Feinplanung der Anpassungsbedarfe

5.3.4.1 Planung der Taktzeitwechsel

Ziel der zuvor erfolgten Basisplanung ist u. a. eine schnelle Umstellung auf die verschiedenen vorgeplanten Taktzeiten durch Einhalten einer einheitlichen Werkerdichte auf Stationsebene und durch Trennung der unterschiedlichen Kategorien an Arbeitsinhalten (Standard-/ XOR- oder Varianteninhalte). Unter ausschließlicher Einhaltung der Austaktungsregeln H1 und H2 (vgl. Abschnitt 5.3.3.2) ist diese Umstellung auch mit sehr geringem Aufwand durch Anpassung der Werkerdichte auf die jeweilige Taktzeit möglich (analog zu Abbildung 17, S. 68). Die Arbeitsinhalte sind lediglich aufgrund der neu geschaffene Kapazitätssituation innerhalb der Mitarbeitergruppen auf die neue Anzahl an Arbeitsplätzen zu verteilen.

Sobald in der Basisplanung auch die Nebenregeln N1 bis N3 angewendet werden, ist zusätzlicher Planungsaufwand für die Taktzeitumstellungen erforderlich. Da die einheitliche Werkerdichte an den Stationen nicht mehr strikt nach Standard- oder Variantenstation aufgetrennt ist, wird durch ein einfaches Anpassen der Werkerdichte die Auftrennung der verschiedenen Arbeitsinhaltsklassen aufgelöst. Dementsprechend wird in Regel N1 trotz dieser Abschwächung der Hauptregeln gefordert, innerhalb der variantenbehafteten und -unbehafteten Mitarbeitergruppen die einheitliche Werkerdichte aufrechtzuerhalten. Somit ist bei der Anpassung der Taktzeit nicht mehr die einzelne Station ausschlaggebend, sondern die jeweilige Mitarbeitergruppe.

Abbildung 37 zeigt hierzu ein Idealbeispiel, in welchem die einheitliche Werkerdichte von zwei Mitarbeitern jeweils an einer Station erfüllt wird und dementsprechend die Mitarbeiteranzahl zu den jeweiligen Taktstufen angepasst werden kann. Im Alternativbeispiel ist dies wiederum nur über eine stationsübergreifende Zusammenfassung möglich. Für beide Beispiele ist auch der Logik der Taktzeit-szenarien folgend der Taktzeitwechsel zu nächsthöheren und -niedrigeren Taktzeit dargestellt.

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

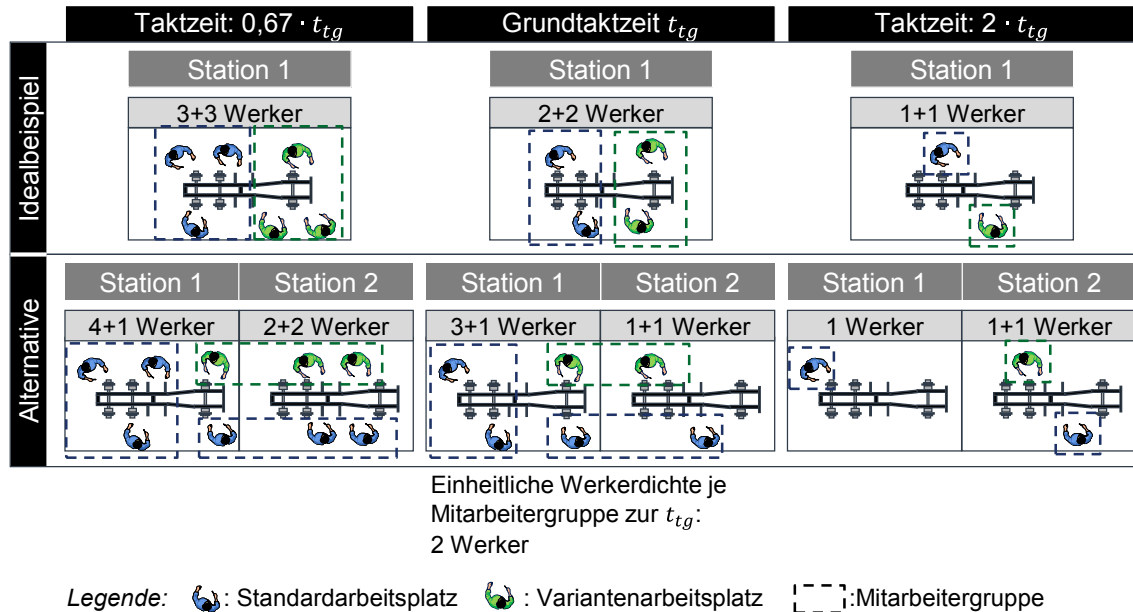


Abbildung 37: Anpassung der Mitarbeiterzahl bei Taktzeitwechseln als Folge von Regel N1 bei Einhaltung des einheitlichen Teilers innerhalb der Mitarbeitergruppen

Kann auch stationsübergreifend die einheitliche Mitarbeiteranzahl nicht eingehalten werden, sind für die Taktzeitwechsel zusätzliche Maßnahmen für einen möglichst hohen Anteil an Standardarbeitsplätzen erforderlich. Hierzu können zunächst die beiden Regeln N2 und N3 analog für die anderen Taktzeitstufen angewendet werden. Ergeben sich durch die Kapazitätsanpassung im Verhältnis zur Taktzeit in den entsprechenden Mitarbeitergruppen demnach Über- bzw. Unterauslastungen, können diese durch ein stationsübergreifendes Zusammenfassen (Regel N2) oder als letzte Maßnahme auch durch ein Zusammenlegen von Varianten- und Standardinhalten (Regel N3) behoben werden. Um letzteres zu vermeiden, kann in diesen Fällen zum Erhalt von Standardarbeitsplätzen auch geprüft werden, ob beim Taktzeitwechsel Standardinhalte über mehrere Stationen hinweg zusammengefasst werden können, um sie auf einer Station zu vereinen (vgl. Abbildung 38).

Gleiches gilt, falls aufgrund von notwendiger Parallelarbeit die angestrebte Werkerdichte unter die benötigte Anzahl an Mitarbeitern fällt. Auch hier ist anzustreben, unter Anwendung der Regeln N2 und N3 sowie das Zusammenfassen von Tätigkeiten über mehrere Stationen hinweg die resultierende Unterauslastung der weiterhin benötigten Werker auszugleichen und somit insgesamt die angestrebte Werkeranzahl zu erreichen. Ebenso sind die Regeln anzuwenden, falls bei niedrigen Taktzeiten an einer Station gruppenübergreifend die höchstmögliche Wer-

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Ausstattung

kerdichte überschritten wird. Zusätzlich ist in diesem Fall das Verschieben eines Arbeitsplatzes auf eine Nachbarstation möglich.

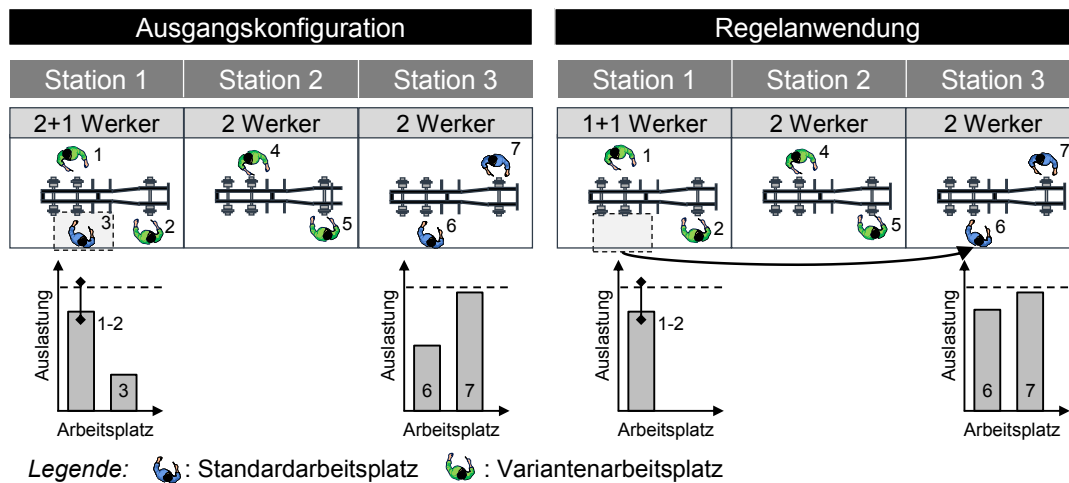


Abbildung 38: Zusammenfassen von Standardtätigkeiten über mehrere Stationen hinweg bei Taktzeitanpassungen

Mit Hilfe der Regeln der Basisplanung in Kombination mit den zusätzlich beschriebenen Maßnahmen sind Taktzeitänderungen in den vorgeplanten Stufen mit geringem Umsetzungsaufwand möglich. Die Vorausplanung der einzelnen Taktzeitstufen ist für eine schnelle Anpassungsfähigkeit notwendig, um die Umsetzbarkeit vorab validieren zu können und im Falle von Taktzeitwechseln nur die Anpassungsmaßnahmen an der Montagelinie umzusetzen, wie beispielsweise die veränderte Mitarbeiterorganisation, das Verschieben von Arbeitsinhalten sowie der zugehörigen Betriebsmittel und Anlieferflächen. Um neben der Stückzahlflexibilität auch schnell auf Variantenmixänderungen reagieren zu können, ist zusätzlicher Planungsaufwand erforderlich, der im folgenden Abschnitt erläutert wird.

5.3.4.2 Planung des Umgangs mit Variantenmixschwankungen

Um gleichzeitig eine hohe Stückzahlflexibilität zu erreichen, wurde in den vorherigen Abschnitten ein Planungsvorgehen beschrieben, um diese Trennung auch bei Taktzeitwechseln aufrechterhalten zu können. Dadurch beschränkt sich selbst nach Veränderung der Taktzeit der Fokus für variantenbeherrschende Maßnahmen nur auf zuvor definierte Arbeitsplätze.

Um die Komplexität aufgrund der Vielzahl an Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Produktvarianten, deren Mix samt Reihenfolge in der Perlen-

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

kette sowie der Möglichkeiten zum flexiblen Umgang mit den daraus resultierenden Kapazitätsbedarfsschwankungen beherrschen zu können, ist eine Simulationsunterstützung zur Planung der variantenbeherrschenden Maßnahmen erforderlich. Dieser anschließende Schritt der Austaktungsmethodik wird im folgenden Abschnitt 5.4 genauer erläutert. Im Rahmen der manuellen Austaktung sind zuvor die Rahmenbedingungen für den flexiblen Mitarbeiterinsatz zu planen.

Der Regel H2 folgend ist für die Variantenarbeitsplätze eine Auslastung kleiner 100 % zu wählen um den Mitarbeitern die Möglichkeit zu geben Kapazitätsspitzen durch Varianten mit geringerem Aufwand auszugleichen. Ausschlaggebend für die durchschnittliche Auslastung der Arbeitsplätze sind dabei nicht nur die Zeitspreizung innerhalb des Arbeitsplatzes, sondern auch die Möglichkeiten zum Drift- und Springereinsatz. Je höher das Driftpotential an einer Station ausfällt, desto höher kann die zulässige Zeitspreizung oder die durchschnittliche Auslastung an dieser liegen. Für die Planung des Umgangs mit Variantenspitzen ist demzufolge insbesondere die Einplanung des Driftpotentials an den variantenbehafteten Stationen bzw. Arbeitsplätzen von Bedeutung. Um einen möglichst hohen Driftbereich abdecken zu können sind zunächst folgende Fragestellungen zu berücksichtigen:

- Werden Montagemittel (z. B. Schrauber, Nietbügel) zum Verbau von (Teil-) Umfängen benötigt und stehen diese auch an benachbarten Stationen zur Verfügung?
- Können die benötigten Teile an benachbarten Stationen ergonomisch günstig bereitgestellt werden, z. B. aufgrund eines geringen Teilegewichts oder mit Hilfe stationsübergreifender Handhabungshilfsmittel?
- Werden die Mitarbeiter an benachbarten Stationen durch den Driftvorgang behindert, z. B. aufgrund von aufeinander aufbauenden Montageprozessen oder durch das Handhaben großer Bauteile?

Für eine detaillierte Betrachtung eines Drifteinsatzes im Einzelfall sind die in Abschnitt 2.3.3.1 genannten Restriktionen zu berücksichtigen, da die zuvor erläuterten Fragestellungen sich insbesondere auf die technologische und organisatorische Umsetzbarkeit beschränken, die bei der Planung der Austaktung beeinflussbar ist.

Aufbauend auf diesen Überlegungen ist unter Einbezug der relevanten Experten, insbesondere der Werker und deren Vorgesetzten, das eingeplante Driftpotential an den einzelnen Stationen oder Arbeitsplätzen zu bewerten. Analog zu Abbildung 9 (S. 32) ist dabei zwischen dem vor- und nachgelagerten Driftbereich zu

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

unterscheiden, im Folgenden als *Vor-* bzw. *Nacharbeit*⁵⁵ bezeichnet. Ziel der Planung ist die Angabe der Kenngrößen *potentielle Vorarbeit* VA_p und *potentielle Nacharbeit* NA_p , die jeweils für die entsprechenden Driftarten die maximale Vorgabe an zulässigem Drift angeben. Unter „zulässig“ ist in diesem Zusammenhang zu verstehen, dass ggf. zwar technisch auch ein höherer Driftbereich möglich wäre, dieser aber bewusst geringer gehalten werden soll, z. B. um den Mitarbeitern keine zu hohe Stressbelastung zuzumuten oder um die Transparenz im Montageprozess und somit die Qualität zu erhalten. Die Bewertung von VA_p und NA_p erfolgt in der Einheit [%] bezogen auf die Taktzeit. Das bietet gegenüber einer diskreten Angabe in Zeiteinheiten den Vorteil, dass die Bewertung unabhängig vom jeweiligen Taktzeitszenario und der aktuellen Mitarbeiteranzahl der betrachteten Gruppe gültig ist. Diese beiden Kenngrößen stellen einen wichtigen Input für die anschließende Simulation des Mitarbeiterverhaltens dar.

Zudem ist die vorhandene Kapazität an Springerpersonal zu planen. Eine detaillierte Planung des Springerbedarfs ist erst mit der Simulation im nachfolgenden Schritt möglich bzw. auch erst im operativen Betrieb in Abhängigkeit des Programms nötig. Jedoch können bereits in dieser Planungsphase erste Abschätzungen getroffen werden, wie im Folgenden erläutert wird.

Bei sehr seltenen und gleichzeitig sehr aufwändigen Ausstattungsmerkmalen ist zur Verringerung der Zeitspreizung und gleichzeitigen Erhöhung der durchschnittlichen Auslastung eine präventive Zuteilung dieser Arbeitsinhalte zum Springerpool sinnvoll⁵⁶. Je nach Prozessdauer und prognostizierter Häufigkeit ergibt sich dadurch eine erste, leichte Abschätzung der benötigten Springerkapazität für diese Umfänge.

Durch die Festlegung der zulässigen potentiellen Vor- und Nacharbeit VA_p und NA_p kann zusätzlicher Springerbedarf grob abgeschätzt werden. Hierzu können die verschiedenen mit Hilfe der Yamazumi-Diagramme betrachteten Varianten analysiert und hinsichtlich ihres potentiellen Springerbedarfs in drei Kategorien eingeteilt werden (vgl. Abbildung 39).

⁵⁵ In diesem Zusammenhang ist unter Nacharbeit das geplante Driften in die nachfolgende Station zu verstehen (vgl. Abschnitt 2.3.3.1) und nicht die gesonderte Nacharbeit am Ende der Montagelinie (vgl. Abschnitt 2.3.3.3).

⁵⁶ vgl. präventiver Springereinsatz (Abschnitt 2.3.3.2)

5.3 Planungsprozess zur variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien

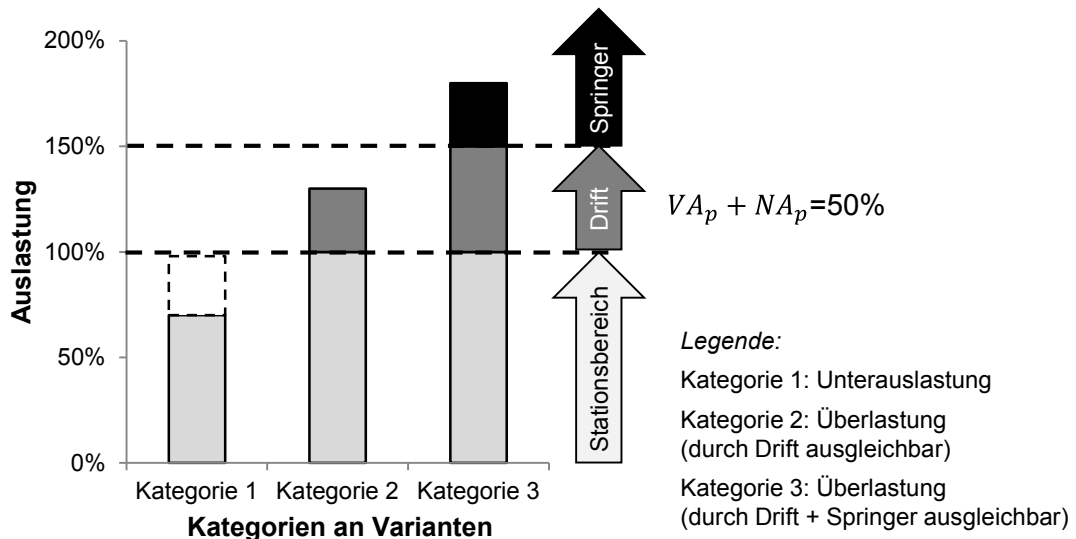


Abbildung 39: Einstufung von Varianten zur Abschätzung des Springereinsatzes

Varianten der Kategorie 3 generieren entsprechend ihrer Häufigkeit zwangsläufig Springereinsatz, da ihr Kapazitätsbedarf höher liegt als die Taktzeit plus das vorhandene Driftpotential. Die in Kategorie 2 und 3 dargestellte Überlast, die innerhalb der Driftmöglichkeiten liegt, kann unter Einbezug der Häufigkeiten mit den Unterauslastungen der Kategorie 1 ausgeglichen werden. Somit ist, ohne Kenntnis der eigentlichen Fahrzeugreihenfolgen, eine grobe Abschätzung des Springerbedarfs möglich. Dieser wird in der Realität tendenziell höher liegen, da zum einen nicht alle Variantenkombinationen mit Hilfe der Yamazumi-Diagramme abgebildet werden und zum anderen durch diese vereinfachte Kapazitätsrechnung von einer optimalen Fahrzeugreihenfolge ohne Leerzeiten ausgegangen wird. Für eine erste Abschätzung für die anschließende Simulation ist diese Vorgehensweise aber zielführend und zusammen mit dem präventiven Springerbedarf für Exotenteile kann daraus die benötigte Springeranzahl abgeschätzt werden.

Darüber hinaus können vorhandene, bandnahe Vormontagen als potentielles Kapazitätsangebot für internen Springereinsatz⁵⁷ bewertet werden. Ist in den Vormontagen noch Kapazität verfügbar und aufgrund von Pufferbildung eine Entkopplung von der Taktzeit möglich, können diese freien Kapazitäten für die zuvor ermittelten Springerbedarfe mit berücksichtigt werden. Voraussetzung hierfür ist eine entsprechende Qualifikation der Werker in den Vormontagen.

⁵⁷ vgl. Abschnitt 2.3.3.2

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

Zusammenfassend werden in diesem Planungsschritt die vorhandenen Driftmöglichkeiten in den variantenbehafteten Arbeitsplätzen festgelegt sowie eine erste grobe Abschätzung des benötigten Springerbedarfs und der vorhandenen Springerkapazität aus den Vormontagen getroffen. Eine Vorwegplanung von Umstellungen bei Variantenmixschwankungen, analog zur zuvor erfolgten Festlegung für die Taktzeitsprünge, ist aufgrund der vielfältigen Kombinatorik an Ausstattungsvarianten nicht sinnvoll. Vielmehr war es Ziel der vorhergehenden Planung, einen möglichst engen Anpassungsbereich bei Schwankungen zu schaffen. Demnach kann im folgenden Planungsschritt die Simulation unterschiedlicher Variantenmixausprägungen aufzeigen, inwieweit dieses Ziel bei verschiedenen Planungsalternativen erreicht wurde. Die Planung der Anpassung bei Variantenmixschwankungen wird mit Hilfe der Kennzahlen angestoßen, die in Abschnitt 5.5 diskutiert werden.

5.4 Simulation des flexiblen Mitarbeiterereinsatzes

5.4.1 Überblick und Diskussion vorhandener Simulationswerkzeuge

Im bisherigen Ablauf der Methodik wurden zunächst die Eingangsgrößen für die Austaktung nach Taktzeitszenarien bestimmt (Abschnitt 5.2), um anschließend im Rahmen von Expertenworkshops die variantenabhängige Austaktung unter Berücksichtigung von Taktzeitszenarien durchzuführen (Abschnitt 5.3). Die Ergebnisse des Austaktungworkshops dienen als Input für die folgende Simulation des flexiblen Mitarbeiterereinsatzes. Diese ist zur Beherrschung der Komplexität notwendig, die zum einen aus der Vielzahl an zu berücksichtigenden Varianten und zum anderen aus den Wechselwirkungen der Maßnahmen zum Umgang mit den unterschiedlichen Varianten resultiert.

Folgende Eingangsgrößen liegen aus den vorherigen Planungsschritten vor:

- Die vorgeplanten Taktzeiten $t_{t,i,j}$
- Die Zuordnung von Arbeitsinhalten zu Arbeitsplätzen für diese verschiedenen Taktzeiten und alle vorhandenen Teilefamilien
- Die Driftpotentiale VA_p und NA_p einer jeden Arbeitsstation
- Eine grobe Abschätzung der benötigten Springeranzahl

Zusätzlich werden für die Simulation folgende Daten benötigt:

- Perlenketten mit unterschiedlichem Variantenmix (historisch oder aus Prognosen)

Um den geforderten Analyse- und Bewertungsumfang durchführen zu können, wurden in Abschnitt 4.3.4 Anforderungen an das einzusetzende Simulationstool gestellt. Tabelle 5 greift diese Anforderungen auf und bewertet unterschiedliche Simulationstools für variantenreiche Montagelinien aus Wissenschaft und Praxis bzgl. deren Erfüllung.

Tabelle 5: Simulationstools zur Bewertung variantenreicher Montagelinien

	HECHL 1995	linelogix (MEDO 2010)	GANS ET AL. 2011	HALUBEK 2012	PePe (u.a. MÄRZ ET AL. 2012A)
Spezifische Anforderungen					
Abbildung Driftverhalten	●	○	◐	●	●
Abbildung Springereinsatz	○	○	○	◐	●
Abbildung untersch. Fahrzeugreihenfolgen	●	○	○	●	●
Anpassbarkeit der Taktzeit	●	●	●	●	●
Verschieben von Arbeitsinhalten	●	●	●	●	●
Veränderung der Mitarbeiterzuordnung	●	●	●	●	●
Allgemeine Anforderungen					
Einfache Modellbeschreibung	●	●	◐	◐	●
Intuitive Anwendungsumgebung	▨	●	▨	●	●
Kurze Simulationsdauer	▨	▨	▨	▨	●

Weder HECHL (1995), noch linelogix oder GANS ET AL. (2011) bilden den Springereinsatz in der getakteten Montagelinie ab. Ziel der Ablaufsimulation von HECHL (1995) ist vielmehr die Ermittlung der Auslastung der Mitarbeiter sowie deren Aufenthaltsort am Band unter Einbezug von Driftbereichen. Das Tool **linelogix**, welches in der Dissertation von MEDO (2010) vorgestellt wird, fokussiert sich auf die Austaktung und die Bestimmung der optimalen Taktzeit bzw.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

der optimalen Personalzuordnung bei feststehender Zuordnung von Arbeitsinhalten und gegebenem Produktionsprogramm. Drift- und Springereinsatz werden nicht simuliert. GANS ET AL. (2011) prognostizieren mit Hilfe eines Warteschlangenmodells das Driftverhalten bereits während der Austaktung auf Basis eines prognostizierten Produktionsprogramms. Da hierfür noch keine Reihenfolgeplanung erfolgt sein muss, wird auch nicht der Anspruch auf eine Abbildung des tatsächlichen Driftverhaltens erhoben, sondern es soll vielmehr bereits in der frühen Planungsphase das Risiko von übermäßigem Driftverhalten abgeschätzt werden.

Somit erfüllen lediglich HALUBEK (2012) und PePe⁵⁸ nahezu die zuvor gestellten Anforderungen. Die simulationsbasierte Planungsunterstützung von HALUBEK (2012)⁵⁹ bildet sowohl Driftverhalten als auch Springereinsatz ab. Auf die Implementierung des Springereinsatzes sowie die Auswertungsmöglichkeiten diesbezüglich geht der Autor nicht ein, was eine genaue Bewertung der Funktionalität nicht ermöglicht. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf das Simulationswerkzeug PePe zurückgegriffen. In den nachfolgenden Abschnitten wird zunächst der Aufbau und Ablauf des Simulationsmodells von PePe genauer erläutert (Abschnitt 5.4.2). Anschließend zeigt ein Leitfaden, wie die Planungsergebnisse aus den manuellen Austaktungsworkshops mit Hilfe des Simulationstools validiert werden können (Abschnitt 5.4.3).

5.4.2 Aufbau des Simulationsmodells von PePe

Das Werkzeug PePe ermöglicht die Simulation des Drift- und Springerverhaltens in variantenreichen Montagelinien. Es wurde von der Firma LOM Innovation GmbH & Co. KG entwickelt und bei der MAN Truck and Bus AG (MTB) in Kooperation mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) im Rahmen eines Forschungsprojektes erstmals langfristig in der Praxis erprobt, in dem auch diese Arbeit entstand. Dabei wurde das Werkzeug um Austaktungs- sowie weitere Analyse-, Visualisierungs- und Bewertungsmöglichkeiten erweitert (MÄRZ ET AL. 2012B, REINHART & PRÖPSTER 2012). Die im Rahmen dieser Arbeit gestellten allgemeinen Anforderungen werden vollständig erfüllt. Die ereignis-diskrete Simulation, die in der Entwicklungssoftware SLX programmiert ist, führt zu transparenten Ergebnissen und das Simulationswerk-

⁵⁸ Das Akronym „PePe“ steht für „Perlenkettenbeherrschung und Personaleinsatzplanung“ (MÄRZ ET AL. 2012B).

⁵⁹ Das Gesamtkonzept von HALUBEK (2012) wurde bereits in Abschnitt 3.3 diskutiert.

5.4 Simulation des flexiblen Mitarbeiterereinsatzes

zeug ermöglicht dem Anwender durch eine webbasierte Umsetzung eine intuitive Bedienung (MÄRZ ET AL. 2012B). Zusätzlich zeichnet sich das Werkzeug durch eine geringe Simulationsdauer aus. Bei einer Montagelinie mit ca. 70 Stationen beträgt die Simulationsdauer von 1500 Fahrzeugen, die im später beschriebenen Anwendungsfall einer Vorschau von knapp zehn Tagen entsprechen, je nach benötigtem Drift- und Springereinsatz ca. eine halbe bis eine Stunde⁶⁰ (MÄRZ ET AL. 2012A). Auch die spezifischen Anforderungen werden erfüllt, wie die folgende kurze Erläuterung des Simulationsmodells zeigt. Für eine Vertiefung der Funktionsweise von PePe sei auf die dabei verwendeten Quellen verwiesen.

Für die Simulation werden zum einen Stammdaten und zum anderen operative Daten benötigt (vgl. Abbildung 40). Die *Stammdaten* beschreiben die Konfiguration der Montagelinie. Darin ist die Anzahl der Stationen sowie die deren Driftmöglichkeiten (vgl. VA_p und NA_p aus Abschnitt 5.3.4.2) enthalten, aber auch die Mitarbeiterzuordnung und -organisation samt vorhandenen Springerpools sowie die zu simulierende Taktzeit. Die *operativen Daten* bilden die Montageaufträge ab. Darin sind sowohl die Montageprozesse für jede Station oder Mitarbeitergruppe beschrieben als auch die Reihenfolge der Fahrzeuge.

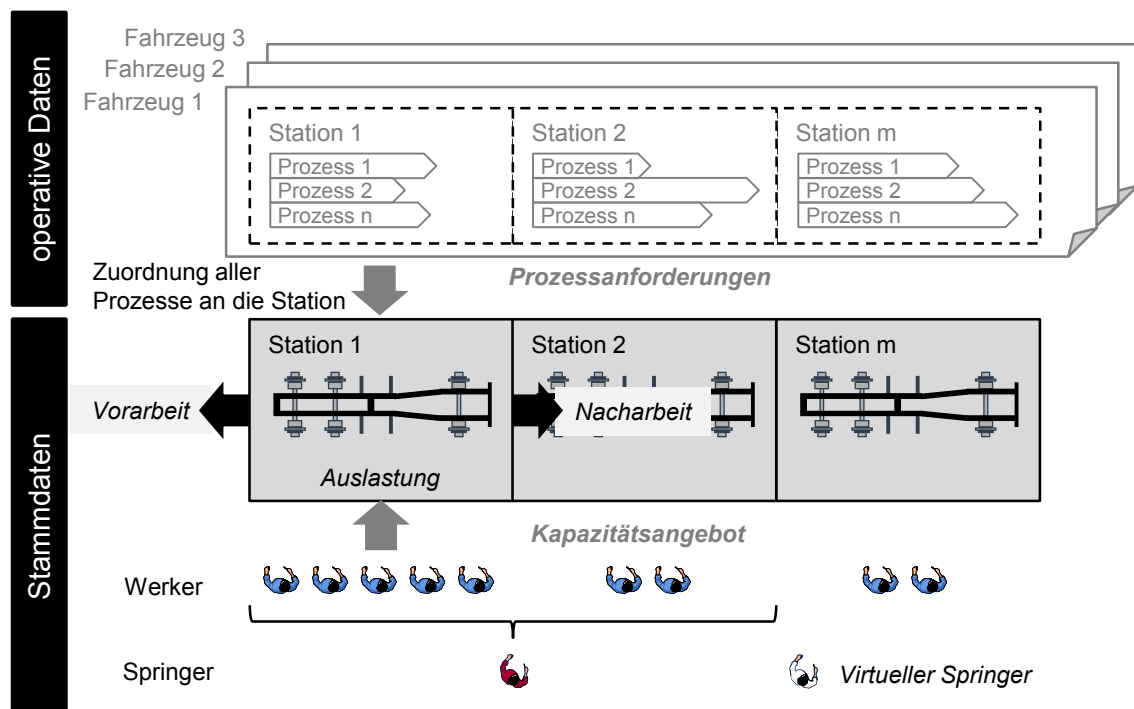


Abbildung 40: Modellstruktur der Simulation (in Anlehnung an AUER & SIHN (2010, S. 8), MÄRZ ET AL. (2011A, S. 143))

⁶⁰ Diese Simulationsdauer wird auf einem handelsüblichen Computer mit der Leistung eines Intel Core i5-Prozessors mit 2,4 GHz, oder vergleichbar, erreicht.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

Sowohl die operativen als auch die Stammdaten sind durch den Anwender editierbar, um beispielsweise neue Austaktungsvarianten zu generieren. Für jeden Takt wird an jeder Station die Prozesszeitanforderung mit dem vorhandenen Kapazitätsangebot abgeglichen. Sollte die Taktzeit nicht ausreichen, wird zunächst das vorhandene Driftpotential ausgeschöpft. Dabei wird die Dynamik durch die Fahrzeugreihenfolge berücksichtigt. Ist selbst unter Einbezug des Driftpotentials nicht genügend Kapazität vorhanden, werden die zugeordneten Springer hinzugezogen. Um einen Abbruch der Simulation aufgrund von nicht vorhandener Springerkapazität zu verhindern, werden bei einer Überlast der Springer zusätzlich virtuelle Springer hinzugezogen. Diese werden durch das Tool separat ausgewiesen und zeigen dem Anwender somit die Engpässe in der aktuellen Konfiguration für das simulierte Fahrzeugprogramm auf (AUER & SIHN 2010, MÄRZ ET AL. 2011A, MÄRZ ET AL. 2012B, PRÖPSTER ET AL. 2014).

Die Simulation ist in zwei Phasen aufgeteilt. In der Planungsphase werden die jeweiligen Prozesse zunächst auf die vorhandene Kapazität der Mitarbeitergruppen je Zyklus verteilt und ggf. Drift- oder Springerkapazitäten vorgeplant. In der eigentlichen Durchführungsphase werden die Mitarbeiter und Springer dann durch die Prozesse zeitlich gebunden und stehen erst nach deren Ablauf für den nächsten Prozess zur Verfügung. Dadurch werden die dynamischen Abhängigkeiten und das Verhalten der Mitarbeiter über die Zeit hinweg simuliert (MÄRZ ET AL. 2012B).

Als Ergebnis liefert PePe unterschiedliche Auswertungen des simulierten Drift- und Springerverhaltens sowie der Auslastung der Mitarbeiter, insbesondere in Form von Diagrammen und Matrizen⁶¹, aber auch als Export in gängige Tabellenkalkulationssoftware. Abbildung 41 zeigt die Grundlogik der Simulationsergebnisse, die in unterschiedlicher Granularität und mit unterschiedlichem Bezug, sowohl zeitlich als auch organisatorisch, visualisiert werden können. Dargestellt ist der Auslastungsverlauf einer Mitarbeitergruppe in Abhängigkeit der vorliegenden Perlenkette.

Nach Ablauf der Taktzeit ist in jedem Zyklus ein neues Fahrzeug zu bearbeiten. Die Summe an Prozesszeitanforderungen des Fahrzeugs für diese Mitarbeitergruppe wird durch den linken, blauen Balken im Verhältnis zur Taktzeit unter Berücksichtigung der vorhandenen Mitarbeiterkapazität dargestellt. Die middle-

⁶¹ Verschiedene Beispiele der Visualisierungen von PePe finden sich insbesondere bei MÄRZ ET AL. (2012B) und MAYRHOFER ET AL. (2013). Einen Überblick geben MÄRZ ET AL. (2012A) und ebenfalls MAYRHOFER ET AL. (2013).

ren, grünen Balken stellen die resultierende Mitarbeiterauslastung unter Einbezug des Driftverhaltens dar. Bei niedriger Auslastung unterhalb der Taktzeit ist diese zunächst identisch zur Prozesszeitanforderung (vgl. Zyklus 1 und 2). Sobald Aufträge mit einer Prozesszeitanforderung höher der Taktzeit vorliegen, werden die hinterlegten Driftpotentiale ausgeschöpft und durch eine unterschiedliche Färbung hervorgehoben (hell für Vorarbeit, dunkel für Nacharbeit). Reichen die Möglichkeiten zum Drift aufgrund sehr hoher Prozesszeitanforderungen oder eines zu starken Abdriftens nicht aus (vgl. Zyklus 8), wird der simulierte Springereinsatz visualisiert (rechter, roter Balken), wobei auch Springern driften gestattet ist (MÄRZ ET AL. 2012B, PRÖPSTER ET AL. 2014).

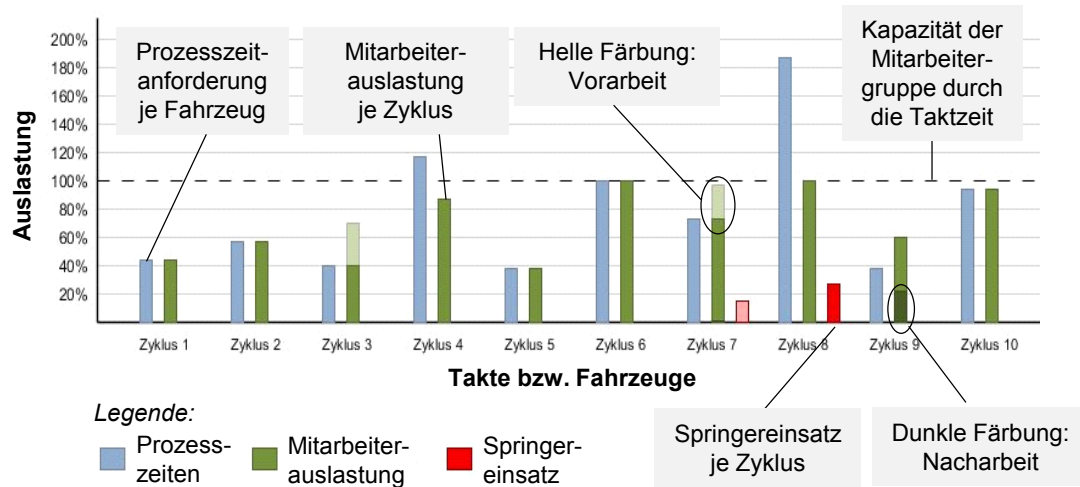


Abbildung 41: Visualisierung des Mitarbeiterereinsatzes im Simulationstool (in Anlehnung an MÄRZ ET AL. (2012B, S. 143), PRÖPSTER ET AL. (2014))

5.4.3 Vorgehen zur simulativen Validierung der Planungsergebnisse

Nach der kurzen Vorstellung des Simulationsmodells von PePe wird im Folgenden der Prozess zur Validierung der im bisherigen Planungsverlauf erarbeiteten Ergebnisse mit Hilfe des Softwaretools diskutiert. Durch die Anwendung der Simulationssoftware werden mehrere Ziele verfolgt, die sowohl analytisch als auch allein durch den Einbezug von Expertenwissen nicht erreicht werden könnten:

- Berücksichtigung aller Fahrzeugvarianten
- Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens der Mitarbeiter zum Umgang mit den unterschiedlichen Fahrzeugvarianten

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

- Visualisierung der Planungsergebnisse unter Einbezug verschiedener Programmszenarien

Abbildung 43 zeigt in Anlehnung an PRÖPSTER ET AL. (2014) die entwickelte Vorgehensweise, um diese Ziele mit Hilfe des Simulationstools zu erreichen. Der folgende Abschnitt ist nach den dort aufgeführten vier Schritten gegliedert. Der Hauptfokus liegt in der Vorbereitung der Eingangsparameter für die Simulation. Aufbauend auf dem bisherigen Planungsstand sind dazu zum einen verschiedene Austaktungsszenarien abzubilden. Zum anderen sollen mit Hilfe unterschiedlicher Fahrzeugprogramme die Einflüsse der Zeitspreizung, verschiedener Variantenmixe und der Dynamik der Fahrzeugreihenfolgen mit einbezogen werden. Nach der anschließenden Simulation der Eingangsgrößen werden deren Ergebnisse im Werkzeug visualisiert und können zur Validierung mit Hilfe von Kennzahlen bewertet werden.

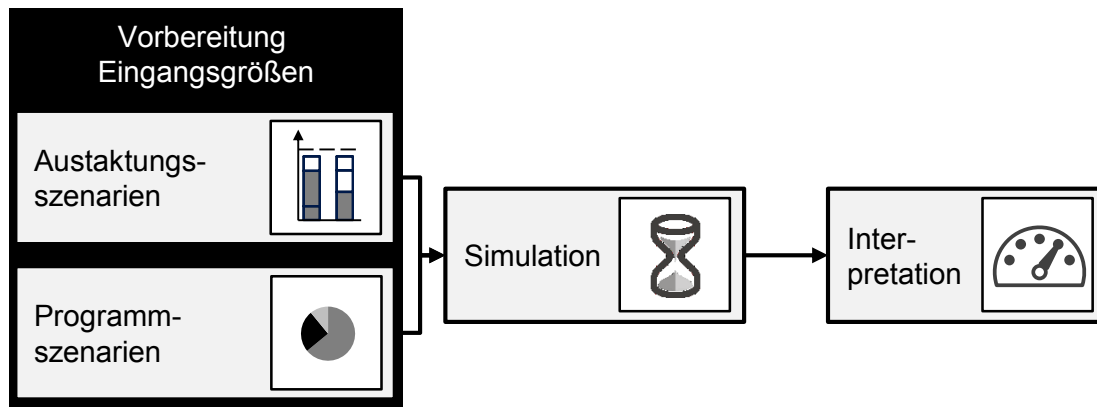


Abbildung 43: Vorgehen zur simulationsbasierten Validierung von Austaktungsergebnissen (in Anlehnung an PRÖPSTER ET AL. (2014))

Die Ergebnisse aus dem vorherigen Planungsprozess stellen die Eingangsgrößen im Bereich **Austaktungsszenarien** dar. Durch die Anwendung der Regeln können unterschiedliche Austaktungsszenarien entstanden sein, z. B. mit unterschiedlicher Zuordnung von Arbeitsinhalten oder verschiedenen Gruppierungen der Arbeitsplätze. Um diese zu validieren, werden im Simulationswerkzeug folgende relevante Eingangsgrößen abgebildet:

- Die verschiedenen Taktzeiten, auf die die Montagelinie der Methodik folgend ausgelegt ist
- Die Struktur der Montagelinie für die verschiedenen Taktzeiten, wie beispielsweise die Anzahl an Stationen und Arbeitsplätzen, die Anbindung von Vormontagen oder das Driftpotential

5.4 Simulation des flexiblen Mitarbeiterereinsatzes

- Die Mitarbeiterorganisation bei den verschiedenen Taktzeiten, wie die Anzahl an Werkern, die Teamzusammenfassungen, die abgeschätzte Springeranzahl und der Tätigkeitsbereich der Springer
- Die Zuordnung der Montageinhalte und ggf. abweichende Montagezeiten für die verschiedenen Taktzeiten, z. B. durch zusätzliche Laufwege

Um den Aufwand für die Zuordnung der Montageinhalte zu beschränken, kann das Simulationstool auf die bestehende Zuordnung der Arbeitsinhalte zurückgreifen, welche im ERP-System hinterlegt ist. Lediglich die Änderungen zur Ist-Situation sind zu editieren. Das ist sowohl innerhalb des Werkzeugs als auch durch einen Import aus gängiger Tabellenkalkulationssoftware möglich. Tabelle 6 gibt ein Beispiel für die Umsetzung der veränderten Zuordnung von Montageinhalten. Die dargestellten Zahlencodes der Bauteile bzw. Prozesse symbolisieren, dass das Simulationstool der Nomenklatur des jeweiligen ERP-Systems folgt.

Tabelle 6: Umsetzung der Anpassung der Zuordnung von Montageinhalten

ID	Bauteil oder Prozess	Zuordnung aktuell	t_v aktuell [s]	Zuordnung neu	t_v neu [s]
1	81.1234.567	Arbeitsplatz 5	30	Arbeitsplatz 6	30
2	81.9876.543	Arbeitsplatz 5	110,5	Arbeitsplatz 5	100
...

Legende: t_v : Vorgabezeit

Um die Austaktungsszenarien bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen testen zu können, ist die Erstellung unterschiedlicher **Programmszenarien** als Eingangsgrößen in die Simulation notwendig. Mit Hilfe der Fahrzeugprogramme kann das dynamische Verhalten der Werker unter Einbezug von Fahrzeugreihenfolgen, das gesamte relevante Variantenspektrum und die Einflüsse von Nachfrageschwankungen auf die Auslastung der Montagelinie untersucht werden. Dementsprechend müssen die verschiedenen Fahrzeugprogramme auch die genannten Aspekte mit abdecken können. Zur Identifikation oder Erstellung geeigneter Fahrzeugprogramme können folgende Aspekte einbezogen werden:

1. Die Zusammensetzung des Programms bzgl. unterschiedlicher Fahrzeugtypen oder -derivate,
2. die Zusammensetzung bzgl. unterschiedlicher Ausstattungsmerkmale und/oder
3. die durchschnittliche Vorgabezeit des Fahrzeugprogramms.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

Bei der Analyse der Daten kann das Simulationswerkzeug durch Filterfunktionen unterstützen, wobei nachfolgende Datenanalysen bzgl. Zeiten, Auslastung usw. daraufhin bislang von Hand durchzuführen sind. Als Datenbasis bieten sich historische Perlenketten an, da diese der im jeweiligen Unternehmen üblichen Art der Reihenfolgebildung (vgl. Abschnitt 2.3.4) durchlaufen sind und somit mit geringem Aufwand ein realistisches Bild abgeben. Wird eine möglichst lange Perlenkette über mehrere Tage gewählt, ist außerdem garantiert, dass die resultierende Dynamik der Perlenketten ausreichend abgebildet wird.

Tabelle 7 zeigt die zu berücksichtigenden Daten für eine Analyse des Programms bzgl. *Typen oder Derivate (Möglichkeit 1)*. Die Vorgabezeiten entsprechen der jeweils zu untersuchenden Austaktung und beruhen auf einer möglichst großen Stichprobe an Fahrzeugen (z. B. einer Jahresproduktion). Die Häufigkeiten können über Vergangenheitswerte oder Prognosen ermittelt werden. Ziel ist es, unter Einbezug der Häufigkeit und der „Schwere“ des Fahrzeugtypen, diesen mit Hilfe einer ABC-Analyse zu klassifizieren. Unter „Schwere“ des Fahrzeugtypen kann dabei je nach Anwendungsfall die durchschnittliche Auslastung a_\emptyset , die Zeitspreizung innerhalb des Typen δ_{Typ} oder eine gewichtete Größe aus beiden Kennzahlen herangezogen werden.

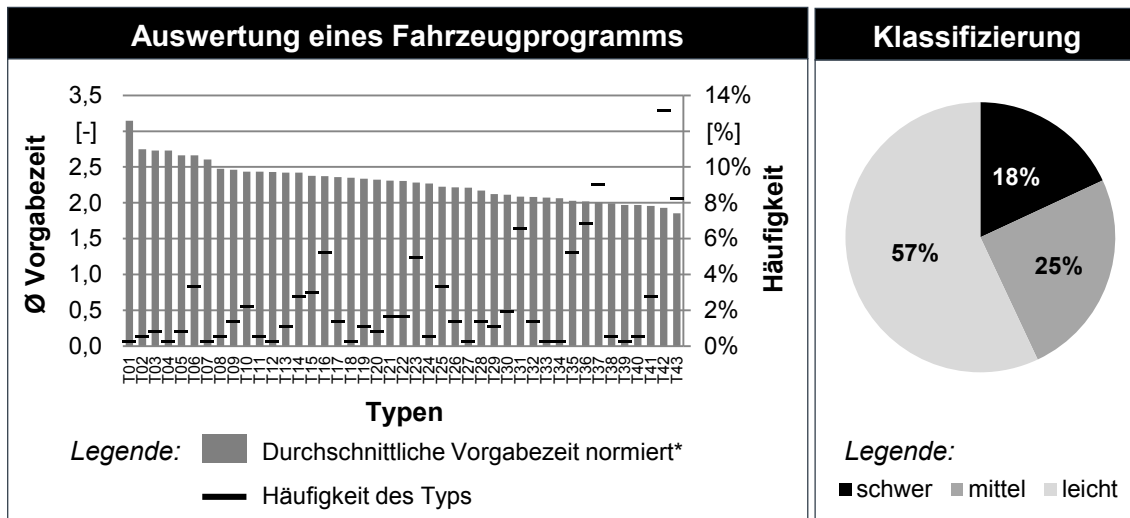
Tabelle 7: Analyse des Fahrzeugprogramms bzgl. Typen oder Derivate

Varianten		Vorgabezeiten im Bandbereich je Typ		Schwankungen je Typ		
Typ	Häufigkeit	$\sum t_{v\emptyset}$ [min]	a_\emptyset [%]	$t_{v,min}$ [min]	$t_{v,max}$ [min]	δ_{Typ} [min]
T01	18,5%	115,3	89,0%	101,5	122,6	21,1
T02	11,3%	109,5	84,5%	95,2	129,3	34,1
...

Legende: $t_{v\emptyset}$: Durchschnittliche Vorgabezeit $t_{v,max}$: Maximale Vorgabezeit
 a_\emptyset : Durchschnittliche Auslastung δ_{Typ} : Zeitspreizung je Typ
 $t_{v,min}$: Minimale Vorgabezeit

Am Ende sind durch dieses Vorgehen alle Typen bzw. Derivate bzgl. ihres Einflusses auf die Schwere des Fahrzeugprogramms bewertet (vgl. Abbildung 44). Vorteil dieser Analyseform ist, dass im Nachgang zur Bewertung der Schwere des Programms nur eine Betrachtung bzgl. der aktuellen Typen-/ Derivatezusammensetzung erforderlich ist, die ohne großen Analyseaufwand möglich ist. Im Simulationstool ist eine Filterfunktion bzgl. der Fahrzeugtypen oder -derivate

integriert. Nachteilig ist die vereinfachende Beschränkung auf den Fahrzeugtyp als alleinigen Auslöser von Kapazitätsschwankungen.



* Aus Datenschutz sind die Vorgabezeiten normiert und keine Absolutwerte angegeben

Abbildung 44: Klassifizierung eines Fahrzeugprogramms

Die Analyse bzgl. der *Ausstattungsmerkmale (Möglichkeit 2)* erfolgt analog der zuvor beschriebenen. Anstatt der Typen oder Derivate sind dementsprechend die Ausstattungsmerkmale die Bezugsgrößen der Auswertungen, wie beispielsweise eine bestimmte Motorisierung, Achszahl, Federung etc.. Aufgrund der vielfältigen Interdependenzen der Ausstattungsmerkmale untereinander ist ein direkter Zusammenhang des Merkmals mit der Schwere des Fahrzeugprogramms nur schwer herstellbar. Diese Auswertung dient somit mehr der Sicherheit, dass alle relevanten Ausstattungsmerkmale in den simulierten Perlenketten enthalten sind, um auch die, die nicht im Rahmen des Workshops mit Yamazumi-Diagrammen abgebildet wurden, zu untersuchen. Auch zur Untersuchung des Fahrzeugprogramms bzgl. der Ausstattung existieren Filtermöglichkeiten in PePe.

Die Analyse der *durchschnittlichen Vorgabezeit (Möglichkeit 3)* beruht rein auf der Beurteilung der Montagezeiten des Gesamtprogramms. Für eine einmalige Anwendung ist auch ein geringer Analyseaufwand erforderlich, da für die jeweilige Perlenkette lediglich die durchschnittliche Vorgabezeit $t_{v\emptyset}$ zu berechnen⁶² ist. Bei der Analyse einer Vielzahl an Perlenketten ist von Nachteil, dass nicht auf einfache Kriterien wie den Fahrzeugtyp oder Ausstattungen zurückgegriffen wird, sondern immer eine vollständige Berechnung der Gesamtsumme an Vorga-

⁶² Zur Übersichtlichkeit wird die Berechnung von $t_{v\emptyset}$ in Formel 11 (Seite 125) zusammen mit den anderen Bewertungskennzahlen in Abschnitt 5.5.2 diskutiert.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

bezeiten notwendig ist. Vorteilhaft ist zudem, dass keine Wechselwirkungen zwischen analysierten Kriterien bestehen können und somit die reine Kapazität als Bewertungskriterium herangezogen wird. Nachteilig ist, dass die Analyse der Zusammensetzung des Programms in diesem Fall kaum möglich ist, da eine reine Durchschnittsbetrachtung stattfindet. Deshalb ist zu empfehlen, bei der Auswahl geeigneter Referenzperlenketten Möglichkeit 3 mit einer der beiden anderen Möglichkeiten zu kombinieren, bevorzugt mit Möglichkeit 1.

Nach der Vorbereitung der Austaktungs- und Programmszenarien als Eingangsgrößen erfolgt deren **Simulation**. Die Simulation folgt der im vorherigen Abschnitt 5.4.2 beschriebenen Logik.

Zur **Interpretation** der Simulationsergebnisse können unterschiedlichste Visualisierungsformen verwendet werden. Im Folgenden werden die zwei wichtigsten Diagramme hierzu vorgestellt⁶³. In Abbildung 45 ist ein Auslastungsdiagramm dargestellt, welches auf Organisationsebene, also beispielsweise auf Stations- oder Mitarbeitergruppenebene, der Logik von Abbildung 41 (S. 115) folgend die Auslastung über den gesamten Simulationszeitraum darstellt. Das Diagramm dient somit v. a. zur Bewertung der durchschnittlichen Beherrschbarkeit des Fahrzeugprogramms. Die Balken stellen die Durchschnittswerte der jeweiligen Auslastungsart (Prozess, Werker oder Springer) dar, während die Markierungen die Spreizung und somit das Minimum bzw. Maximum des Simulationslaufs widerspiegeln. Die Analyse einer einzelnen Station, analog Abbildung 41 (S. 115), dient darüber hinaus zur Untersuchung der Einflüsse der einzelnen Varianten samt resultierenden Drift- und Springereinsatz.

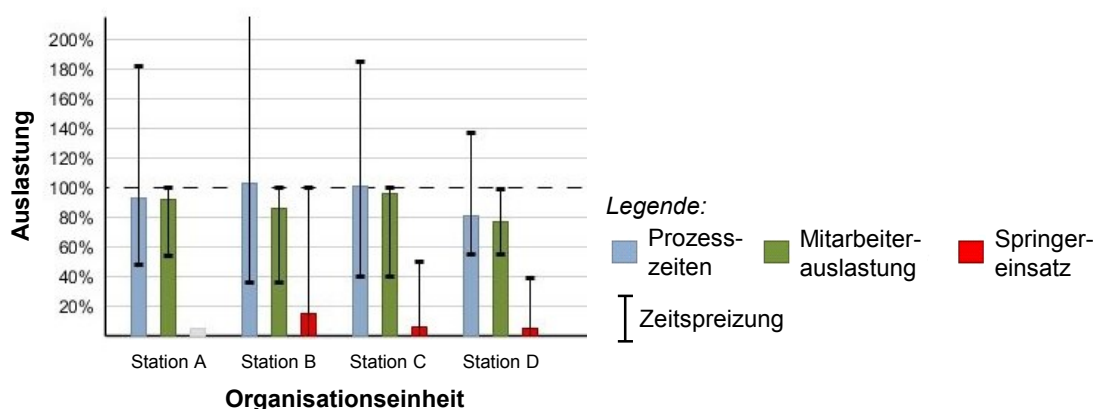


Abbildung 45: Auslastungsdiagramm eines Abschnitts der Montagelinie

⁶³ Für einen Überblick zu allen Visualisierungsformen sei nochmals auf MÄRZ ET AL. 2012A und MAYRHOFER ET AL. 2013 verwiesen.

5.4 Simulation des flexiblen Mitarbeiterereinsatzes

Eine weitere hilfreiche Visualisierungsform ist das Diagramm zur Variantenspreizung über die simulierte Perlenkette (vgl. Abbildung 46). Es stellt in einem Histogramm die Häufigkeiten der unterschiedlichen Prozesszeitanforderungen dar, die je Zyklus an die untersuchte Organisationseinheit gestellt wurden. Es dient somit zum einen zur schnellen Überprüfung, inwieweit die angestrebte variantenabhängige Austaktung in den jeweiligen Stationen erfüllt wurde. Je näher die Auslastungsintervalle zusammenliegen und je höher die Häufigkeit, desto stärker ist die Fokussierung auf eine Standardstation gelungen. Zum anderen zeigt es sehr anschaulich, welche unterschiedlichen Kapazitätsanforderungen das Programm an die betrachtete Station oder den Bandabschnitt stellt und ob aus rein kapazitiver Sicht ein Ausgleich zwischen Fahrzeugen mit Überlast und Unterlast möglich ist. Somit können die Kapazitätsanforderungen aller simulierten Produktvarianten einfach visualisiert und geprüft werden, was in einer manuellen Auswertung aller Kombinationsmöglichkeiten an Varianten nur mit sehr hohem Aufwand umsetzbar wäre. Ausreiser sowohl mit sehr niedriger als auch mit sehr höher resultierender Auslastung können somit schnell identifiziert und analysiert werden. Durch eine Betrachtung der verschiedenen vorgeplanten Taktzeiten, die in den simulierten Austaktungsszenarien abgebildet sind, kann auch die erfolgreiche Kombination der beiden Kerninhalte Taktzeitszenarien und variantenabhängige Austaktung visualisiert werden. Wurde über alle Taktzeiten hinweg eine ähnliche Zeitspreizung sowie eine ähnliche Verteilung der Auslastung erreicht, ist eine schnelle und wirtschaftliche Umstellung der Taktzeit möglich.

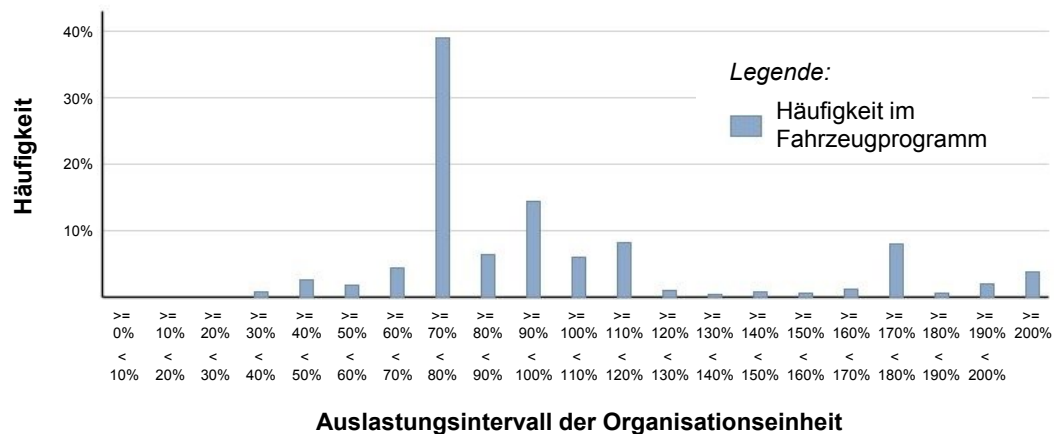


Abbildung 46: Diagramm Variantenspreizung

Zusätzlich können die Simulationsergebnisse über Tabellen in PePe oder durch einen Export in Tabellenkalkulationsprogramme interpretiert und ausgewertet werden. Da zur gesamtheitlichen Bewertung der Austaktungsergebnisse noch

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

zusätzliche, von PePe unabhängige und dort nicht abgebildete Kennzahlen benötigt werden und die Gesamtheit an Kennzahlen auch für das Monitoring der Montagelinie zur Identifikation des Anpassungsbedarfs bei Nachfrageschwankungen herangezogen werden kann, sind diese gesondert im nachfolgenden, letzten Abschnitt des Planungsprozesses erläutert.

5.5 Bewertung der Austaktungsszenarien und Überwachung im laufenden Betrieb

5.5.1 Überblick

Im bisherigen Planungsverlauf wurde unter Einbezug von Experten eine manuelle, variantenabhängige Austaktung unter Berücksichtigung von Taktzeitszenarien durchgeführt und mit Hilfe von Simulationssoftware konnte das dynamische, flexible Verhalten der Mitarbeiter in Bezug auf die unterschiedlichen Varianten abgebildet werden. In diesem letzten Schritt werden die Planungs- und Simulationsergebnisse mit Hilfe von Kennzahlen⁶⁴ bewertet. Abschnitt 5.5.2 stellt dazu ein Kennzahlensystem⁶⁵ vor, welches die unterschiedlichen Ebenen der dargestellten Methodik berücksichtigt. Dieses Kennzahlensystem dient vorrangig zur Bewertung der geplanten Austaktungsszenarien, kann aber auch für das anschließende Monitoring der Montagelinie im laufenden Betrieb verwendet werden, um den Bedarf zur Anpassung der Auslegung der Montagelinie zu erkennen und diese mit Hilfe der neu geschaffenen Möglichkeiten zur kurzfristigen Reaktion durchzuführen (vgl. Abschnitt 5.5.3).

5.5.2 Kennzahlensystem zur Bewertung von Austaktungsszenarien

In Tabelle 8 ist ein Überblick über das Kennzahlensystem zur Bewertung der im Rahmen des Planungsvorgehens entstandenen Austaktungsszenarien dargestellt. Die Grundstruktur des Systems sowie einige enthaltene Kennzahlen sind erstmals in MÄRZ ET AL. 2012B und REINHART & PRÖPSTER 2012 veröffentlicht.

⁶⁴ „Kennzahlen sind Verhältniszahlen und absolute Zahlen, die in konzentrierter Form über einen zahlenmäßig erfaßbaren betrieblichen Tatbestand informieren“ (STAEHLE 1973, S. 222). Während Verhältniszahlen verschiedene Zahlengrößen zueinander in Beziehung stellen, werden absolute Zahlen unabhängig von anderen Größen abgebildet SIEGWART 1992.

⁶⁵ Im Sinne der allgemeinen Systemtheorie (vgl. ROPOHL 2009) können Kennzahlensysteme definiert werden als „logische und/oder rechnerische Verknüpfung mehrerer Kennzahlen, die zueinander in einem Abhängigkeitsverhältnis stehen. Es handelt sich um eine aufbauende, zweckorientierte Gliederung einzelner Kennzahlen“ (SIEGWART 1992, S. 39).

5.5 Bewertung der Austaktungsszenarien und Überwachung im laufenden Betrieb

Tabelle 8: Überblick Kennzahlensystem (in Anlehnung an MÄRZ ET AL. (2012B, S. 148) und REINHART & PRÖPSTER (2012, S. 407))

	Taktzeitszenarien	Variantenabh. Austaktung	Simulation des MA-Verhaltens	Bewertung Planungsergebnis	Monitoring Montagelinie
Fahrzeugprogramm					
Aktuelle Gesamtstückzahl $s_{ges,akt}$	●				●
Stückzahlflexibilität $\Delta s_{rel,t,t}, \Delta s_{abs}$	●			●	●
Variantenmix VM bzw. VM-Änderung ΔVM		●			●
Austaktung					
Mittlere Vorgabezeit $t_{v\emptyset}$		●			●
Ø Auslastung Arbeitsplatz $a_{\emptyset AP}$	●	●		●	●
Zeitspreizung δ		●		●	●
Quote einheitliche Werkerdichte q_w	●			●	
Standardisierungsquote q_{st}		●		●	
Mitarbeiterflexibilität					
Springerquote q_{sp}		●	●	●	●
Durchschnittliche Auslastung Werker $a_{\emptyset W}$		●	●	●	●
Driftquote q_D		●	●	●	●
Durchschnittliche Auslastung Springer $a_{\emptyset sp}$		●	●		●

Legende:

● Zuordnung

Das Kennzahlensystem gliedert sich in die Bereiche Fahrzeugprogramm, Austaktung und Mitarbeiterflexibilität. Die Kennzahlen des Fahrzeugprogramms spiegeln die Anforderungen des Marktes wider und bewerten unabhängig der eigentlichen Zuordnung der Arbeitsinhalte zur Montagelinie. Diese wird erst durch die Kennzahlen des Bereichs Austaktung berücksichtigt, die die Auswirkungen des Programms auf die getaktete Montagelinie mit Einbezug der Zuordnung der Arbeitsinhalte betrachtet. Die letzte Kategorie an Kennzahlen bezieht zusätzlich die Reihenfolge der Fahrzeuge mit ein und bewertet somit die Mitarbeiterflexibilität, die zur Beherrschung des Programms benötigt wird, in Form von Drift- und Springereinsatz. Aufgrund dieser Einteilung werden auch die drei unterschiedli-

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

chen Kerninhalte der Austaktungsmethodik durch das Kennzahlensystem abgedeckt: Taktzeitszenarien, variantenabhängige Austaktung und Simulation des flexiblen Mitarbeiterverhaltens (vgl. Abschnitt 4.3). Die einzelnen Kennzahlen des Systems sowie deren genaueren Zusammenhänge werden im Folgenden erläutert.

Die Kennzahlen des Bereichs **Fahrzeugprogramm** sind v. a. für den nachfolgenden Überwachungsprozess relevant und dienen bei der Bewertung der Austaktungsergebnisse insbesondere zur Darstellung der Inputgrößen der bewerteten Szenarien. Die Kennzahl *Gesamtstückzahl* $s_{ges,akt}$ betrachtet die aktuell durch die Programmplanung vorgegebene Produktionsmenge ohne zwischen verschiedenen Varianten o. ä. zu unterscheiden. Sie ist somit insbesondere für die Auswahl der aktuell am besten geeigneten Taktzeit von Bedeutung, wie in Abschnitt 5.5.3 erläutert wird. Die Möglichkeiten hierzu stellen die Kennzahlen der *Stückzahlflexibilität* dar, die auf den Ergebnissen der bestimmten Taktzeitszenarien aufbauen (vgl. Abbildung 47). Die *relative Stückzahlflexibilität* $\Delta s_{rel,t_t,i,j}$ gibt dabei die Stückzahlflexibilität des Korridors einer Taktzeit $t_{t,i,j}$ an:

$$\Delta s_{rel,t_t,i,j} = s_{max,t_t,i,j} - s_{min,t_t,i,j} \quad (7)$$

Die entsprechenden minimalen und maximalen Stückzahlen berechnen sich über die Formeln aus Abbildung 24 (S. 84). Die *absolute Mengenflexibilität* Δs_{abs} betrachtet dagegen den gesamten Stückzahlbereich, der durch die J ausgeplanten Taktzeiten abgedeckt wird:

$$\Delta s_{abs} = \max_{j \in [1;J]} (s_{max,t_t,i,j}) - \min_{j \in [1;J]} (s_{min,t_t,i,j}) \quad (8)$$

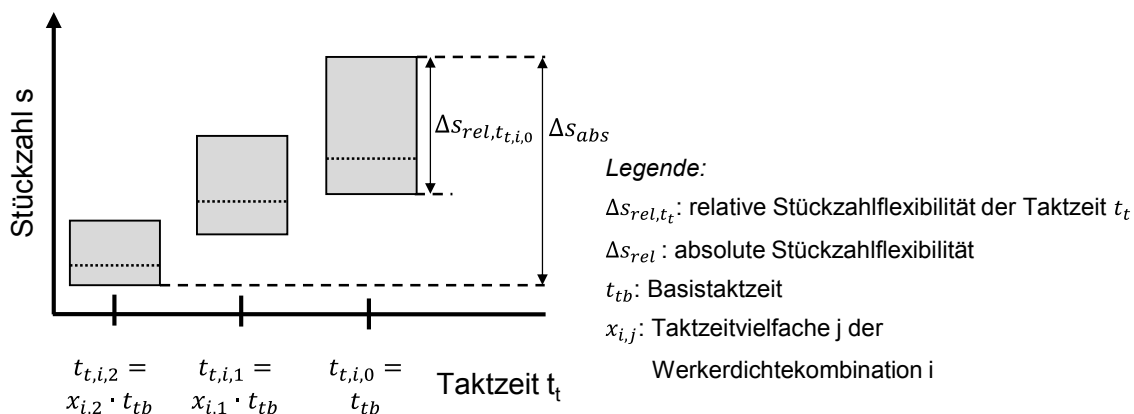


Abbildung 47: Stückzahlflexibilitätskennzahlen

5.5 Bewertung der Austaktungsszenarien und Überwachung im laufenden Betrieb

Die folgende Kennzahl dient der genaueren Analyse des Gesamtprogramms und orientiert sich an den Möglichkeiten zur Vorbereitung der Programmszenarien bei der simulativen Validierung (vgl. Abschnitt 5.4.3). Aufbauend auf den Stückzahlen der einzelnen Derivate und Varianten erfolgt die Darstellung des *Variantenmix VM* bzw. der *Variantenmixänderung ΔVM* . Der Klassifizierung bzgl. der Schwere der Varianten oder Derivate folgend (vgl. Abschnitt 5.4.3) wird der *Variantenmix VM* mit Hilfe eines Tupels beschrieben:

$$VM = (V_l, V_m, V_s) \quad (9)$$

mit: V_l : Anteil „leichter Varianten“ [%]
 V_m : Anteil „mittlerer Varianten“ [%]
 V_s : Anteil „schwerer Varianten“ [%]

Neben dieser absoluten Darstellung des Variantenmix ist noch eine relative Betrachtung notwendig: Die *Variantenmixänderung ΔVM_{t+1}* zum Zeitpunkt t+1 bezogen auf den Variantenmix zum Zeitpunkt t:

$$\Delta VM_{t+1} = (\Delta V_l, \Delta V_m, \Delta V_s) \quad (10)$$

mit: ΔV_l : Veränderter Anteil „leichter Varianten“: $\Delta V_l = V_{l,t+1} - V_{l,t}$
 $\Delta V_m, \Delta V_s$ analog

Diese beiden Kennzahlen dienen zum einen zur Beschreibung der verschiedenen simulierten Nachfrageszenarien und können gleichzeitig zur Identifikation von Veränderungen im Variantenmix herangezogen werden, noch bevor deren Auswirkungen auf die Montagelinie simuliert wurden.

Im Bereich **Austaktung** sind die Kennzahlen enthalten, die bereits einen Bezug zur Zuordnung der Arbeitsinhalte am Montageband herstellen, ohne bereits die Fahrzeugreihenfolge und somit die Drift- und Springermöglichkeiten zu berücksichtigen. Für eine detailliertere Betrachtung des Programms unabhängig der Klassifizierung nach Varianten o. ä. dient die *mittlere Vorgabezeit $t_{v\emptyset}$* , die ausschließlich die resultierende Kapazität aus den Vorgabezeiten $t_{v,k,l}$ der L Fahrzeuge des Programms an den betrachteten K Stationen des jeweiligen Bandabschnittes⁶⁶ berücksichtigt:

⁶⁶ Werden im Folgenden Kennzahlen über mehrere Stationen und/ oder Fahrzeuge hinweg generiert, wird grundsätzlich von K Stationen und L Fahrzeugen ausgegangen mit den entsprechenden Laufvariablen k und l . Je nach Kennzahl kann eine detaillierte Betrachtung auf Arbeitsplatzebene sinnvoll sein, z. B. bei mehreren unterschiedlichen Mitarbeitergruppen an einer Station. Dementsprechend kann die Laufvariable k in diesen Fällen auch über die gesamten Mitarbeitergruppen hinweg betrachtet werden.

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

$$t_{v\emptyset} = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K t_{v,k,l}}{L} \quad (11)$$

Diese Kennzahl dient ausschließlich dem Monitoring der Montagelinie, worauf in Abschnitt 5.5.3 genauer eingegangen wird.

Eine weitere wichtige Kennzahl ist die *durchschnittliche Auslastung der Arbeitsplätze* $a_{\emptyset AP}$, welche auf Basis der Vorgabezeiten $t_{v,k,l}$ des Fahrzeugprogramms die Kapazitätssituation des betrachteten Bandbereichs mit der Anzahl an Werkern $N_{W,k}$ je Station für die Taktzeit t_t darstellt⁶⁷:

$$a_{\emptyset AP} = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K t_{v,k,l}}{\sum_{k=1}^K N_{W,k} \cdot t_t \cdot L} \quad (12)$$

Die Kennzahl kann sowohl aggregiert über einen gesamten Bandabschnitt oder auch für einzelne Stationen oder Arbeitsplätze betrachtet werden. Zur Bewertung der Umsetzung der Taktzeitszenarien verdeutlicht diese Kennzahl, inwieweit eine gleichwertige Auslastung über alle Taktzeiten hinweg an den einzelnen Stationen oder auch für den gesamten Bandbereich erreicht wurde. Gleichzeitig dient sie auch zur Überprüfung der variantenabhängigen Aufteilung der Arbeitsinhalte. Bei Standardstationen ist eine möglichst hohe Auslastung nahe 100% anzustreben, während bei Variantenstationen die Möglichkeit zur Auslastung zum einen durch das Driftpotential sowie vorhandene Springer und zum anderen durch die Zeitspreizung an den Stationen beeinflusst wird. So kann bei einer hohen Spreizung und der Möglichkeit zum Drift- und Springereinsatz auch eine hohe Auslastung, ggf. auch leicht über 100% zulässig sein, was allerdings eine Ausnahme darstellen sollte.

Die *Zeitspreizung* δ_k stellt somit die nächste Kennzahl aus dem Bereich Austaktung dar und berechnet sich aus der Differenz der maximalen und minimalen Stationszeit der betrachteten Fahrzeuge⁶⁸, im vorliegenden Fall zur besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Szenarien und Arbeitsplätze bezogen auf die vorhandene Kapazität, die sich durch Multiplikation der Werkeranzahl mit der jeweiligen Taktzeit ergibt:

$$\delta_k = \frac{\max_{l \in L} t_{s,k,l} - \min_{l \in L} t_{s,k,l}}{\sum_{k=1}^K N_{W,k} \cdot t_t} \quad (13)$$

⁶⁷ Laut DIN 69901-5 (S. 7) wird der Auslastungsgrad allgemein definiert als das „Verhältnis von genutzter zu möglicher Leistung einer Ressource [...] in einem bestimmten Zeitraum“.

⁶⁸ vgl. JANDER 2012A sowie Abbildung 6, S. 24

5.5 Bewertung der Austaktungsszenarien und Überwachung im laufenden Betrieb

Während sie der vorgestellten Logik folgend an Standardstationen nahezu nicht vorhanden sein sollte, stellt sie bei den Variantenstationen den Einfluss der Variantenvielfalt an diesen Stationen dar. Eine weitere Beurteilung der Zusammensetzung des Variantenprogramms ist über eine visuelle Auswertung des Diagramms Variantenspreizung (vgl. Abbildung 46, S. 121) möglich.

Über diese Kennzahlen hinaus, die insbesondere die durch die Austaktung resultierenden Vorgabezeiten an den einzelnen Stationen im Fokus haben, sind auch noch zwei weitere Größen relevant, die die Umsetzung der im Rahmen dieser Arbeit eingeführten Austaktungsregeln bewerten. Bzgl. der Taktzeitszenarien betrachtet die *Quote der einheitlichen Werkerdichte* q_w , in welchem Anteil der gesamten K Stationen bzw. Mitarbeitergruppen die Vorgabe einer einheitlichen Werkerdichte w in der Basisplanung der Grundtaktzeit erfüllt wurde:

$$q_w = \frac{\text{Anzahl Stationen bzw. Gruppen mit Werkerdichte } w}{K} \quad (14)$$

Die Kennzahl q_w ist somit ein Maß für den Umplanungsaufwand bei Taktzeitwechseln. Zur Beurteilung der Robustheit bzgl. Variantenmixschwankungen dient die *Standardisierungsquote* q_{st} , die den Anteil an Arbeitsplätzen mit nahezu variantenunabhängigen Tätigkeiten angibt:

$$q_{st} = \frac{\text{Anzahl Standardarbeitsplätze}}{\text{Anzahl Arbeitsplätze gesamt}} \quad (15)$$

Tendenziell spricht eine hohe q_{st} für eine hohe Robustheit gegenüber Variantenmixschwankungen, da ein Großteil der Stationen nicht davon betroffen ist. Ist der Anteil an variantenbehafteten Stationen allerdings so gering, dass Auslastungsveränderungen zwischen diesen Stationen kaum ausgeglichen werden können, ist der Anpassungsaufwand höher, da ggf. auch Standardstationen mit einbezogen werden müssen.

Nachdem die bisherigen Kennzahlen die Rahmenbedingungen des Fahrzeugprogramms und dessen Auswirkungen unter Berücksichtigung der Austaktung der Montagelinie betrachtet haben, stehen im Bereich **Mitarbeiterflexibilität** Kennzahlen im Fokus, die das dynamische Verhalten der Werker und Springer als Folge der zuvor erläuterten Bereiche darstellen. Zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen der Vielzahl an Varianten und der Fahrzeugreihenfolge kann ein Großteil dieser Kennzahlen mit vertretbarem Aufwand nur mittels Simulationsunterstützung erhoben werden. Wie in Tabelle 8 (S. 123) dargestellt, sind diese Kennzahlen insbesondere den Kerninhalten variantenabhängige Aus-

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

taktung und Simulation des Mitarbeiterverhaltens zuzuordnen. Da die Ergebnisse der variantenabhängigen Austaktung im Rahmen der Simulation für alle vorgeplanten Taktzeiten ausgewertet werden, dienen sie somit auch zur Validierung der erfolgreichen Kombination der Umsetzung der Taktzeitszenarien mit der variantenabhängigen Austaktung.

Mit Hilfe der in Abschnitt 5.4.2 vorgestellten Simulationslogik wird unter Einbezug der potentiellen Vorarbeit und Nacharbeit ($VA_{p,k}$ und $NA_{p,k}$, vgl. Abschnitt 5.3.4.2) für jede Station in Abhängigkeit des Variantenprogramms das Driftverhalten simuliert. Eine Hilfsgröße für die folgenden Berechnungen stellt das *Driftpotential* $D_{p,k}$ dar, welches durch $VA_{p,k}$ und $NA_{p,k}$ sowie der Werkeranzahl $N_{W,k}$ an der Station k bestimmt wird:

$$D_{p,k} = N_{W,k}(VA_{p,k} + NA_{p,k}) \quad (16)$$

Die Angabe von $VA_{p,k}$ und $NA_{p,k}$ erfolgt jeweils prozentual im Verhältnis zur Taktzeit, wodurch das Driftpotential $D_{p,k}$ die durch Drift maximale zusätzliche Kapazität pro Takt an einer Station bezogen auf die Taktzeit ausweist.

Sind die Driftgrenzen nicht ausreichend, um das Variantenprogramm abzudecken, werden Springer hinzugezogen. Die erste Kennzahl aus dem Bereich Mitarbeiterflexibilität stellt die *Springerquote* $q_{sp,k}$ dar. Sie setzt für das betrachtete Fahrzeugprogramm die Springereinsatzzeit t_{sp} ins Verhältnis zur vorhandenen Mitarbeiterkapazität der betrachteten Station oder Mitarbeitergruppe k mit der Werkeranzahl $N_{w,k}$:

$$q_{sp,k} = \frac{\sum_{l=1}^L t_{sp,k,l}}{N_{w,k} \cdot t_t \cdot L} \quad (17)$$

Die Springerquote gibt somit einen Überblick, wieviel der Gesamtkapazität, die an einer Organisationseinheit zur Verfügung steht, durch Springer abgedeckt ist und liefert somit in Kombination mit der durchschnittlichen Auslastung der Arbeitsplätze $a_{\emptyset AP}$ eine Aussage, inwieweit die Varianz der Perlenkette nur durch zusätzliche Unterstützung durch Springer beherrschbar ist. Da die Springer bei Kapazitätsspitzen unterstützen, die durch die festen Werker der Stationen nicht abgedeckt werden können, wird die durchschnittliche Auslastung der Werker $a_{\emptyset W,k}$ durch Subtraktion der Springerquote $q_{sp,k}$ von der durchschnittlichen Auslastung des Arbeitsplatzes $a_{\emptyset AP,k}$ berechnet:

$$a_{\emptyset W,k} = a_{\emptyset AP,k} - q_{sp,k} = \frac{\sum_{l=1}^L (t_{v,k,l} - t_{sp,k,l})}{N_{W,k} \cdot t_t \cdot L} \quad (18)$$

5.5 Bewertung der Austaktungsszenarien und Überwachung im laufenden Betrieb

Bei Standardstationen sollte $a_{\emptyset W}$ nahezu gleich $a_{\emptyset AP}$ sein, da aufgrund der Vermeidung von Kapazitätsschwankungen kein Springereinsatz notwendig ist. Bei Variantenstationen ist der Unterschied zwischen beiden Größen die ausschlaggebende Kenngröße zur Bewertung des dynamischen Umgangs der Mitarbeiter mit dem Programm und der Ausnutzung der vorhandenen Flexibilisierungsmöglichkeiten. Ob die Springereinsätze aus einer ungünstigen Konstellation der Perlenkette oder aus zu geringen Driftmöglichkeiten resultieren, zeigt die *Driftquote* q_D . Sie setzt die aus den genutzten Driftzeiten $t_{d,k,l}$ eines Bandbereichs ins Verhältnis zum vorhandenen Driftpotential D_p :

$$q_D = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J t_{d,k,l}}{D_p \cdot t_t} \quad (19)$$

Während bei einer hohen Driftquote q_D sowohl Maßnahmen im Bereich der Austaktung zur Verringerung der Variantenspitzen als auch Maßnahmen zur Erhöhung der Driftmöglichkeiten anzustreben sind, greifen bei einer niedrigen q_D und einer gleichzeitig hohen Springerquote q_{Sp} nur die Maßnahmen bzgl. der Austaktung der Linie. Dabei wird auch der iterative Charakter der Planungsmethodik deutlich, da aufbauend auf den Simulations- und Bewertungsergebnissen noch einmal Anpassungen im vorherigen Planungsschritt erforderlich sein können.

Zuletzt ist insbesondere für die kontinuierliche Überwachung der Montagelinie noch die Auslastung des Springerpersonals interessant. Bislang ist über die Springerquote q_{Sp} lediglich der Kapazitätsanteil bekannt, der durch Springer übernommen wird. Darauf aufbauend lässt sich die *durchschnittliche Springer-auslastung* $a_{\emptyset Sp}$ eines Bandabschnitts unter Einbezug der Werker- und Springeranzahl (N_W und N_{Sp}) bzw. der Springereinsatzzeit t_{Sp} wie folgt berechnen:

$$a_{\emptyset Sp} = \frac{\sum_{k=1}^K (q_{Sp,k} \cdot N_{W,k})}{N_{Sp}} = \frac{\sum_{k=1}^K t_{Sp,k}}{N_{Sp} \cdot t_t} \quad (20)$$

Tendenziell ist es natürlich sinnvoll eine hohe Auslastung der Springer zu erreichen, insbesondere da nicht nur die Einsatzzeiten der Springer zu betrachten sind, sondern viel mehr die Anzahl an parallel eingesetzten Springern entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Montagelinie ist (ALTEMEIER 2009). Im Rahmen der Bewertung der Planungsergebnisse wird dieser Aspekt allerdings nicht tiefer betrachtet, da die Anzahl an Springer v. a. von parallelen Springereinsätzen und somit hauptsächlich von der Reihenfolgeplanung und der täglichen Personaleinsatzplanung abhängt. Somit dient diese Kennzahl v. a. zur anschließenden Über-

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

wachung der Montagelinie im laufenden Betrieb und nicht zur Bewertung der Planungsergebnisse.

Mit Hilfe des vorgestellten Kennzahlensystems können die Ergebnisse der manuellen Planung der Austaktung bewertet werden, z. T. unter Einbezug der Simulationsergebnisse. Da die verschiedenen Kerninhalte der Methodik in den drei Teilbereichen des Kennzahlensystems angesprochen werden, ist eine zielgerichtete, iterative Anpassung der Planungsergebnisse möglich. Hierzu wurden für die Kennzahlen Tendenzen und Richtwerte vorgestellt, die die Erfüllung der Regeln der Methodik bewerten. Genaue Grenzwerte für die Kennzahlen sind unternehmens- und fallspezifisch festzulegen und können nicht allgemeingültig sinnvoll vorgegeben werden.

5.5.3 Anwendung des Kennzahlensystems zur Überwachung der Montagelinie

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Planungsvorgehen zur Austaktung variantenreicher Montagelinien hat insbesondere eine schnelle Reaktionsfähigkeit zum Umgang mit Schwankungen in der Nachfrage im Fokus. Um kurzfristige Anpassungen vornehmen zu können, schafft die Methodik zum einen die Möglichkeit eines vorgeplanten Taktzeitwechsels mit Hilfe der Taktzeitszenarien und zum anderen wird durch die variantenabhängige Austaktung der Einfluss von Variantenmixschwankungen fokussiert. Im Rahmen der Taktzeitkorridore werden zusätzlich weitere Kapazitätsanpassungsmaßnahmen bzgl. Veränderungen in der nachgefragten Stückzahl berücksichtigt. Außerdem wird der flexible Umgang der Mitarbeiter mit unterschiedlichen Varianten im Rahmen der variantenbehafteten Stationen fokussiert und mittels Simulation bewertet. Um die verschiedenen Aspekte zum Umgang mit Nachfrageschwankungen schnell und zielgerichtet anwenden zu können, kann das im vorherigen Abschnitt zur Bewertung der Planungsergebnisse vorgestellte Kennzahlensystem (vgl. Tabelle 8, S. 123) verwendet werden. Dabei sind Variantenmix- und Stückzahlschwankungen separat zu betrachten.

Um die Reaktionsfähigkeit bei **Variantenmixschwankungen** zu überwachen, sind tägliche Simulationen des flexiblen Mitarbeiterverhaltens notwendig. Die Anwendung des Kennzahlensystems kann aufgrund der benötigten Daten in unterschiedlichen Phasen der Reihenfolgeplanung erfolgen (vgl. Abschnitt 2.3.4), wie Abbildung 48 angelehnt an den Begrifflichkeiten aus Abbildung 12 (S. 39) verdeutlicht.

5.5 Bewertung der Austaktungsszenarien und Überwachung im laufenden Betrieb

Die Kennzahlen des *Fahrzeugprogramms*, die beiden Kennzahlen des Variantenmix, können bereits im Rahmen des Balancings erste Anhaltspunkte geben, inwieweit eine Glättung bei der Zuordnung der Aufträge zu einer verringerten Schwankung führen kann. Insbesondere die Einteilung der Schwere der Varianten in der Kennzahl VM bzw. ΔVM können einen Eindruck über die Zusammensetzung des Programms liefern. Eine Anpassung der Variantenstationen ist in dieser frühen Phase meist nicht sinnvoll. Sollten allerdings sehr große Verschiebungen einiger Varianten auffallen, die bestimmte Stationen besonders beeinflussen, können bereits in dieser Phase erste Überlegungen getroffen werden, die in der anschließenden Phase zu konkretisieren sind.

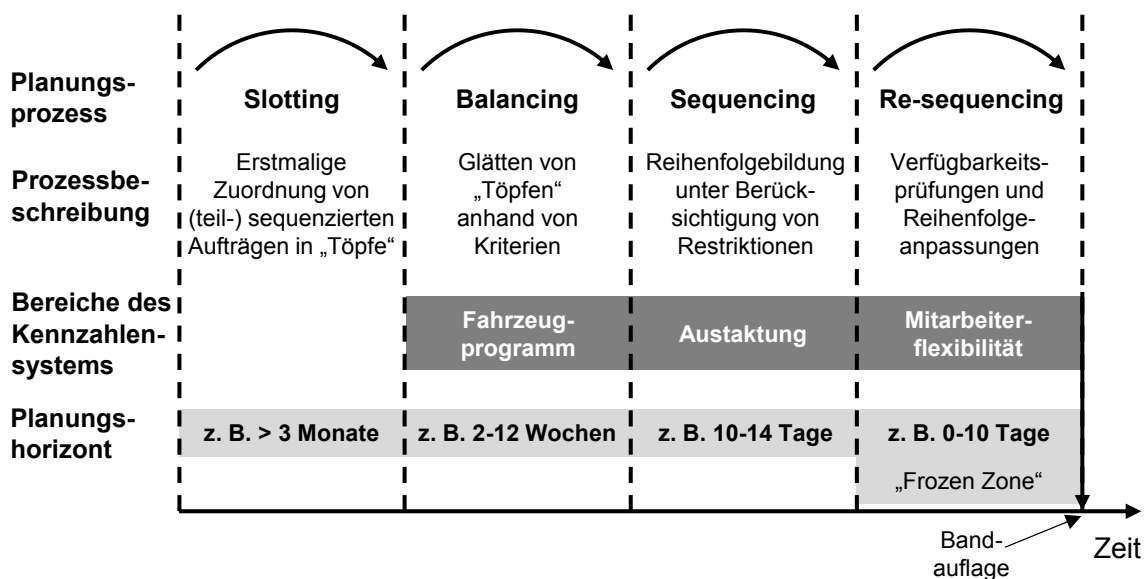


Abbildung 48: Anwendung der Kennzahlen im zeitlichen Horizont der Programmplanung (vgl. Abbildung 12, S. 39)

Nach abgeschlossenem Balancing können die Kennzahlen des Bereichs *Austaktung* betrachtet werden, da für die einzelnen Schichten jetzt das Programm feststeht, wenn auch noch ohne konkrete Fahrzeugreihenfolge. Auch zuvor erkannte Veränderungen im Programm, die im Zuge des Balancings nicht geglättet werden konnten, können jetzt genauer hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Montagelinie untersucht werden. Die Kennzahl $t_{v\emptyset}$ gibt Aufschluss über die durchschnittliche Schwere des Programms, während mit Hilfe von δ_k Abschätzungen bzgl. der Zusammensetzung des Programms und somit des tendenziellen Bedarfs an Mitarbeiterflexibilität möglich sind. Wichtigste Kennzahl für die Variantenstationen ist allerdings die durchschnittliche Auslastung der einzelnen Arbeitsplätze $a_{\emptyset AP}$, da durch deren Betrachtung bereits in dieser Phase erste Unter- oder Überlastungen erkannt werden können. Somit ist ggf. die Umtaktung von Arbeitsin-

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

halten zwischen den variantenbehafteten Arbeitsplätzen, hin zu nicht vollständig ausgelasteten Standardarbeitsplätzen oder die Hinzu- und Wegnahme von Mitarbeitern zu planen. Die Wirkung dieser Maßnahmen ist nach erfolgtem Sequencing mittels Simulation zu überprüfen.

Die Berechnung der Kennzahlen der *Mitarbeiterflexibilität* erfolgt durch Simulation der bereits fixierten Aufträge innerhalb der Frozen Zone nach dem Sequencing. Dadurch ist eine Vorschau auf das Drift- und Springerverhalten und somit auf die tatsächliche Auslastung der Mitarbeiter möglich. In dieser Phase kann sowohl die Wirksamkeit bereits zuvor eingeleiteter Maßnahmen als auch der Bedarf von sich ausschließlich aus der Reihenfolge ergebender Maßnahmen geprüft werden. Die Priorisierung der Maßnahmen erfolgt dabei bzgl. der Fristigkeit ihrer Umsetzbarkeit. Zunächst sind die vorhandenen Möglichkeiten des Drift- und Springereinsatzes auszunutzen und zu prüfen, inwieweit zusätzlicher Springerbedarf über Vormontagen oder zusätzliche Kapazitäten aus benachbarten Bandbereichen abgedeckt werden kann. Ist das nicht möglich, sind die zuvor genannten Maßnahmen der Austaktung der variantenbehafteten Stationen zu prüfen, wobei durch die schnelle Simulationsunterstützung kurzfristig unterschiedliche Alternativen bewertet werden können und somit für die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen fast die gesamte Zeitspanne der Frozen Zone zur Verfügung steht.

Zum Umgang mit **Stückzahlschwankungen** besteht nach Anwendung der Austaktungsmethodik neben anderen nutzbaren Kapazitätsanpassungsmaßnahmen die Möglichkeit der schnellen Anpassung der Taktzeit in vorgeplanten Stufen. Da Stückzahlschwankungen i. d. R. durch Prognoseverfahren oder auch aufgrund des längeren Vorlaufs von Bestellungen frühzeitiger erkannt werden können, kann die Planung der Taktzeiten in einem früheren Stadium des Reihenfolgeplanungsprozesses geschehen. Bereits im Rahmen des Slottings liegen ausreichende Informationen über die zu produzierende Stückzahl vor (vgl. Abbildung 48). Dabei ist folgende Fragestellung zu beantworten, wie in Abbildung 49 verdeutlicht:

1. Welches Taktzeitszenario mit welcher Taktzeit soll
2. mit welchen zusätzlichen Kapazitätsmaßnahmen
3. zu welchem Zeitpunkt eingesetzt werden,

um wirtschaftlich die Kundennachfrage zu befriedigen?

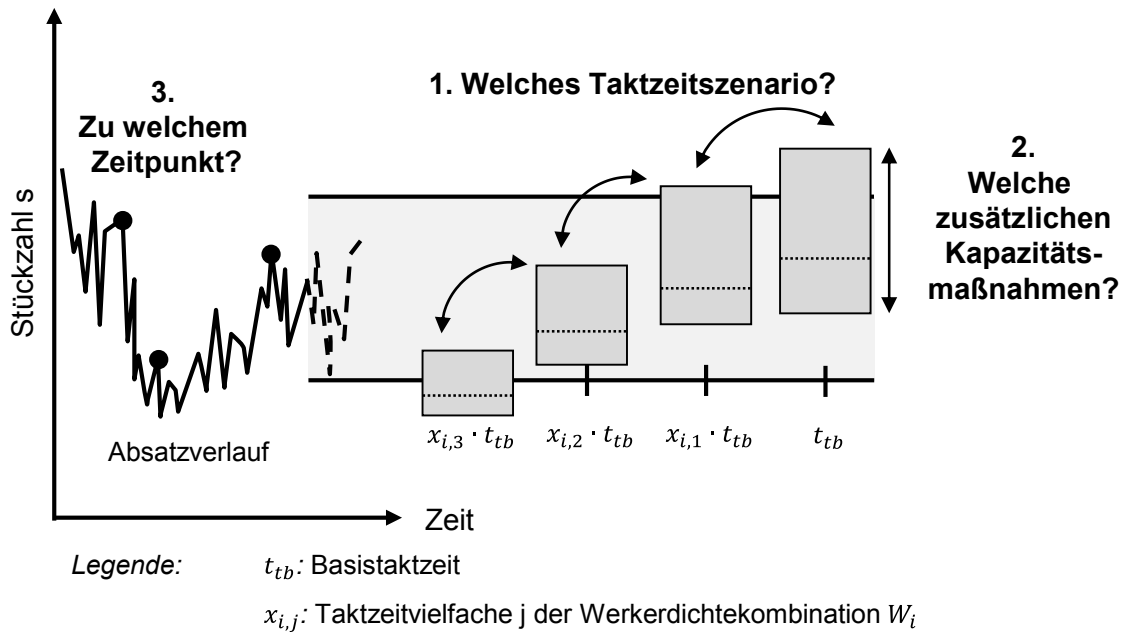


Abbildung 49: Fragestellung zur Auswahl der Taktzeitszenarien und deren zusätzliche Kapazitätsmaßnahmen

Da die Taktzeitszenarien aus Sicht der Kapazitätsplanung lediglich eine zusätzliche Maßnahme zur Anpassung der Kapazität der Montagelinie darstellen, kann mit dem vorgestellten Konzept analog zu gängigen Methoden der Kapazitätsplanung verfahren werden, die in Wissenschaft und Praxis etabliert sind. GOTTSCHALK (2007) und SCHELLMANN (2012) verwenden zur Beschreibung und Bewertung der Kapazitätsflexibilität von Produktionssystemen zusätzlich zum Kapazitätsbeitrag⁶⁹ folgende Parameter zur Modellierung von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen:

- Aktivierungszeit der Maßnahme t_{akt}
- Minimale Nutzungsdauer der Maßnahme $t_{ND,min}$
- Maximale Nutzungsdauer der Maßnahme $t_{ND,max}$
- Aktivierungskosten der Kapazitätsanpassung $k_{MN,akt}$
- Laufende Kosten der Kapazitätsanpassung $k_{MN,lauf}$

Durch Anwendung der vorliegenden Methodik wird insbesondere die Aktivierungszeit einer Taktzeitanpassung sowie die daraus resultierenden Kosten reduziert, da schnell und mit geringem Umplanungsaufwand reagiert werden kann. Zur Auswahl der geeigneten Kombination aus Taktzeit, Schichtanzahl sowie zusätzlichen Kapazitätsmaßnahmen sind somit die oben genannten Parameter für jede Ausprägung der Maßnahmen zu beschreiben. Durch die Aktivierungs- sowie

⁶⁹ vgl. Abschnitt 5.2.3.1

5 Detailbetrachtung der Methodik zur kurzfristigen Anpassung der Austaktung

die minimale und maximale Nutzungsdauer wird über einen laufenden Zeitraum für jede Periode beschrieben, welche Maßnahmen eingesetzt werden können. Der Kapazitätsbeitrag ΔKAP gibt an, welche Stückzahl daraus resultiert. Durch Einbezug der Umsetzungskosten ist eine Bewertung der Kosten-Nutzen-Relation möglich, um eine Kapazität möglichst nahe der vom Kunden aktuell geforderten Gesamtstückzahl $s_{ges,akt}$ zu erreichen. Für detailliertere Ausführungen zur Auswahl und Bewertung von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen sei nochmals auf GOTTSCHALK (2007) und SCHELLMANN (2012) verwiesen.

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage

6.1 Kapitelüberblick

Die entwickelte Methodik wird in diesem Kapitel exemplarisch angewendet. Als Beispiel dient ein Teilbereich der Montagelinie der schweren LKW-Reihe⁷⁰ der MAN Truck & Bus AG (MTB) im Werk München. Zur Nachvollziehbarkeit stellt Abschnitt 6.2 zunächst die Ausgangssituation beim Anwender dar, indem zum einen der allgemeine Ablauf einer LKW-Montage und zum anderen die Bandkonfiguration vor Durchführung der Planung erläutert werden. Den Kern des Kapitels bildet die Anwendung der Methodik und die Interpretation der resultierenden Ergebnisse (vgl. Abschnitt 6.3). Darauf aufbauend würdigt Abschnitt 6.4 die entwickelte Methodik bzgl. der an sie gestellten Anforderungen kritisch.

6.2 Ausgangssituation beim Anwender

6.2.1 Ablauf der LKW-Montage

Die hohe Herausforderung zur Austaktung von LKW-Montagelinien lässt sich durch die im Vergleich zur PKW-Industrie unterschiedlichen Rahmenbedingungen bzgl. des Marktverhaltens, des Produktportfolios und des Produktionssystems begründen (vgl. Abschnitt 2.5). Außerdem ist aufgrund des unterschiedlichen Produktaufbaus der Ablauf des Montageprozesses sehr unterschiedlich.

Bei der PKW-Produktion stellt die Montage den letzten Schritt nach Presswerk, Rohbau und Lackierung dar. Die lackierten Karossen werden in der Montage mit weiteren Innenkomponenten sowie mit dem vormontierten Antriebsstrang ausgestattet und abschließend einer Endkontrolle unterzogen. Die notwendigen Montage- und Prüftätigkeiten sind bei grober Betrachtung sehr ähnlich und unterscheiden sich im Detail auf unterschiedlichen Linien bzw. bei unterschiedlichen Modellen und Marken in der produktabhängigen Verbaureihenfolge sowie bzgl. spezieller Sonderausstattungen (WEIB 2000, WEYAND 2010).

⁷⁰ Zu den „schweren LKWs“ werden alle LKWs mit einem zulässigen Gesamtgewicht größer 7,5 Tonnen gezählt (SHELL 2010).

Der Montageablauf in einer LKW-Montagelinie unterscheidet sich stark zu dem in PKW-Linien, da das Produkt keine vollständige Karosserie im klassischen Sinne aufweist, sondern um einen tragenden Leiterraum herum aufgebaut wird, auch Chassis genannt. Die Montage beginnt mit dem Aufbau des Leiterraums bestehend aus Längs- und Querträgern sowie weiterer Anbauteile, die genietet oder verschraubt werden. Anschließend erfolgt die Montage der Achsen und optional, je nach Hersteller, eine Lackierung des Rahmens. Diese wird aufgrund der hohen Variantenvielfalt üblicherweise manuell durchgeführt. Darauf folgend werden Leitungen und Kabel verlegt und der Motor eingebaut. Nach dem Motoreinbau wird das Fahrerhaus als eigenständiges Modul aufgesetzt, welches in seinem eigenen Produktionsprozess dem PKW mit den Schritten Rohbau, Lackierung und Montage stark ähnelt. Abschließend erfolgt die Befüllung mit Betriebsstoffen und die Endprüfung der Fahrzeuge (MAN 2008).

Die hohe Varianten- und Teilevielfalt im Nutzfahrzeugbereich sowie ein Vergleich zur PKW-Industrie wurden bereits in Abschnitt 2.5 diskutiert. Zur Verdeutlichung der hohen Variantenvielfalt und der daraus resultierenden Zeitspreizung sei ein Beispiel aus der betrachteten Montagelinie aufgeführt: Auf dieser Linie werden zwei-, drei- und vierachsige Fahrzeuge montiert, die zusätzlich einfach- oder zwillingsbereift⁷¹ sein können. Demzufolge müssen auf dieser Linie zwischen vier und 16 Reifen je Fahrzeug montiert werden, was zu einer entsprechenden Zeitspreizung führt.

6.2.2 Ausgangssituation Bandkonfiguration und Anwendungsrahmen

Der zuvor beschriebene allgemeine Ablauf einer LKW-Montage findet sich auch in der im Rahmen dieser Arbeit als Anwendungsbeispiel herangezogenen Endmontagelinie der schweren Reihe der MTB wieder (vgl. Abbildung 50). Nach dem Rahmen- und Achseinbau sowie der Rahmenlackierung erfolgt die Komplettierung des Fahrzeugs samt Motor- und Fahrerhauseinbau sowie das Finishing und die Endprüfung. Die iterative Entwicklung und Anwendung der vorgestellten Austaktungsmethodik erfolgte im Rahmen des Forschungsprojektes „Dynamischer Austaktungsprozess im Nutzfahrzeugbau“ zwischen der Technischen Universität München (TUM) und der MTB. Die Anwendung erfolgte dabei am gesamten Montageband, wobei insbesondere der Rahmen- und Achseinbau im ersten Bandabschnitt im Fokus stand (vgl. Punkte 1 bis 3 in Abbildung 50).

⁷¹ Zwillingsbereifung: Zwei Reifen je Seite und Achse

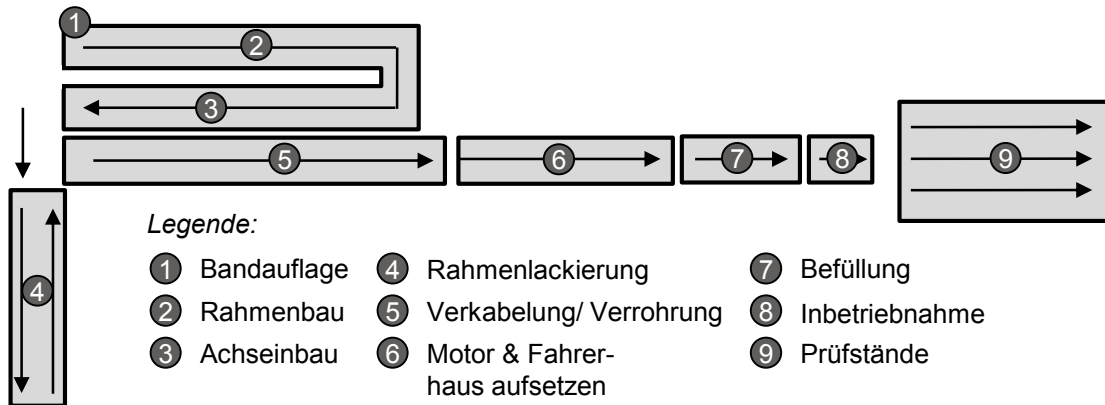


Abbildung 50: Struktur Endmontagelinie MTB Werk München (Stand: Juni 2014)

Die variantenreiche Montagelinie, auf der 69 unterschiedliche Fahrzeugtypen⁷² montiert werden, weist eine hohe Zeitspreizung um bis zu 200% über der Taktzeit in den einzelnen Stationen, aber auch in Summe über das gesamte Band hinweg auf (vgl. Auswertung in Abbildung 15, S. 47). In der Ausgangskonfiguration war das Montageband auf eine Taktzeit von 6,5 Minuten ausgetaktet. Eine wie in der vorgestellten Methodik geforderte variantenabhängige Trennung von Arbeitsinhalten sowie eine Mitarbeiterzuordnung nach Taktzeitszenarien war über die gesamte Montagelinie hinweg nicht vorhanden. Abbildung 51 veranschaulicht letzteres durch Auswertung der durchschnittlichen Auslastung des gesamten Bandes bei Veränderung der Taktzeit und ausschließliche Anpassung der Mitarbeiterkapazität bei einer Überlastung der einzelnen Station (analog zu Abbildung 14, S. 45). Es wird deutlich, dass sich keine Auslastungsmaxima für die Montagelinie herausbilden, außer in der Nähe der Taktzeit von 6,5 Minuten, auf die die Linie zum Auswertungszeitpunkt ausgelegt war. Somit ist bei einer Anpassung der Taktzeit auch eine vollständige Neuaustaktung erforderlich. Die hohen Auslastungswerte bei niedrigen Taktzeiten ergeben sich in dieser Auswertung durch sehr hohe Werkerdichten je Station, die in der Realität nicht umsetzbar sind.

Das in Abschnitt 5.4 vorgestellte Simulationswerkzeug PePe wurde im Rahmen des zuvor genannten Forschungsprojektes bei der MTB Mitte 2011 prototypenhaft eingeführt und anschließend um Funktionalitäten zur Datenauswertung, -visualisierung und Austaktung erweitert. Anwendungsrahmen war dabei die gesamte Endmontagelinie mit 72 Stationen und 166 Arbeitsplätzen. Das Werkzeug wird seit der Einführung insbesondere zur Bewertung von Austaktungsze-

⁷² Darin enthalten sind sowohl Fahrzeuge für den Fernverkehr als auch für den Baustelleneinsatz, vom Zwei- bis zum Vierachser, mit einer Fahrzeuglänge zwischen sechs und 13 Metern.

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage

narien, aber auch zur Analyse der aktuellen Programmsituation und zur Personaleinsatzplanung operativ genutzt. Für den täglichen Einsatz stehen für die nächsten zehn Werktage die eingefrorenen Perlenketten zur Verfügung, die bereits im Rahmen der Programmplanung festgelegt wurden.

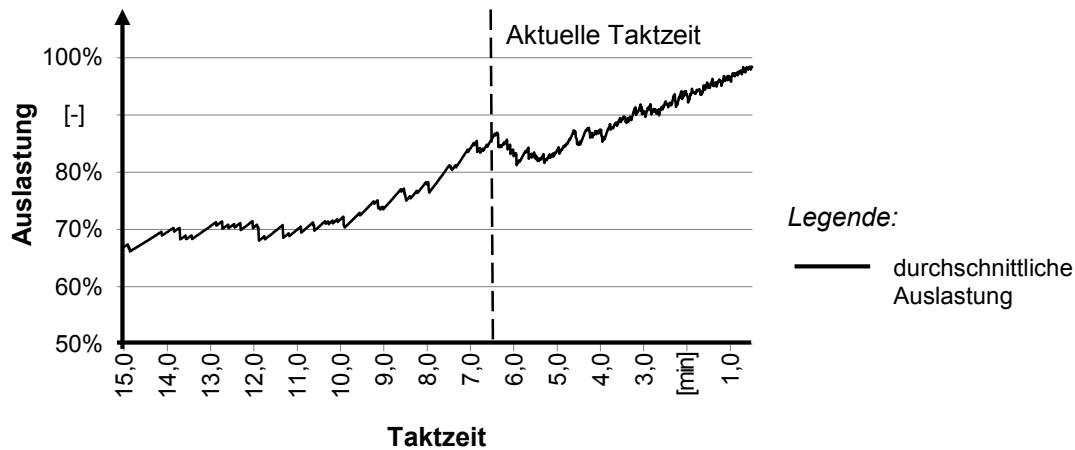


Abbildung 51: Verlauf der Auslastungskurve in Abhängigkeit der Taktzeit bei fester Zuordnung der Arbeitsinhalte über das gesamte Band

Darüber hinaus erfolgte die Anwendung der entwickelten Methodik v. a. im ersten Bandabschnitt der Montagelinie (vgl. Punkte 1 bis 3 in Abbildung 50). In Austaktungsworkshops in unterschiedlichen Segmenten des Bandabschnittes wurden die unterschiedlichen Kerninhalte der Methodik (Austaktung nach Taktzeitszenarien, variantenabhängige Austaktung, Validierung von Austaktungsergebnissen mittels Simulation des Personaleinsatzes) zunächst einzeln erprobt, um anschließend in der integrierten, hier diskutierten Form angewendet zu werden.

Im Rahmen einer mehrstufigen Anpassung der Austaktung in diesem Bandbereich konnte durch Anwendung der vorgestellten Methodik die Austaktung angepasst werden. Ergebnisse waren neben einer Bandkürzung um sieben Stationen auch eine Produktivitätsverbesserung⁷³ um knapp 12 %. Im Folgenden wird am Beispiel des ersten Bandbereichs des betrachteten Montageabschnitts die Anwendung der Methode erläutert. Abbildung 52 zeigt die Ausgangssituation des Bandabschnitts, der aufgrund erster vorangehender Umstrukturierungsmaßnahmen einen besonderen Anpassungsbedarf aufweist, wie aus den Kennzahlen im

⁷³ Im betrachteten Unternehmen wird Produktivität über folgenden Zusammenhang gemessen:

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Anwesenheitsstunden}}{\text{Anzahl produzierter Fahrzeuge}} \quad (22)$$

Anhang 9.5 deutlich wird. Die Struktur des folgenden Abschnittes ist, wie in Abbildung 20 (S. 75) visualisiert, analog zu Kapitel 5 aufgebaut.

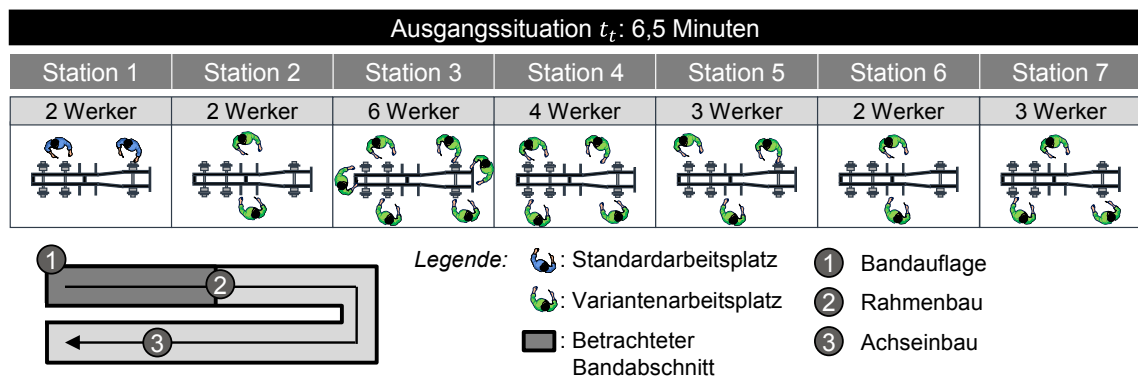


Abbildung 52: Bandkonfiguration der Ausgangssituation

6.3 Anwendung der Methodik

6.3.1 Bestimmung der Taktzeitszenarien

Die Ermittlung der Taktzeitszenarien, also der Taktzeiten und Werkerdichten, auf die die Montagelinie ausgelegt werden soll, erfolgt übergreifend für den gesamten Montagebereich, um das Konzept auch an der gesamten Linie anwenden zu können. Die anschließende Ausplanung ab Abschnitt 6.3.2 wiederum wird am Beispiel des ersten Bandabschnittes (vgl. Abbildung 52) verdeutlicht.

Zunächst sind die **realisierbaren Taktzeitvielfachen zu bestimmen**, welche von den möglichen Werkerdichten an den Montagestationen abhängen. Aufgrund der Breite der Fahrzeuge ist ein beidseitiges, paralleles Montieren möglich. Die Fahrzeuglängen variieren zwischen sechs und 13 Metern. Um ein gegenseitiges Behindern der Werker in allen Fällen zu vermeiden, wird das kürzeste Fahrzeug als Referenz herangezogen. Praxiserprobungen haben gezeigt, dass bis zu sechs Werker theoretisch nebeneinander arbeiten können, woraus sich nach Halbierung dieser Anzahl eine Maximalbelegung von drei Werkern je Fahrzeugseite ergibt, also eine maximale Werkerdichte w_{max} von sechs Werkern. Die minimale Werkerdichte w_{min} hingegen liegt bei einem Werker. Es sind zwar durchaus auch Arbeitsschritte vorhanden, die die Zusammenarbeit von mehreren Mitarbeitern erfordert, wie beispielsweise der Einbau der Achsen. Da hiervon im betrachteten Montagebereich aber nur ein sehr geringer Anteil an Arbeitsplätzen betroffen ist, können diese Ausnahmen bei der Festlegung der globalen Werkerdichten ver-

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage

nachlässigt werden. Somit ergeben sich aus w_{min} und w_{max} unter Einbezug von Formel 2 (S. 79) die in Abbildung 53 dargestellten Taktzeitvielfachen $x_{i,j}$.

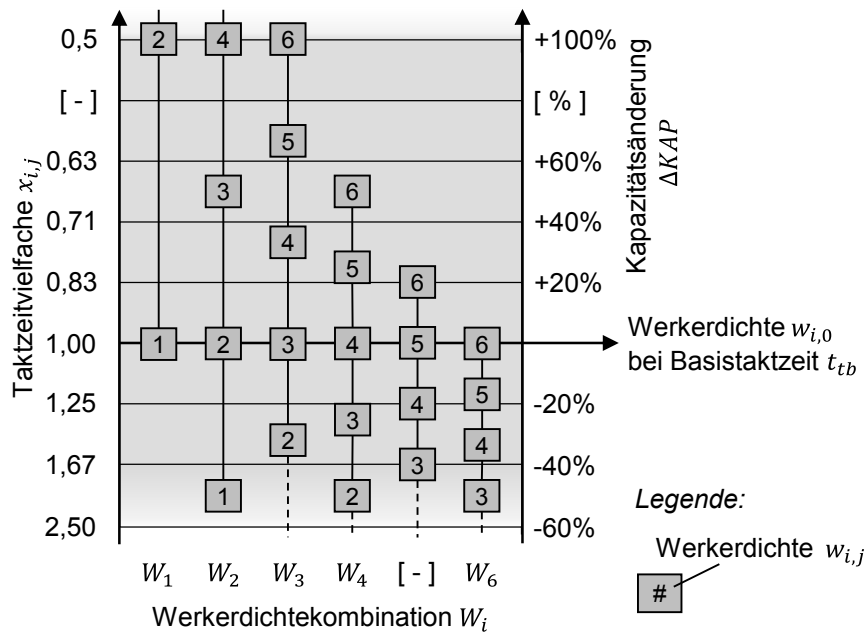


Abbildung 53: Realisierbare Werkerdichten und resultierende Taktzeitvielfache im Anwendungsfall

Für die **Ermittlung der resultierenden Taktzeiten** sind zunächst weitere Eingangsgrößen aufzunehmen. Der berücksichtigte Stückzahlkorridor basiert auf Prognosen gestützt durch Vergangenheitswerte, die aufgrund des turbulenten Nutzfahrzeugmarktes während der Wirtschaftskrise ab 2008 (DEUTSCHE BANK RESEARCH 2012) einer starken Streuung unterliegen. Ergebnis der Prognosen sind folgende Werte des Stückzahlkorridors für die betrachtete Montagelinie⁷⁴:

- Minimale Stückzahl $s_{ges,min}$:
15.570 Fahrzeuge pro Jahr bzw. 311 Fahrzeuge pro Woche⁷⁵
- Wahrscheinlichste Stückzahl $s_{ges,ml}$:
29.130 Fahrzeuge pro Jahr bzw. 583 Fahrzeuge pro Woche
- Maximale Stückzahl $s_{ges,max}$:
52.000 Fahrzeuge pro Jahr bzw. 1.040 Fahrzeuge pro Woche

⁷⁴ Die MTB betreibt insgesamt drei Werke der schweren LKW-Reihe in Europa plus weitere CKD-Werke, auf die das gesamte Fahrzeugprogramm umgelegt wird. Die im Folgenden beschriebenen Zahlen stellen die im Rahmen der Anwendung der Methode verwendeten Daten dar und spiegeln aus Geheimhaltungsgründen nicht die tatsächlichen strategischen Prognosen des Unternehmens wider.

⁷⁵ Für die nachfolgenden Berechnungen werden die Stückzahlen auf eine Arbeitswoche umgerechnet, wobei von 250 Arbeitstagen im Jahr ausgegangen wird.

Zusätzlich müssen auch die anderweitig vorhandenen Kapazitätsmaßnahmen aufgenommen werden, um den Stückzahlkorridor für eine bestimmte Taktzeit festlegen zu können. Tabelle 9 gibt einen Überblick über diese Kapazitätsanpassungsmaßnahmen und deren Kapazitätsänderungsbeitrag⁷⁶. Die Konstellation für die zugrundeliegende Grundkapazität KAP_g ist ebenfalls angegeben sowie die Aktivierungszeit und die minimale bzw. maximale Nutzungsdauer der einzelnen Maßnahmen. Letztere sind im Rahmen der Taktzeitermittlung zwar nicht relevant, dienen aber zur Verdeutlichung des Potentials der angestrebten Möglichkeit zur kurzfristigen Austaktung. Wie zuvor bereits erläutert, wird deutlich, dass auch diese Maßnahmen entweder nicht kurzfristig nutzbar sind bzw. nicht dauerhaft angewendet werden können, um die Stundenkonten der Mitarbeiter nicht zu über- oder unterlasten. Bei den Kapazitätsänderungen ist jeweils die größtmögliche Kapazitätserhöhung bzw. -reduktion angegeben.

Tabelle 9: Zusätzlich vorhandene Kapazitätsanpassungsmaßnahmen im Anwendungsfall

	Kapazitätsänderungsbeitrag ΔKAP	Aktivierungszeit t_{akt}	Minimale Nutzungsdauer $t_{ND,min}$	Maximale Nutzungsdauer $t_{ND,max}$
Einheit	[%]	[d]	[d]	[d]
Veränderung der Schichtdauer	-10/+10	21	7	100*
Hinzu-/ Wegnahme eines Arbeitstages	-20/+20	21	7	40*
Veränderung der Schichtanzahl	-50/+0	60	90	-

Legende:

* Durchschnittswerte, abhängig von Stundenkonten

KAP_g : 75 h/Woche (2-Schichtbetrieb, 5-Tage Woche, Schichtdauer: 7,5h)

Zur Durchführung der Bewertung der unterschiedlich realisierbaren Werkerdichten und Taktzeiten nach dem in Abbildung 28 (S. 89) dargestellten Ablauf werden zusätzlich noch die zu Beginn der Planung aktuelle Taktzeit (6,5 Minuten) sowie die minimal und maximal realisierbaren Taktzeiten ($t_{t,min}$: 4 Minuten, $t_{t,max}$: 14 Minuten) benötigt.

⁷⁶ Es werden ausschließlich Maßnahmen betrachtet, die laut Betriebsvereinbarung umsetzbar sind. Zusätzliche Maßnahmen wie beispielsweise eine Werksschließung über mehrere Tage oder Kurzarbeit finden dementsprechend keine Berücksichtigung.

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage

Da es sich im vorliegenden Anwendungsfall um eine Brownfieldplanung bei bestehender Montagelinie handelt, werden bei der Bestimmung der Taktzeitszenarien die für den Umplanungs- und Umstellungsaufwand relevanten Bewertungskriterien (Abstand zur aktuellen Taktzeit, Abstand aktuelle Werkerdichte zur aktuellen Taktzeit) mit herangezogen und gegenüber den Kenngrößen der Greenfieldplanung priorisiert. Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse der Bewertung. Der Prämisse des möglichst geringen Anpassungsaufwands zur Umsetzung der Methodik folgend wird das fett hervorgehobene Szenario ausgewählt. Um das volle Potential des Werkzeugs der Austaktung nach Taktzeitszenarien zu verdeutlichen, sind im Anhang 9.3 zusätzlich die Bewertungsergebnisse der zuvor dargestellten Szenarien unter den Rahmenbedingungen einer Greenfieldplanung dargestellt.

Tabelle 10: Ergebnisse der Bestimmung der Taktzeitszenarien im Rahmen einer Brownfieldplanung

Rang*	Taktzeitszenario			Bewertungsparameter					
	Szenarionummer	Werkerdichte zur Basistaktzeit $w_{t,i,0}$	Basistaktzeit $t_{t,i,0}$	Brownfield		Greenfield			
				Mindestabstand zur aktuellen Taktzeit	Abstand Taktzeit mit aktueller Werkerdichte zur aktuellen Taktzeit	Gesamtbedeckung Stückzahlkorridor	Anzahl an Taktzeiten im Stückzahlkorridor	Mindestabstand zur wahrscheinlichsten Stückzahl	Anzahl an Taktzeiten im Taktzeitkorridor
[-]	[-]	[-]	[min]	[min]	[Stk/Wo]	[%]	[-]	[Stk/Wo]	[-]
1	32	2	6,5	0	0	100%	3	110	3
2	33	3	6,5	0	231	100%	3	110	3
3	34	4	6,5	0	346	100%	5	63	5
4	35	5	6,5	0	415	100%	4	29	4
5	38	2	7	0,5	49	100%	3	60	3
6	26	2	6	0,5	58	100%	2	167	3
7	27	3	6	0,5	192	100%	3	83	3
8	39	3	7	0,5	264	100%	3	60	4
9	28	4	6	0,5	317	100%	4	20	5
10	40	4	7	0,5	371	100%	5	60	5
...
126	126	6	14	7,5	585	15%	1	261	1

*Top 10 der insgesamt 126 bewerteten Taktzeitszenarien (Brownfieldplanung)

Als Ergebnis des ersten Planungsschrittes der Methode steht das Taktzeitszenario fest, auf das der Bandabschnitt nachfolgend ausgetaktet werden soll. In Tabelle

11 sind die resultierenden Taktzeiten und Werkerdichten aufgeführt, die die Eingangsgrößen für die Planung der Austaktung darstellen.

Tabelle 11: Ausgewähltes Taktzeitszenario

Laufvariable Werkerdichte- kombination i	Parameter Taktzeitszenario				Stückzahlkorridor		
	Laufvariable Taktzeitvielfache j	Werkerdichte $w_{t,j}$	Taktzeitvielfache $x_{t,j}$	Taktzeit $t_{t,i,j}$	Grundstückzahl $S_{g,t,i,j}$	Minimale Stückzahl $S_{min,t,i,j}$	Maximale Stückzahl $S_{max,t,i,j}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[min]	[Stk/Wo]	[Stk/Wo]	[Stk/Wo]
2	0	2	1	6,5	692	249	914
2	1	1	2	13	346	125	457
2	2	3	0,67	4,33	1.038	374	1.371

6.3.2 Planung der Austaktung

Vor der eigentlichen Planung der Austaktung in Workshops sind zunächst die **Planungsprämissen** festzulegen: Die Grundtaktzeit für das Basisszenario sowie die variantenabhängige Einteilung der Arbeitsinhalte. Aufbauend auf den im ersten Planungsschritt ausgewählten Taktzeitszenario (vgl. Tabelle 11) ist bei der *Bestimmung der Grundtaktzeit* eine der drei Taktzeiten auszuwählen, die für die erste Ausplanung der Austaktung herangezogen werden sollen. Den in Abschnitt 5.3.2.1 aufgestellten drei Auswahlkriterien⁷⁷ folgend wird als Grundtaktzeit

$$t_{tg} = t_{t,2,0} = 6,5 \text{ min} \quad (22)$$

bestimmt. Diese Taktzeit entspricht allen drei alternativen Kriterien. Als Planungsprämisse für die Austaktung der Grundtaktzeit ergibt sich somit eine einheitliche Werkerdichte von zwei Werkern bei der oben genannten Taktzeit von 6,5 Minuten.

Die *Klassifizierung der Arbeitsinhalte* erfolgt nach der in Abbildung 31 (S. 94) dargestellten Vorgehensweise, wobei folgende Grenzwerte für die zu unterscheidenden Kennzahlen festgelegt wurden:

- hohe Verbauquote $v_{q,TF} \geq 85\%$

⁷⁷ am nächsten zur aktuellen Taktzeit, am nächsten zur wahrscheinlichsten Stückzahl sowie mittlere Position innerhalb der möglichen Taktzeitsprünge (vgl. Abschnitt 5.3.2.1)

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage

- geringe gewichtete Zeitspreizung $\delta_{gew,TF} \leq 25\%$

Zusätzlich konnten auch eine Vielzahl an XOR-Inhalten identifiziert werden, da in diesem Bandabschnitt unterschiedlichste Bauteile montiert werden, allerdings aufgrund ähnlicher Fügeprozesse und Bauteile zusammengefasst werden können. Ein Beispiel ist die Kombination von Teilen, die zusammengefasst eine fast identische Anzahl an Nietvorgängen und somit ähnliche Vorgabezeiten aufweisen. Darüber hinausgehende zu nietende Teile müssen demgegenüber als Varianteninhalt klassifiziert werden. Insgesamt konnten über die Analyse Standard- und XOR-Arbeitsinhalte identifiziert werden, die zusammen einem Anteil von 19% der durchschnittlichen Montagezeit entsprechen.

Nach der Festlegung der Planungsprämissen erfolgt die **Basisplanung der Austaktung**, die sich auf die regelbasierte Auslegung der Montagelinie zur Grundtaktzeit t_{tg} fokussiert, um anschließend mit geringem Aufwand die anderen Taktzeiten ausplanen zu können. Hierzu wurden beim Anwender Austaktungsworkshops durchgeführt, die unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.3.3.1 genannten Rollen in einem Kreis von ca. neun Personen in vier Wochen für den betrachteten Umfang durchgeführt wurden. Zur *visuellen Unterstützung* dienen die zuvor beschriebenen variantenabhängigen Yamazumi-Diagramme, die in den Workshops mittels Papierstreifen erstellt und nachträglich in Excel dokumentiert wurden.

Die Ergebnisse der *Austaktung auf die Grundtaktzeit* sind in Abbildung 54 dargestellt. Es wird deutlich, dass durch die Klassifizierung der Arbeitsinhalte eine variantenabhängige Auftrennung möglich ist und auch an drei von sieben Stationen die Anwendung der beiden Hauptregeln H1 und H2 ausreichend war. Bei den anderen Stationen war darüber hinaus Nebenregel N1 erforderlich. Die bereits in der Grundtaktzeit hohe Werkerdichte an den Stationen 3 und 4 ist durch den hohen notwendigen Betriebsmitteleinsatz im dort stattfindenden Nietprozess zu erklären. Um die anderen Montageprozesse nicht zu behindern und gleichzeitig keine zu hohen Investitionen zu tätigen, werden daher Nietvorgänge an dieser Station zusammengefasst. Station 5 stellt darüber hinaus eine Ausnahme dar, da die einheitliche Werkerdichte nicht eingehalten werden konnte. Dies liegt in der Produktivitätssteigerung begründet, die im Rahmen des Workshops durch eine verbesserte Auslastung sowie der Anwendung weiterer Verbesserungsmethoden aus dem Bereich der Lean Production erreicht wurde. Die Reduzierung der Antrittsstärke im Vergleich zur Ausgangssituation um einen Arbeitsplatz hat zur Folge, dass die Anzahl an Werkern nicht mehr durch die einheitliche Werker-

dichte teilbar ist. Ziel weiterführender Workshops muss es sein, durch Gruppierung eines weiteren Arbeitsplatzes aus dem benachbarten Bandbereich global die einheitliche Werkerdichte zu erreichen. Zur Verdeutlichung der Folgen einer nicht einheitlichen Werkerdichte und zur transparenten Darstellung der erzielten Ergebnisse wird im Folgenden dennoch dieser eine Arbeitsplatz weiterhin berücksichtigt. Auf eine Visualisierung der Auslastung der einzelnen Arbeitsplätze wird an dieser Stelle verzichtet, um diese bei der Bewertung der Simulationsergebnisse genauer zu diskutieren.

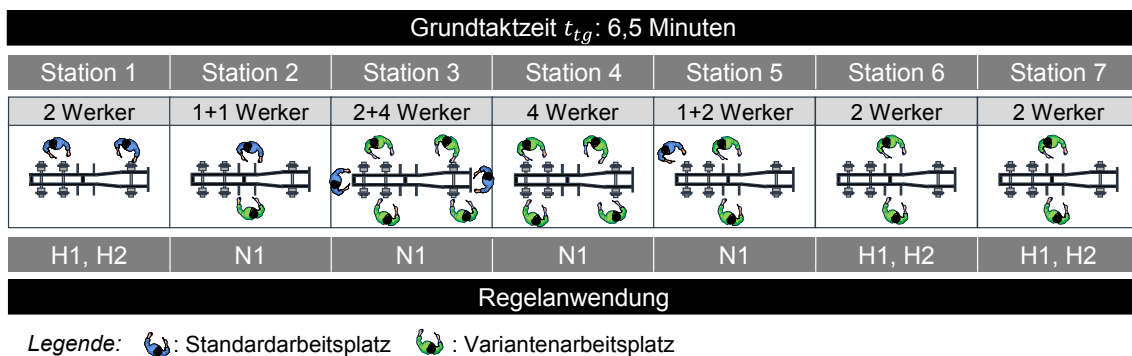
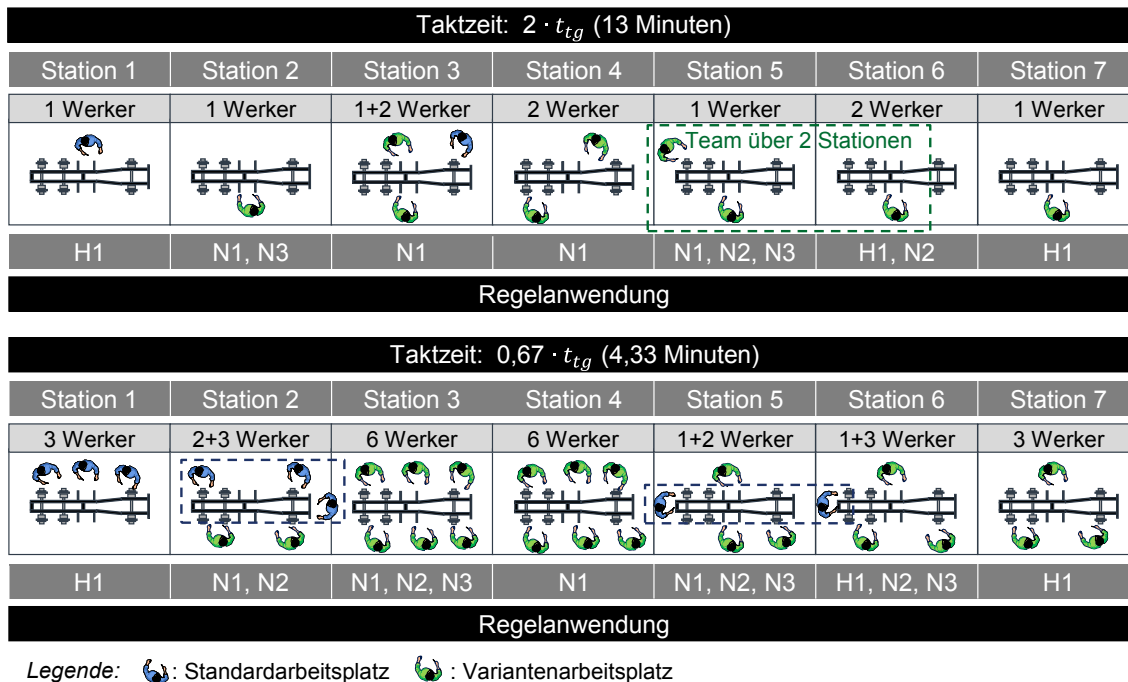


Abbildung 54: Planungsergebnisse der regelbasierten Austaktung der Grundtaktzeit (6,5 Minuten)

Nach erfolgter Basisplanung der Austaktung für die Grundtaktzeit ist im nächsten Schritt die **Feinplanung der Anpassungsbedarfe** für die beiden weiteren Taktzeiten sowie für den Umgang mit Schwankungen im Variantenmix erforderlich. Abbildung 55 zeigt die Ergebnisse der Feinplanung der Austaktung für die *Taktzeitwechsel*, die durch das ausgewählte Taktzeitszenario aufwandsarm umsetzbar sind. Bei der Taktzeit von 13 Minuten wird deutlich, dass an einem Großteil der Stationen die Anpassung der Mitarbeiteranzahl problemlos den Regeln H1 bzw. N1 folgend umsetzbar ist. Eine Ausnahme stellt Station 2 dar, da aufgrund der Nichteinhaltung der einheitlichen Werkerdichte in den unterschiedlich klassifizierten Mitarbeitergruppierungen das Zusammenlegen eines Standardarbeitsplatzes mit einem Variantenarbeitsplatz erforderlich ist (Regel N3). Analoges gilt für den Standardmitarbeiter in Station 5, der wie zuvor erläutert eine Sonderrolle einnimmt, da er nicht der einheitlichen Werkerdichte folgt. Dieser somit nur halb ausgelastete Standardarbeitsplatz wird in diesem Szenario dennoch als Variantenarbeitsplatz ausgelegt und in einem Team mit den beiden anderen Arbeitsplätzen der Stationen 5 und 6 zusammengefasst, da an diesen Stationen jeweils bei bestimmten Varianten eine Parallelmontage von zwei Mitarbeitern notwendig ist und dieser Mitarbeiter zusätzlich unterstützt.

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage



Legende: : Standardarbeitsplatz : Variantenarbeitsplatz

Abbildung 55: Ergebnisse der regelbasierten Feinplanung der Anpassungen für die beiden zusätzlichen Taktzeiten

Im 4,33-Minutentakt können ebenfalls eine Vielzahl an Stationen einfach nach den Regeln H1 bzw. N1 umgestellt werden. Aufgrund der starken Bauraumfokussierung des Standardarbeitsplatzes auf Station 5 erfolgt die Erhöhung der Mitarbeiteranzahl an Station 6 (Regel N2). Zusätzlicher Feinplanungsbedarf wird durch Station 3 generiert, die bereits im Basistakt mit einer Werkerdichte von sechs die maximal mögliche Anzahl an Arbeitsplätzen enthält. Dementsprechend erfolgt eine Umplanung der standardbehafteten Arbeitsinhalte auf die benachbarte Station 2 bzw. auch auf die Standardmitarbeiter in Station 5 und 6 (Regel N2) sowie eine Zusammenfassung der restlichen Standardinhalte auf den bislang halb ausgelasteten Variantenarbeitsplatz auf Station 2 (vgl. Abbildung 56). Durch diesen zusätzlichen Feinplanungsaufwand wurde zum einen erreicht, dass die maximale Werkerdichte an allen Stationen eingehalten wird und gleichzeitig die Anzahl an Standardarbeitsplätzen möglichst hoch gehalten wird.

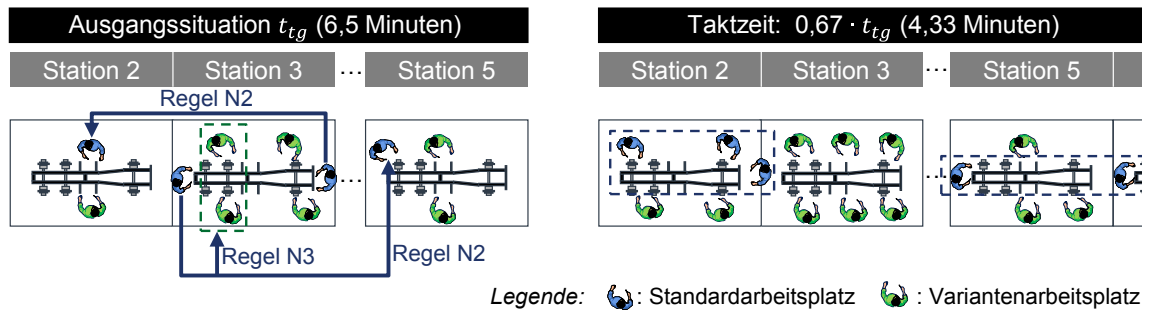


Abbildung 56: Umverteilung der Standardarbeitsplätze der Station 3 bei 4,33 Minuten Taktzeit

Neben den Taktzeitwechseln ist im Rahmen der Feinplanung auch der *Umgang mit Variantenmixschwankungen* genauer zu betrachten, worunter die Ausgestaltung der Driftmöglichkeiten sowie die Abschätzung des Springerbedarfs fallen. Tabelle 12 zeigt die potentielle Vor- bzw. Nacharbeit (VA_p bzw. NA_p) der einzelnen Stationen, die für die anschließende Simulation des Driftverhaltens der Werker herangezogen wird. Aufgrund der Angabe in Prozent sind diese Kenngrößen für alle drei Taktzeiten gültig, da sie sich auf die Kapazität pro Mitarbeiter an den einzelnen Stationen beziehen. Es wird deutlich, dass in diesem Bandbereich aufgrund einer starken Betriebsmittelabhängigkeit nur ein geringes Driftpotential besteht⁷⁸.

Tabelle 12: Driftgrenzen der Mitarbeitergruppen

	Station 1	Station 2 (VAP)	Station 2 (SAP)	Station 3 (VAP)	Station 3 (SAP)	Station 4	Station 5 (VAP)	Station 5 & 6 (SAP)	Station 6	Station 7
Potentielle Vorarbeit VA_p [%]	0%	50%	50%	8%	0%	0%	30%	0%	30%	20%
Potentielle Nacharbeit NA_p [%]	0%	0%	0%	25%	0%	25%	30%	0%	30%	20%

Legende: SAP: Standardarbeitsplatz bzw. -plätze
VAP: Variantenarbeitsplatz bzw. -plätze

Unter Einbezug dieser Driftgrenzen konnte folgender Springerbedarf aufbauend auf den betrachteten Referenzfahrzeugen und unter Anwendung der in Abbildung 39 (S. 109) dargestellten Einteilung der Varianten abgeschätzt werden:

⁷⁸ Es sei darauf hingewiesen, dass in anderen Bandabschnitten im Anwenderunternehmen zum Teil bis zu 300% Vor- bzw. Nacharbeit möglich sind, die in diesen Bereichen aufgrund der hohen Variantenvielfalt auch benötigt werden.

- 13-Minutentakt: 1 Springer
- 6,5-Minutentakt: 2 Springer
- 4,33-Minutentakt: 3 Springer

Um die Ergebnisse der Planung der Austaktung für ein umfassendes Variantenprogramm zu bestätigen, wird im folgenden Abschnitt erläutert, wie diese mittels Simulation im Rahmen der Austaktungsworkshops validiert wurden.

6.3.3 Simulation der Planungsergebnisse

Zur Validierung der Planungsergebnisse wird dem Vorgehen aus Abschnitt 5.4.3 folgend das in Abschnitt 5.4.2 vorgestellte Simulationswerkzeug PePe verwendet. Nach der Vorbereitung der Eingangsgrößen erfolgt die Durchführung der Simulationsläufe und anschließend die Interpretation der Ergebnisse. Im vorliegenden Anwendungsfall wurden hierzu im Laufe der Planung mehrere Teilaspekte einzeln simuliert, um zeitnah im Workshop entstandene Ideen zu überprüfen. Zur Übersichtlichkeit wird nur auf die Simulation der Endergebnisse der Planung eingegangen und nicht auf den iterativen Planungsprozess.

Bei der *Vorbereitung der Eingangsgrößen* ist ein Aspekt die Implementierung der Austaktungsszenarien, also der Bandkonfiguration samt der Zuordnung von Arbeitsinhalten zu Arbeitsplätzen sowie der Taktzeit. Hier sind darunter die drei im vorherigen Abschnitt vorgestellten Planungsergebnisse für die drei aufeinander aufbauenden Taktzeitsprünge zu verstehen. Da das Simulationstool PePe zum Zeitpunkt der Planung bereits operativ bei der MTB im Einsatz war, konnte auf bestehende, im ERP-System hinterlegte Arbeitspläne zurückgegriffen werden. Somit war nur ein Bruchteil der ca. 3.650 Sachnummern dieses Bandbereichs neu zu betrachten und lediglich die veränderten oder umverteilten Arbeitsinhalte in PePe anzupassen. Die zweite Eingangsgröße in die Simulation stellen unterschiedliche Fahrzeugprogramme dar. Hierzu wurde auf historische Perlenketten des vorangegangenen Jahres zurückgegriffen und diese hinsichtlich der Typen im Fahrzeugprogramm sowie hinsichtlich der durchschnittlichen Vorgabezeit untersucht (Möglichkeit 1 und 3 der Analyse, vgl. Abschnitt 5.4.3). Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse der Klassifizierung. In den durchschnittlichen Vorgabezeiten besteht kein großer Unterschied. Da reelle Perlenketten betrachtet wurden, die auch den Prozess der Reihenfolgeplanung durchlaufen sind, zeigt sich hier deren Wirkung. Da die Spreizung innerhalb der Typen und auch deren Reihenfolge eine besondere Rolle für den betrachteten Bandabschnitt spielt, ist somit v. a. die

Differenzierung nach der „Schwere“ der Fahrzeugtypen ausschlaggebend, wie in den Diagrammen und der Kennzahl VM verdeutlicht.

Die unterschiedlichen Eingangsgrößen durchlaufen anschließend die *Simulation*. Nach Durchführung der Planung mit den entstandenen drei Austaktungsszenarien sowie mit den zuvor gezeigten drei unterschiedlichen Fahrzeugprogrammen sind somit neun Simulationsläufe zur Kombination der verschiedenen Ausprägungen jeder Eingangsgröße notwendig.

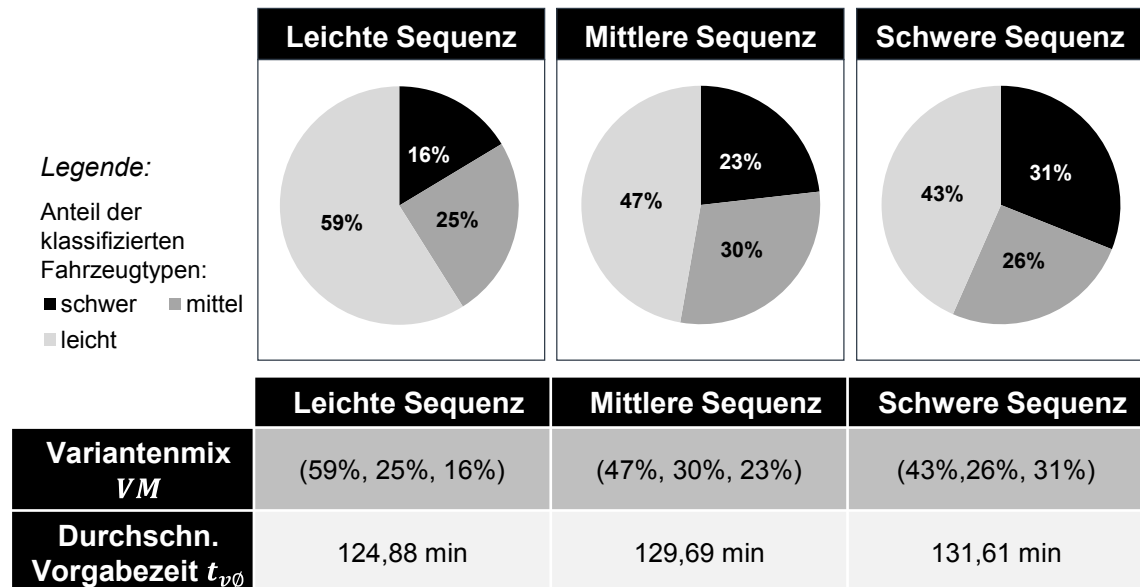


Abbildung 57: Charakteristika der ausgewählten Referenzprogramm szenarien

Die *Interpretation* der Simulationsergebnisse erfolgt zum einen über die Auswertung von Kennzahlen, worauf im nächsten Abschnitt 6.3.4 genauer eingegangen wird, und zum anderen durch die Analyse der verschiedenen Visualisierungsmöglichkeiten im Simulationswerkzeug. Abbildung 58 zeigt hierzu exemplarisch das Auslastungsdiagramm des betrachteten Bandabschnitts beim 6,5-Minutentakt für das mittlere Fahrzeugprogramm. Es wird deutlich, dass die angestrebte geringe Zeitspreizung in den Standardarbeitsplätzen erreicht wurde und Springereinsätze nur in den variantenbehafteten Arbeitsplätzen notwendig sind. Ein Überblick über die Auslastungsdiagramme aller neun Simulationsläufe sowie der Ausgangskonfiguration findet sich im Anhang 9.4.

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage

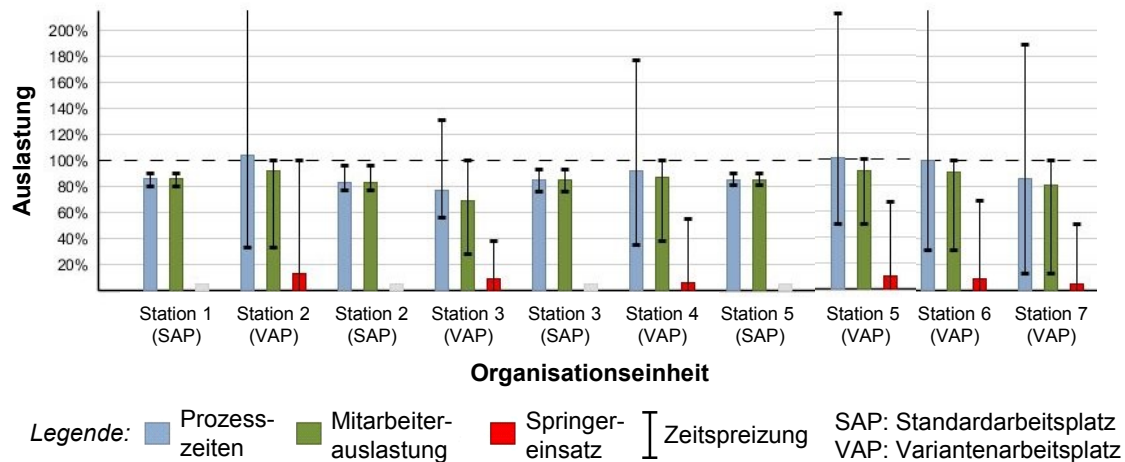


Abbildung 58: Auslastungsdiagramm des Planungsergebnisses bei 6,5-Minutentakt für das mittlere Fahrzeugprogramm

Insbesondere für die Untersuchung der variantenabhängigen Aufteilung der Arbeitsinhalte kann das Diagramm zur Visualisierung der Variantenspreizung herangezogen werden. Abbildung 59 zeigt hierzu zwei Beispiele, zum einen einer Gruppierung von Standardarbeitsplätzen (oben) und zum anderen einer Gruppe von Variantenarbeitsplätzen (unten). Während des iterativen Planungsvorgehens sind diese Auswertungen besonders hilfreich, da Kapazitätsspitzen oder geringe Auslastungen über das gesamte analysierte Programm hinweg untersucht werden können, um ggf. noch eine Anpassung der Verteilung der Arbeitsinhalte vorzunehmen. In Abbildung 59 wird deutlich, inwieweit im finalen Planungsergebnis die variantenabhängige Aufteilung umsetzbar war und dass an dem gezeigten Standardarbeitsplatz nicht nur eine geringe Zeitspreizung vorherrscht, sondern auch der Anteil an vom Standardablauf abweichenden Varianten sehr gering ist. Beim Variantenarbeitsplatz hingegen ist eine deutlich größere Zeitspreizung zu erkennen. Zusätzlich zeigt die Belegung aller Auslastungsintervalle innerhalb der Zeitspreizung, dass unterschiedlichste Varianten mit verschiedenen Kapazitätsanforderungen integriert wurden.

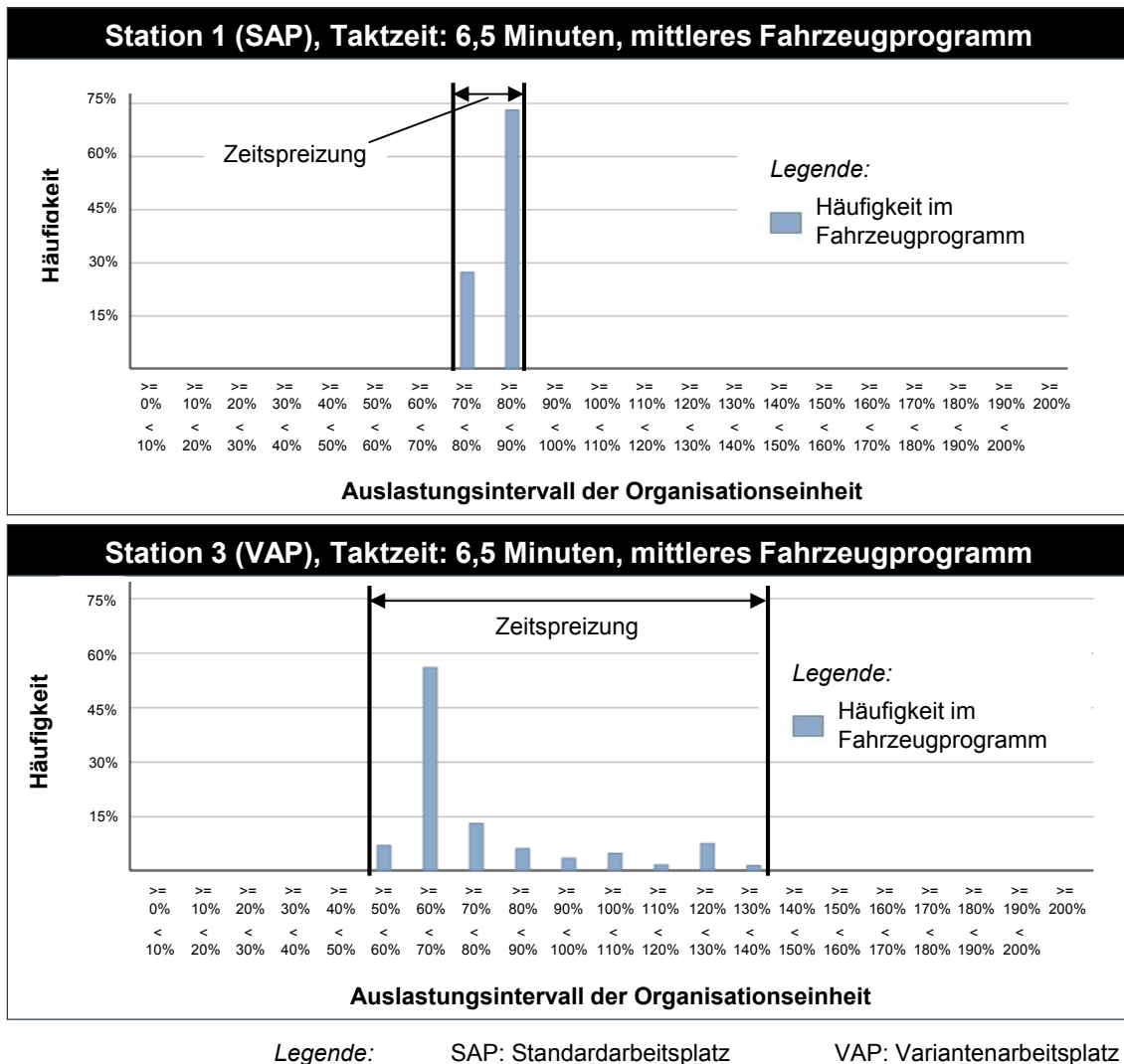


Abbildung 59: Auswertung der Variantenspreizung am Beispiel eines Standard- (oben) und eines Variantenarbeitsplatzes (unten)

6.3.4 Bewertung der Planungsergebnisse

Die Planungsergebnisse werden unter Einbezug der Simulationsergebnisse abschließend mit Hilfe des in Abschnitt 5.5.2 vorgestellten **Kennzahlensystems bewertet**. Dabei stehen die drei verschiedenen Ebenen des Kennzahlensystems im Fokus (vgl. Tabelle 8, S. 123):

- Fahrzeugprogramm
- Ausstattung
- Mitarbeiterflexibilität

Zur Bewertung der Ausstattungsergebnisse ist aus den Kennzahlen des *Fahrzeugprogramms* ausschließlich die relative und absolute Stückzahlflexibilität

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage

relevant, die in Tabelle 13 dargestellt ist. Diese Kennzahlen sind besonders für die Auswahl verschiedener Taktzeitszenarien von Bedeutung und spielten im Rahmen des dargestellten Anwendungsbeispiels eine untergeordnete Rolle, da im Zuge der Brownfieldplanung insbesondere Wert auf einen geringen Umsetzungsaufwand der Austaktung gelegt wurde. Es wird dennoch deutlich, dass durch das ausgewählte Szenario der Stückzahlbereich vollständig abgedeckt wird. Zusätzlich zeigt die Gegenüberstellung zur Ausgangssituation, in der keine kurzfristige Umstellung auf andere Taktzeiten möglich ist, den Mehrwert der Austaktung nach Taktzeitszenarien. Zum Vergleich sind im Anhang 9.3 zusätzlich die Kennzahlen des Szenarios aufgeführt, welches unter den Rahmenbedingungen einer Greenfieldplanung auszuwählen wäre.

Tabelle 13: Kennzahlen des Anwendungsbeispiels aus dem Bereich Fahrzeugprogramm

	Taktzeit $t_{t,i,j}$	Stückzahlkorridor			Kennzahlen Fahrzeugprogramm	
		Grundstückzahl $S_{gt,t,i,j}$	Minimale Stückzahl $S_{min,t,i,j}$	Maximale Stückzahl $S_{max,t,i,j}$	Relative Stückzahlflexibilität $\Delta S_{rel,t,i,j}$	Absolute Stückzahlflexibilität ΔS_{abs}
		[min]	[Stk/Wo]	[Stk/Wo]	[Stk/Wo]	[Stk/Wo]
Planungsergebnisse	6,5	692	249	914	665	1.246
	13	346	125	457	332	
	4,33	1.038	374	1.371	997	
Ausgangssituation	6,5	692	249	914	665	665

Die Kennzahlen aus dem Bereich *Austaktung* betrachten alle Aspekte, die durch die Zuordnung der Arbeitsinhalte entstehen ohne gleichzeitig bereits die Reihenfolge des Fahrzeugprogramms mit zu berücksichtigen. Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse der Kennzahlenauswertung für die drei verschiedenen Austaktungsszenarien und der drei unterschiedlichen Fahrzeugprogramme. Die angegebenen Intervalle, z. B. bei der Kennzahl $a_{\emptyset AP}$, spiegeln die Unterschiede der Ergebnisse für die verschiedenen Fahrzeugprogramme wider, die nachfolgend noch einzeln genauer betrachtet werden.

Tabelle 14: Kennzahlen des Anwendungsbeispiels aus dem Bereich Austaktung für den gesamten Bandabschnitt

		Kennzahlen Austaktung					
		Taktzeit $t_{t,i,j}$	Mitarbeiterantritt	Durchschnittliche Auslastung $\alpha_{\phi AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$	Quote einheitliche Werkerdichte q_w	Standardisierungsquote q_{st}
		[min]	[-]	[%]	[%]	[-]	[-]
Planungsergebnisse	6,5	21	85% - 89%	107% - 112%	0,86	0,29	
	13	11	83% - 88%	106% - 112%	-	0,18	
	4,33	31	90% - 95%	118% - 124%	-	0,26	
Ausgangssituation	6,5	22	85% - 90%	115% - 128%	0,73	0,09	

Es wird deutlich, dass im Vergleich zur Ausgangssituation bei gleichbleibender Taktzeit trotz Reduzierung des Mitarbeiterantritts für den gesamten Bandbereich eine nahezu identische Auslastung erreicht wurde und somit im Rahmen der Austaktung zusätzlich die Verschwendung im Montageprozess reduziert werden konnte. Zudem weisen die drei verschiedenen Taktzeiten des Planungsergebnisses auch eine sehr ähnliche Auslastung auf, womit das Ziel einer schnellen Umstellung bei nahezu gleichbleibender Wirtschaftlichkeit erreicht wurde. Die etwas erhöhte Auslastung bei der Taktzeit von 4,33 Minuten ist dadurch zu erklären, dass im Vergleich zur strikten Erhöhung der Mitarbeiteranzahl nach den Taktzeitvielfachen durch zusätzliches Umverteilen von Arbeitsinhalten ein zusätzlicher Arbeitsplatz in Station 5 eingespart wurde. Eine Analyse der Zeitspreizung ist auf Bandabschnittsebene wenig aussagekräftig. Es ist dennoch zu erkennen, dass die Zeitspreizung analog zur Auslastung verbessert werden konnte. Dadurch bestätigt sich die theoretische Überlegung, dass durch eine variantenabhängige Aufteilung der Arbeitsinhalte der Varianteneinfluss bezogen auf das gesamte Montageband sinkt. Gleichzeitig wird auch die Verbesserung in den Kennzahlen bzgl. Werkerdichte und Standardisierung deutlich, wobei in diesem Bandabschnitt bereits in der Ausgangssituation eine nahe Einhaltung der Werkerdichte erkennbar ist. Dieses war ausschlaggebend für die Wahl des Taktzeitszenarios zur Verringerung des Planungsaufwands.

Die zuvor gezeigten Ergebnisse stellen eine Durchschnittsbetrachtung über den gesamten Bandbereich dar. Tabelle 15 zeigt exemplarisch die zugrundeliegenden

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage

Kennzahlen der einzelnen Stationen bzw. Arbeitsplätze für das Austaktungsszenario der Grundtaktzeit t_{tg} von 6,5 Minuten über alle drei Fahrzeugprogramme hinweg. In dieser Betrachtungsebene ist auch die Analyse der Kennzahl Zeitspreizung zielführend, im Gegensatz zum gesamten Bandabschnitt. Für die Ausgangssituation sowie für die anderen beiden Taktzeiten sind die Kennzahlen in dieser Granularität im Anhang 9.5 (Tabelle 21 bis Tabelle 23) dargestellt.

Tabelle 15: Kennzahlen aus dem Bereich Austaktung auf Mitarbeitergruppenebene für die Grundtaktzeit von 6,5 Minuten

Taktzeit: 6,5 min		Leichtes Fahrzeug- programm		Mittleres Fahrzeug- programm		Schweres Fahrzeug- programm	
Station/ Mitarbeitergruppe	Mitarbeiterantritt	Durchschnittliche Auslastung $\alpha_{\emptyset AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$	Durchschnittliche Auslastung $\alpha_{\emptyset AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$	Durchschnittliche Auslastung $\alpha_{\emptyset AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$
	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1 (SAP)	2	86%	9%	85%	9%	85%	9%
2 (VAP)	1	101%	263%	103%	251%	113%	281%
2 (SAP)	1	81%	19%	82%	19%	83%	18%
3 (VAP)	4	75%	72%	77%	75%	84%	75%
3 (SAP)	2	85%	16%	85%	16%	85%	17%
4 (VAP)	4	88%	137%	91%	142%	89%	135%
5 (VAP)	2	94%	171%	100%	161%	98%	173%
5 (SAP)	1	86%	9%	84%	9%	85%	9%
6 (VAP)	2	93%	177%	99%	217%	95%	207%
7 (VAP)	2	72%	182%	85%	176%	87%	194%
gesamt	21	85%	107%	88%	110%	89%	112%

Legende: SAP: Standardarbeitsplatz **fett:** Anpassungsbedarf
VAP: Variantenarbeitsplatz auf Arbeitplatzebene

An den Standardstationen ist kaum eine Schwankung in der Auslastung zu erkennen und somit wurde das Ziel eines standardisierten, variantenunabhängigen Montageprozesses erreicht. Gleichzeitig unterliegen die Variantenarbeitsplätze einer deutlichen Schwankung, die im Nachgang mit den Kennzahlen der Mitarbeiterflexibilität noch genauer zu untersuchen ist. An Station 2 war es im Rahmen der Austaktung nicht möglich, eine geringe Überlastung beim leichten und mittleren Fahrzeugprogramm zu verhindern. Neben Springereinsatz kann auch der Standardmitarbeiter mit unterstützten, da er nicht vollständig ausgelastet werden konnte. Aufgrund der Vielfalt an unterschiedlichen Tätigkeiten bei den

einzelnen Varianten war es nicht möglich, ihm planungsseitig direkt einen relativ häufigen, gleichartigen Prozess zuzuordnen. Im schweren Programm ist sogar eine deutliche Überlastung erkennbar, die in diesem Fall zu einem Anpassungsbedarf führen würde. In allen anderen Fällen hat die Auftrennung der Arbeitsinhalte dazu geführt, dass keine weiteren Veränderungen aus Sicht der Austaktungskennzahlen vorzunehmen sind.

Inwieweit die zuvor getroffenen Aussagen, insbesondere für die Beherrschung des Fahrzeugprogramms an den Variantenarbeitsplätzen, im Detail zutreffen, überprüfen die Kennzahlen aus dem Bereich *Mitarbeiterflexibilität*. Tabelle 16 gibt einen zusammenfassenden Überblick für den gesamten Bandabschnitt und alle drei ausgeplanten Taktzeiten sowie für die Ausgangssituation.

Tabelle 16: Kennzahlen des Anwendungsbeispiels aus dem Bereich Mitarbeiterflexibilität für den gesamten Bandabschnitt

		Kennzahlen Mitarbeiterflexibilität						
		Taktzeit $t_{t,i,j}$	Mitarbeiterantritt	Springerantritt	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittliche Auslastung Werker $a_{\emptyset W}$	Driftquote q_D	Durchschnittliche Auslastung Springer $a_{\emptyset Sp}$
		[min]	[-]		[%]	[%]	[%]	[%]
Planungsergebnisse	6,5	21	2	4% - 6%	81% - 83%	11% - 12%	42% - 66%	
	13	11	1	2% - 3%	82% - 85%	10% - 12%	20% - 37%	
	4,33	31	4	8% - 11%	84%	12% - 13%	66% - 87%	
Ausgangssituation	6,5	22	3	8% - 9%	76% - 80%	10% - 11%	58% - 68%	

Die Auslastung der Werker liegt im Vergleich zur Ausgangssituation jeweils höher und ist für alle drei Szenarien nahezu identisch, was dem Ziel einer schnellen Taktzeitanpassung ohne großen Taktausgleich entspricht. Erreicht wurde das zudem bei tendenziell geringerer bzw. gleicher Springerquote, was für die variantenabhängige Aufteilung der Arbeitsinhalte spricht. Bei den Springern ist zum einen ersichtlich, dass der Antritt zur Grundtaktzeit von 6,5 Minuten im Vergleich zur Ausgangssituation durch die Konzentration von Varianteninhalten um einen Springer reduziert werden konnte. Zum anderen haben sich die im Rahmen der Austaktung getroffenen Abschätzungen zur Springeranzahl bei 6,5 Minuten und 13 Minuten Taktzeit bestätigt. Bei 4,33 Minuten Taktzeit werden aufgrund

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage

der Reduzierung der Antrittsstärke um 0,5 Mitarbeiter im Vergleich zum eigentlichen Verhältnis zur Grundtaktzeit vier statt der drei abgeschätzten Springer benötigt. Die durchschnittliche Springerauslastung $\alpha_{\emptyset Sp}$ ist für die Bewertung der Austaktungsergebnisse nur bedingt heranzuziehen.

Nach der globalen Betrachtung der Mitarbeiterflexibilitätskennzahlen sind in Tabelle 17 beispielhaft die Kennzahlen für die Grundtaktzeit t_{tg} von 6,5 Minuten über alle drei Fahrzeugprogramme hinweg auf Arbeitplatzebene dargestellt. Die Kennzahlen der Ausgangssituation sowie der anderen beiden Taktzeiten sind im Anhang 9.5 (Tabelle 24 bis Tabelle 26) aufgeführt.

Tabelle 17: Kennzahlen aus dem Bereich Mitarbeiterflexibilität auf Mitarbeitergruppenebene für die Grundtaktzeit von 6,5 Minuten

Taktzeit: 6,5 min			Leichtes Fahrzeugprogramm			Mittleres Fahrzeugprogramm			Schweres Fahrzeugprogramm		
Station/ Mitarbeitergruppe	Mitarbeiterantritt	Driftpotential D_p	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittliche Auslastung Werker $\alpha_{\emptyset W}$	Driftquote q_D	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittliche Auslastung Werker $\alpha_{\emptyset W}$	Driftquote q_D	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittliche Auslastung Werker $\alpha_{\emptyset W}$	Driftquote q_D
	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1 (SAP)	2	0%	0%	86%	0%	0%	85%	0%	0%	85%	0%
2 (VAP)	1	50%	10%	92%	10%	12%	91%	11%	20%	93%	10%
2 (SAP)	1	50%	0%	81%	0%	0%	82%	0%	0%	83%	0%
3 (VAP)	4	132%	7%	68%	31%	9%	68%	30%	10%	74%	32%
3 (SAP)	2	0%	0%	85%	0%	0%	85%	0%	0%	85%	0%
4 (VAP)	4	100%	4%	83%	6%	5%	86%	8%	6%	84%	7%
5 (VAP)	2	120%	8%	86%	17%	9%	90%	19%	10%	88%	15%
5 (SAP)	1	0%	0%	86%	0%	0%	84%	0%	0%	85%	0%
6 (VAP)	2	120%	5%	88%	8%	9%	91%	12%	6%	89%	9%
7 (VAP)	2	80%	2%	70%	7%	4%	81%	10%	8%	79%	10%
gesamt	21	-	4%	81%	11%	5%	83%	12%	6%	83%	11%

Legende: SAP: Standardarbeitsplatz **fett:** Anpassungsbedarf auf Arbeitplatzebene
VAP: Variantenarbeitsplatz

Das Ziel der Fokussierung von Springereinsätzen in den Variantenarbeitsplätzen wurde erreicht. Zusätzlich wird deutlich, dass an dem leicht bis stärker überlasteten Variantenarbeitsplatz an Station 2⁷⁹ besonders hoher Springerbedarf vorliegt bei gleichzeitig vergleichsweise geringer Driftquote. Auch dieser Zusammen-

⁷⁹ Wie zuvor erläutert, unterstützt hier der Standardmitarbeiter, der ebenfalls an Station 2 tätig ist, wobei ihm aufgrund der Variantenvielfalt keine direkten Tätigkeiten zugeordnet wurden.

hang ist einleuchtend, da bei einer hohen durchschnittlichen Grundauslastung kaum Driftmöglichkeiten ausgenutzt werden können. Ein Gegenbeispiel hierzu ist der Variantenarbeitsplatz in Station 3, der trotz geringer Auslastung aufgrund der hohen vorliegenden Zeitspreizung eine hohe Driftquote bei gleichzeitig dennoch benötigtem Springereinsatz aufweist.

Zusammenfassend konnte eine gute Auslastung der Werker bei punktuellm Einsatz von Drift und Springern erreicht werden. Mit Hilfe der Simulation und Kennzahlen konnten die Austaktungsergebnisse für das gesamte Variantenprogramm und bei verschiedener Schwere des Fahrzeugprogramms bestätigt werden. Gleichzeitig haben die Ausführungen zur Kennzahlenauswertung aufgezeigt, dass eine Betrachtung einzelner Kennzahlen wenig zielführend ist und eine Interpretation nur im Zusammenspiel der verschiedenen Ebenen des Kennzahlensystems sowie der darin enthaltenen spezifischen Kennzahlen möglich ist.

Dass bei den vorliegenden Referenzperlenketten nur an sehr wenigen Stationen stärkere Über- bzw. Unterauslastungen erkennbar waren, verdeutlicht zum einen den Erfolg der Anwendung der vorliegenden Methodik im Vergleich zur Ausgangssituation. Gleichzeitig stellen diese in den jeweiligen Tabellen fett hervorgehobenen Kennzahlen der einzelnen Arbeitsplätze den Handlungsbedarf für eine kurzfristige Austaktung dar, falls diese Kennzahlen im Zuge der **Überwachung der Montagelinie** auftreten würden. Dementsprechend wird im vorliegenden Anwendungsbeispiel auf diesen Aspekt der Methodik nicht mehr im Detail eingegangen, da hierfür wieder analog zu den letzten Abschnitten 6.3.3 und 6.3.4 eine Simulation und Kennzahlenauswertung bei den jeweils vorliegenden Perlenketten durchzuführen ist und anschließend über- bzw. unterausgelastete Stationen genauer betrachtet und ggf. angepasst werden müssen.

6.4 Kritische Bewertung der Methodik

6.4.1 Überblick

Unter Einbezug des zuvor diskutierten Anwendungsbeispiels erfolgt abschließend eine kritische Bewertung der entwickelten Methodik. Hierzu wird zunächst geprüft, inwieweit die in Abschnitt 4.2 an sie gestellten Anforderungen erfüllt wurden (Abschnitt 6.4.2). Anschließend werden Aufwand und Nutzen der Methodik gegenübergestellt.

6.4.2 Erfüllung der gestellten Anforderungen

Abbildung 60 stellt zusammenfassend den Erfüllungsgrad der spezifischen und allgemeingültigen Anforderungen dar, die in Abschnitt 4.2 an die entwickelte Methodik gestellt wurden.

		Entwickelte Methodik
<i>Legende:</i>		
	○ nicht erfüllt / betrachtet	
	◐ teilweise erfüllt / betrachtet	
	● nahezu vollständig erfüllt / betrachtet	
Spezifische Anforderungen		
Berücksichtigung von Variantenmix- und Stückzahlschwankungen		●
Erhöhung der Anpassungsgeschwindigkeit		●
Berücksichtigung anderer kurzfristiger Maßnahmen		●
Beherrschung der Planungskomplexität		●
Dynamische Bewertung von Austaktungsszenarien		●
Erkennen von Anpassungsbedarfs		●
Allgemeingültige Anforderungen		
Präskriptiver Charakter		◐
Praxistauglichkeit		●
Transparenz		◐
Übertragbarkeit		●

Abbildung 60: Erfüllungsgrad der an die entwickelte Methodik gestellten Anforderungen

Durch die gleichzeitige Integration der Austaktung nach Taktzeitszenarien und der variantenabhängigen Austaktung in das Regelwerk der Methodik können sowohl *Variantenmix- als auch Stückzahlschwankungen zusammen berücksichtigt* werden. Insbesondere die Nebenregeln führen dazu, dass die zunächst gegenläufigen Zielsetzungen beider Konzepte gemeinsam größtmöglichen Nutzen stiften können. Gleichzeitig fördern diese beiden Aspekte in hohem Maße die *Erhöhung der Anpassungsgeschwindigkeit* zur Reaktion auf kurzfristige Nachfrageschwankungen, da zum einen diskrete Taktzeitsprünge vorgegeben werden, die eine schnelle Veränderung der Taktzeit und somit des Produktionsausstoßes ermöglichen. Zum anderen wird durch die variantenbehaftete Austaktung der

Lösungsraum für eine Reaktion auf Variantenmixschwankungen verkleinert, was ebenfalls zu einer erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit führt. Diese schnelle Reaktionsfähigkeit zeigt sich auch in der Einordnung der Anpassungsmöglichkeiten in den zeitlichen Horizont der Programmplanung (vgl. Abbildung 48, S. 131).

Zudem erfolgt durch die Fokussierung der Zeitspreizung in den Variantearbeitsplätzen ebenfalls eine Konzentration der zusätzlichen kurzfristigen Maßnahmen zur Steigerung der Mitarbeiterflexibilität, was ebenfalls die Reaktionsfähigkeit erhöht. Somit werden in der entwickelten Methodik *andere kurzfristige Maßnahmen mit berücksichtigt*, zum einen im Regelwerk der Austaktung und zum anderen durch die Anwendung des Simulationswerkzeuges, dessen Hauptfunktionalität in der Abbildung von Drift- und Springerverhalten in Abhängigkeit der vorliegenden Fahrzeugperlenkette liegt. Darüber hinaus werden zusätzliche Maßnahmen zur kurzfristigen Anpassung der Montagekapazität, wie z. B. eine Veränderung der Schichtdauer, im Rahmen der Bewertung und Anpassung der Taktzeitszenarien mit einbezogen.

Zur *Beherrschung der Planungskomplexität* wurden einerseits im Rahmen der Ausplanung der Austaktung einfache Regeln und Werkzeuge vorgegeben, die der Anwendung von Probiervverfahren einen Handlungsrahmen geben. Zum anderen wird der Komplexität insbesondere durch die Einbindung des Simulationstools begegnet, indem die Vielzahl an Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Varianten, deren Reihenfolge sowie dem Potential zum Umgang von Variantenspitzen durch Drift- und Springereinsatz abgebildet und mit Hilfe von Auswertungsmöglichkeiten und Visualisierungen greifbar gemacht wird. Gleichzeitig erfolgt durch diese Funktionalität des Simulationswerkzeuges eine *dynamische Bewertung der ausgeplanten Austaktungsszenarien*, da nicht nur Referenzfahrzeuge und statische Durchschnittswerte analysiert werden, sondern das dynamische Verhalten in Abhängigkeit der Varianten und Fahrzeugreihenfolge abgebildet wird. Das entwickelte Kennzahlensystem dient dabei insbesondere auch zur Interpretation und Bewertung der Ergebnisse der dynamischen Simulation. Durch die Implementierung des Simulationsmodells im Rahmen der Planung der Austaktung kann im laufenden Betrieb der *Anpassungsbedarf leicht erkannt werden*, da sowohl das Modell als auch die zur Bewertung der Planungsergebnisse herangezogenen Kennzahlen gleichzeitig für ein kontinuierliches Monitoring des aktuellen Nachfrageszenarios verwendet werden können.

Die Forderung nach einem *präskriptiven Charakter* der Methodik ist Großteils erfüllt, da durch die klare, schrittweise Vorgehensweise in den Phasen Vorberei-

tung, Planung, Simulation und Bewertung sowie durch die Vorgaben und Handlungsempfehlungen innerhalb dieser Schritte ein klarer Rahmen für die Anwendung geschaffen wurde. Dennoch sind dem Anwender in mehreren Bereichen der Methodik, sei es die Auswahl des geeigneten Taktzeitszenarios oder die detaillierte Austaktung unter Einsatz der entwickelten Regeln, Freiheiten gegeben, um eine Anwendung in der Praxis zu ermöglichen und um die Vielzahl an implizit zu berücksichtigenden Restriktionen, die nicht alle informationstechnisch abbildbar sind, mit einbeziehen zu können. Diese Freiheiten sind somit dem Anspruch der *Praxistauglichkeit der Methodik* geschuldet, die als wichtige Anforderung zu berücksichtigen war. Deren Erfüllung zeigt sich nicht nur durch die zuvor genannten Aspekte, sondern konnte insbesondere durch die bewusste Fokussierung auf Probiervverfahren der Austaktung und deren Weiterentwicklung sowie den Verzicht auf automatisierte Lösungsverfahren erreicht werden. Der mehrfache Einsatz aller Teilbereiche der Methodik bei der MTB im zuvor beschriebenen Umfeld sowie im konkret in dieser Arbeit gezeigten Planungsbeispiel zeigt zusätzlich die Anwendbarkeit in der Praxis.

Auch eine *transparente Entscheidungsfindung* konnte sowohl bei der Anwendung der Methodik in Workshops durch die variantenabhängigen Yamazumi-Diagramme und eingängigen Austaktungsregeln als auch in der Validierung unterschiedlicher Planungsalternativen durch das Simulationswerkzeug zum großen Teil erreicht werden. Lediglich die bewusste Integration von unterschiedlichen Experten samt deren implizitem Wissen in den Planungsprozess führt dazu, dass die Ergebnisse der Austaktung nicht vollständig in ihrer Gesamtheit für Außenstehende transparent sind. Diese Einschränkung ist allerdings aufgrund der dadurch erreichbaren Akzeptanz bei den Anwendern sowie der hohen Umsetzbarkeit der Planungsergebnisse zu tolerieren.

Die geforderte *Übertragbarkeit* der erarbeiteten Konzepte, Werkzeuge und Methoden auf getaktete Montagelinien in der Nutzfahrzeugmontage ist aufgrund der allgemeingültigen Beschreibung der Methodik gegeben und hat sich auch bereits durch eine mehrmalige Anwendung in einem Unternehmen des Nutzfahrzeugbaus gezeigt. Eine Übertragung auf andere Branchen mit ähnlichen Rahmenbedingungen konnte in Teilaspekten auch schon im Rahmen von Studienarbeiten, die in enger Zusammenarbeit durch den Autor während der Entwicklung der Gesamtmethodik betreut wurden, gezeigt werden (vgl. Abschnitt 9.1). Aufbauend auf den Kerninhalten der Methodik sowie der Erkenntnisse aus dem Anwendungsbeispiel zählen in diesem Zusammenhang folgende Rahmenbedingungen

als ausschlaggebend für eine vollumfängliche Übertragung auf getaktete Montagelinien anderen Branchen:

- Ausreichende Größe des Montageobjekts zur Umsetzung verschiedener Werkerdichten an einem Objekt für die Taktzeitsprünge und zur Vermeidung gegenseitiger Behinderung bei Drift- und Springereinsatz
- Hohe Variantenvielfalt in einem Montageband, um den zusätzlichen Planungsaufwand für die variantenabhängige Austaktung sowie die Berücksichtigung des flexiblen Mitarbeiterereinsatzes zu rechtfertigen
- Starke, kurzfristige Nachfrageschwankungen, um den zusätzlichen Planungsaufwand für die Taktzeitszenarien und die variantenabhängige Austaktung zu rechtfertigen
- Vorhandensein von Arbeitsplänen o. ä. für die unterschiedlichen Varianten in einer ausreichenden Granularität, um den Aufwand sowohl für die Vorbereitung der Austaktungswshops als auch insbesondere für die Implementierung der Vorgabezeiten der einzelnen Varianten im Simulationswerkzeug einzugrenzen

Derartige Rahmenbedingungen können beispielsweise in der getakteten Montage von Schienenfahrzeugen, Landmaschinen oder ggf. auch Werkzeugmaschinen gefunden werden. Neben diesen Aspekten spielt insbesondere auch die Aufwand-Nutzen-Relation eine entscheidende Rolle für die Übertrag- und Anwendbarkeit des Austaktungsvorgehens, wie im folgenden Abschnitt genauer betrachtet.

6.4.3 Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen

Die Abschätzung der Aufwand-Nutzen-Relation der vorliegenden Methodik ist stark abhängig von den spezifischen Randbedingungen, die im jeweiligen Unternehmen vorliegen. Darunter fallen u. a. die Anzahl an zu betrachtenden Arbeitsplätzen, die Vielzahl an Varianten sowie die Komplexität des Produktes und damit verbunden die Freiheitsgrade und Restriktionen bei der Austaktung. Dies erschwert eine allgemeingültige Aussage. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Anwendung in unterschiedlichen Teilbereichen des Beispielunternehmens lässt sich dennoch das Verhältnis der Aufwände im Vergleich zum Nutzen abschätzen, welcher unter Einhaltung der im vorherigen Abschnitt genannten Rahmenbedingungen zum Übertrag auch in andere Branchen zu erwarten ist.

Der Aufwand der Methodik besteht zum einen in der Aufbereitung der benötigten Daten sowie in der Durchführung der Workshops unter Einbezug von Exper-

6 Exemplarische Anwendung in der Nutzfahrzeugmontage

ten. Beim Beispielunternehmen haben sich für Bandabschnitte in der Größenordnung des Anwendungsfalls vierwöchige Workshops mit neun Teilnehmern (Rollen vgl. Abschnitt 5.3.3.1) sowie eine insgesamt einwöchige Vor- und Nachbereitung durch die Montageplanung bewährt. Davon sind den zusätzlichen Planungsinhalten der entwickelten Methodik ca. sieben Arbeitstage im Workshop und zwei Arbeitstage in der Vorbereitung zuzuordnen. Die restlichen Aufwände sind den klassischen Inhalten von Austaktungsworkshops geschuldet. Insgesamt ist in diesem Fall ein Vorbereitungsaufwand von 10 Personentagen (PT) und unter Einbezug aller Teilnehmer ein Kapazitätsaufwand von 180 PT für den Workshop notwendig, wovon zusammen 67 PT dem zusätzlichen Arbeitsaufwand der vorgestellten Methodik zuzuschreiben sind. Somit hat sich durch Anwendung der Vorgehensweise der Planungsaufwand um ca. 55% erhöht. Diese Angabe dient zur Orientierung für eine Aufwandsabschätzung unter anderen Rahmenbedingungen, um unter Zuhilfenahme des aktuellen Planungsaufwands zur Umtaktung bei Taktzeitwechseln und unter Einbezug der Häufigkeit von Taktzeitwechseln den wirtschaftlichen Einsatz der Methodik bewerten zu können.

Zum anderen sind für die Nutzung der Simulationssoftware Lizenzgebühren aufzuwenden, die ebenfalls u. a. vom Umfang des Einsatzes abhängen (Anzahl Arbeitsplätze, Anzahl Montagelinien etc.). Somit ist die Angabe eines pauschalen Kostenaufwands nicht möglich. Als Anhaltspunkt können Bewertungen im Beispielunternehmen herangezogen werden, die für die alleinige Nutzung der Software zur kurzfristigen Personaleinsatzplanung eine Amortisationszeit von deutlich unter einem Jahr ausweisen. Dabei sind die zusätzlichen Potentiale durch die Anwendung in Workshops, die durch die entwickelte Methodik zusätzlich entstehen, noch nicht mit berücksichtigt.

Diesem Aufwand steht im Vergleich zu heutigen Austaktungsmethoden ein hoher Nutzen gegenüber, der allerdings ebenfalls nicht vollumfänglich quantifizierbar ist. Deutlich wird das zum Beispiel an den Produktivitätssteigerungen im Anwendungsbeispiel. So konnten im Vergleich zur Ausgangssituation in der Grundtaktzeit bei gleichbleibender Auslastung ein Werker und ein Springer eingespart werden, was einer Produktivitätsverbesserung von ca. 8% entspricht. In anderen Bandbereichen konnten ähnliche Werte zwischen 12% bis zu 17% erzielt werden. Zu welchem Anteil die vorliegende Methodik zu diesen Ergebnissen beigetragen hat und wie groß der Einfluss der zusätzlich angewandten Lean-Methoden ist, ist schwer quantifizierbar. Die durch die Methodik erreichte globale Reduzierung der Zeitspreizung sowie die Fokussierung des Varianteneinflusses leisten hierbei einen erheblichen Beitrag, da das Vorhalten von Sicherheits-

kapazitäten vermieden werden kann, wie im Anwendungsbeispiel deutlich wurde.

Im Fokus der Austaktungsmethodik steht allerdings nicht die statische Effizienzverbesserung, sondern eine schnelle, flexible Reaktionsfähigkeit auf dynamische Nachfrageveränderungen. Hier zeigt sich auch der Hauptnutzen in den Taktzeit-szenarien, da Taktzeitveränderungen bei im Idealfall identischer Produktivität mit sehr geringem Umplanungsaufwand umzusetzen sind. Beim Einsatz bislang gängiger Methoden ist dagegen eine komplette Neuaustaktung mit den zuvor beschriebenen Planungsaufwänden notwendig, weshalb sich der zusätzliche Planungsaufwand der Methodik bereits bei der ersten Taktzeitumstellung amortisiert. Beim zuvor gezeigten Aufwand der Planung im Vergleich zur Vorgehensweise des aktuellen Stands der Forschung hat sich gezeigt, dass der erhöhte erstmalige Aufwand bei 55% liegt, wobei Taktzeitwechsel bereits mit geplant wurden. Somit amortisiert sich der erhöhte Erstaufwand bereits bei der ersten Taktzeitumstellung, da für eine Taktzeitanpassung kein weiterer Planungsaufwand erforderlich ist. Auch der Nutzen der variantenabhängigen Austaktung bzgl. der Erhöhung der Anpassungsgeschwindigkeit kann analog bewertet werden. Wie die verschiedenen Fahrzeugprogramme im Anwendungsbeispiel gezeigt haben, führt die Fokussierung der Varianteninhalte dazu, dass weniger Stationen von Veränderungen betroffen sind (vgl. fett hervorgehobene Kennzahlen in den jeweiligen Tabellen auf Arbeitsplatzebene) und z. T. selbst in variantenbehafteten Stationen die Schwankungen der einzelnen Varianten stärker ausgleichen. Somit verkürzt sich die Anpassungsdauer noch zusätzlich zur bereits durch die erhöhte Anzahl an Standardstationen gewonnenen Zeitspanne.

Darüber hinaus birgt die Methodik weitere qualitative Nutzenpotentiale. Durch die vorgeplante Taktzeitumstellung, auf die die Werker durch Jobrotation im laufenden Betrieb auch bereits angelehrt werden können, verringern sich deutlich die langwierigen Anlaufschwierigkeiten und Taktausgleichverluste, die i. d. R. mit Taktzeitanpassungen verbunden sind (ROSCHE 2007). Dadurch steigert sich nicht nur die Produktivität, sondern auch die Montagequalität. Die variantenabhängige Austaktung fördert die Qualität zusätzlich, da in den variantenunbehafteten Arbeitsplätzen eine hohe Standardisierung und Nachvollziehbarkeit der Prozesse vorherrschen. Diese Arbeitsplätze eignen sich somit zugleich auch besonders für die Integration neuer oder geringer qualifizierter Mitarbeiter. Durch das verwendete Simulationsmodell, welches im laufenden Betrieb weiter verwendet werden kann, steigt zusätzlich auch die Transparenz in der komplexen getakteten Montage variantenreicher Produkte.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Produzierende Unternehmen stehen weiterhin vor der Herausforderung der absoluten Kundenorientierung. Die Folgen sind eine vermehrte Komplexität in der Montage durch eine steigende Anzahl an Varianten sowie eine stärkere Ausrichtung auf die Nachfrage und somit der Bedarf zur kurzfristigen Reaktion auf Veränderungen am Markt. Getaktete, variantenreiche Montagelinien, die in der Automobilindustrie Stand der Technik sind, gelten allerdings als besonders unflexibel bezüglich Anpassungen in der Stückzahl oder im Variantenmix. Dies ist hauptsächlich in der hohen Komplexität zur Austaktung dieser Linien und dem damit verbundenen hohen Umtaktungsaufwand begründet. Die Austaktung bezeichnet den Prozess zur Festlegung der Taktzeit der Montagelinie sowie zur Zuordnung von Arbeitsinhalten zu den einzelnen Stationen.

Daher wurde in der vorliegenden Arbeit eine Methodik entwickelt, um eine schnellere Austaktung variantenreicher Montagelinien zu ermöglichen. Aufbauend auf den Grundlagen zu getakteten Montagelinien und der Definition des Variantenbegriffes aus dem Blickwinkel der Montage wurde hierfür zunächst der Planungsprozess variantenreicher Montagelinien genauer beleuchtet und dargestellt, dass neben der Personaleinsatz- und der Reihenfolgeplanung die Austaktung Potentiale für eine kurzfristige Reaktion aufweist. Bislang kann dieses aber in der Praxis kaum genutzt werden, da die in der Forschung entwickelten automatisierten Lösungsalgorithmen nicht alle notwendigen Rahmenbedingungen abdecken können. Den in der Industrie verbreiteten Probiervorgängen wiederum mangelt es oftmals an einer ausreichenden Güte der Planungsergebnisse, insbesondere da standardisierte Regelwerke fehlen und die hohe Planungskomplexität nicht beherrscht werden kann. Dementsprechend wird die Austaktung aktuell nicht als kurzfristiges Reaktionswerkzeug verwendet. Auch die Bewertung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Forschung bestätigt diese Notwendigkeit.

Demzufolge wurden als Hauptanforderungen an die vorliegende Methodik die Beherrschung der Planungskomplexität sowie die Erhöhung der Anpassungsgeschwindigkeit formuliert. Hierzu steht insbesondere der gleichzeitige Einbezug der Auswirkungen von Stückzahl- und Variantenmixschwankungen im Fokus. Um dies zu erreichen, besteht die entwickelte Austaktungsmethodik aus drei Kerninhalten. Zur Berücksichtigung von Stückzahlschwankungen wird erstens

eine Austaktung nach Taktzeitszenarien angestrebt, die vorgeplante Taktzeitsprünge ausschließlich durch eine einheitliche Anpassung der Werkeranzahl an den einzelnen Stationen, der sog. Werkerdichte, erreicht. Um zweitens schnell auf Veränderungen im Variantenmix zu reagieren, erfolgt die Austaktung variantenabhängig, indem variantenbehaftete und -unbehaftete Arbeitsinhalte getrennt den Arbeitsplätzen zugeordnet werden. Als drittes wird zur Beherrschung der Planungskomplexität das Verhalten der Werker im Umgang mit den unterschiedlichen Varianten in einem Simulationswerkzeug abgebildet. Damit kann nicht nur der dynamische Einfluss der unterschiedlichen Varianten mit in die Planung integriert werden, sondern es erfolgt auch eine Überprüfung der Güte der Austaktung unter Einbezug aller Varianten des Produktionsprogramms.

Diese drei Kerninhalte wurden anschließend in ein zusammenhängendes Planungsvorgehen mit vier Schritten integriert. Schritt 1 bestimmt die Taktzeitszenarien, auf die die Montagelinie ausgetaktet werden soll. Er legt damit die später realisierbaren Taktzeitsprünge fest und gibt dafür die entsprechenden realisierbaren Werkerdichten sowie die resultierenden Taktzeiten vor. Diese dienen als Eingangsgrößen für die Austaktung der Montagelinie, die im zweiten Schritt erfolgt. Unter Einbezug von Experten und unter Einhaltung von entwickelten Regeln wird die Linie im Rahmen von Workshops ausgetaktet und dabei die Umsetzung der zuvor erläuterten variantenabhängigen Austaktung nach Taktzeitszenarien angestrebt. Das Regelwerk betrachtet dabei sowohl die Milderung von Gegensätzen in beiden Konzepten als auch den Umgang mit Regelabweichungen in der Feinplanung. Im Schritt 3 werden die erarbeiteten Austaktungsergebnisse mit Hilfe des Tools PePe simuliert. Dies ermöglicht eine Visualisierung der Austaktung für unterschiedliche Programmszenarien sowie eine Analyse des Mitarbeiterverhaltens zur Beherrschung des Programms. Der letzte Schritt bewertet die Planungsergebnisse unter Einbezug der Resultate der Simulation. Dazu wurde ein Kennzahlensystem entwickelt, welches die unterschiedlichen Ebenen des Planungsvorgehens beinhaltet und im Nachgang zusammen mit dem erstellten Simulationsmodell zur Überwachung der Montagelinie verwendet werden kann. Somit kann frühzeitig der Bedarf einer Adaption erkannt und kurzfristig mit Hilfe der neu geschaffenen Möglichkeiten zur zielgerichteten Austaktung reagiert werden.

Abschließend wurde die entwickelte Planungsmethodik am Beispiel einer Nutzfahrzeugmontage in der Praxis angewendet und darauf aufbauend die Erfüllung der an die Methodik gestellten Anforderungen sowie deren Aufwand-Nutzen-Verhältnis kritisch bewertet.

7.2 Ausblick

Die vorgestellte Methodik wurde unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen der Nutzfahrzeugmontage entwickelt und kann aufgrund ähnlicher Gegebenheiten auch in verwandten Branchen wie in der Montage von Schienenfahrzeugen, Landmaschinen und ggf. auch Werkzeugmaschinen angewendet werden (vgl. Abschnitt 6.4.2). Zusätzlicher Forschungsbedarf ist notwendig, um eine Adaption der Ansätze auch auf andere Branchen mit kleineren oder größeren Montageobjekten (z. B. die PKW- oder die Flugzeugindustrie) zu erreichen und in diesen Zweigen die Potentiale einer kurzfristigen Reaktion auf Nachfrageschwankungen durch Austaktung zu erreichen.

Darüber hinaus ist diese Reaktionsfähigkeit auch auf die unterstützenden Bereiche der Montage im Unternehmen auszuweiten, insbesondere in die Logistik, aber auch in die Reihenfolgeplanung. Durch die diskret vorgeplanten Taktzeiten der Methodik kann sich bereits jetzt die Logistik auf diese verschiedenen Szenarien einstellen und eine Belieferung sicherstellen. Allerdings ist dies mit gängigen Methoden bislang nur über eine vollständige Neuplanung für alle Taktzeiten möglich. Auch für die Reihenfolgeplanung ergeben sich Potentiale aus der vorgestellten Methodik. Durch die Konzentration von variantenbehafteten Arbeitsinhalten ergeben sich neue Anforderungen an das *Car-Sequencing*, da ggf. nicht mehr Restriktionen für einzelne Varianten notwendig sind, sondern vielmehr für eine Kombination aus Varianten, die sich an bestimmten Stationen gegenseitig negativ beeinflussen.

Neben den Aspekten innerhalb eines Montagewerks erscheint auch eine Betrachtung von gesamten Produktionsnetzwerken sinnvoll. Bislang beschränkt sich die Methodik auf die Betrachtung einer einzelnen Montagelinie. Darauf aufbauend ist der Einbezug der neu geschaffenen Möglichkeiten der stückzahl- und variantenspezifischen Austaktung in die Planung von unternehmensübergreifenden Supply-Chains, aber auch in die Auslastung unterschiedlicher Werke innerhalb eines Unternehmens mit ähnlichem Produktportfolio erstrebenswert.

Auch in der Methodik selbst ergeben sich noch weitere Entwicklungspotentiale. Die Bestimmung der Taktzeiten erfolgt bislang nach den in Abschnitt 5.2.3.2 vorgestellten Kriterien, welche je nach Anwendungsfall unterschiedlich priorisierbar sind, wie im Rahmen der Anwendung an den Beispielen zur Brown- und Greenfieldplanung deutlich wurde. Insgesamt können bei der Festlegung der Kapazität der Montage durch die Kombination der Parameter Taktzeit, Schichtdauer und Schichtanzahl eine Vielzahl an unterschiedlichen Strategien berücksichtig

sichtigt werden, wie bereits PRÖPSTER ET AL. (2013) andeuten. Beispiele hierfür sind eine Kapazitätsaufbauvermeidung, die versucht mit bestehendem Personal einen möglichst hohen Produktionsausstoß zu generieren ohne zusätzliche Schichten aufzubauen, oder eine Humanisierung der Arbeitsinhalte, indem bei konstanten Arbeitszeiten durch vergleichsweise hohe Taktzeiten versucht wird, breite Arbeitsinhalte anzubieten und Monotonie zu vermeiden. Der Einfluss dieser unterschiedlichen Strategien auf die globalen Unternehmensziele und deren Vertiefung als erweiterter Planungsschritt für die Bestimmung der Taktzeiten stellt somit weiteres Forschungspotential dar.

Insbesondere stationsbedingte Restriktionen stellen eine große Einschränkung bei der Austaktung von Montagelinien dar. Die Wissenschaft spricht bei einer proaktiven Anpassungsfähigkeit von Produktionssystemen über vorweggedachte Grenzen hinweg von „*Wandlungsfähigkeit*“ (HERNÁNDEZ MORALES 2003, NYHUIS ET AL. 2008). In diesem Sinne können Untersuchungen zur Befähigung von Montagelinien zu einer wandlungsfähigen Austaktbarkeit weitere Potentiale heben, indem die Betriebs- und Hilfsmittel derart ausgelegt werden, dass die für die Austaktung besonders relevanten Aspekte der Wandlungsfähigkeit von Montagelinien weiterentwickelt werden. In diesem Zusammenhang spielen vor allem die Mobilität und Skalierbarkeit von Betriebsmitteln eine wichtige Rolle. Derart wandlungsfähig austaktbare Montagelinien können somit ein weiteres Handlungsfeld hin zu einer Dynamisierung der Austaktung darstellen (REINHART & PRÖPSTER 2012).

8 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ABELE ET AL. 2006

Abele, E.; Elzenheimer, J.; Liebecke, T.; Meyer, T.: Globalization and Decentralization of Manufacturing. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Berlin: Springer 2006, S. 3-13. ISBN: 978-3-540-29391-0.

ALDERS 2006

Alders, K.: Komplexitäts- und Variantenmanagement der AUDI AG. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006, S. 221-237. ISBN: 3540255060.

ALTEMEIER 2009

Altemeier, S.: Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie unter expliziter Berücksichtigung des Unterstützereinsatzes und unterschiedlicher Planungszeiträume. Diss. Universität Paderborn (2009).

ALTEMEIER ET AL. 2010

Altemeier, S.; Helmdach, M.; Koberstein, A.; Dangelmaier, W.: Reconfiguration of assembly lines under the influence of high product variety in the automotive industry - a decision support system. International Journal of Production Research 48 (2010) 21, S. 6235-6256.

AMEN 2006

Amen, M.: Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds. European Journal of Operational Research 168 (2006) 3, S. 747-770.

ARMBRUSTER ET AL. 2007

Armbruster, D.; Gel, E. S.; Murakami, J.: Bucket brigades with worker learning. European Journal of Operational Research 176 (2007) 1, S. 264-274.

AUER & SIHN 2010

Auer, S.; Sihn, W.: Optimale Nutzung der Personalressourcen in der variantenreichen Serienfertigung. WINGbusiness 43 (2010) 4, S. 6-10.

8 Literaturverzeichnis

BADER 1986

Bader, A.: Personelle Flexibilität in manuellen Montagesystemen. Diss. Technische Universität Berlin (1986).

BALAKRISHNAN & VANDERBECK 1999

Balakrishnan, A.; Vanderbeck, F.: A Tactical Planning Model for Mixed-Model Electronics Assembly Operations. *Operations Research* 47 (1999) 3, S. 395-409.

BARTHOLDI & EISENSTEIN 1996

Bartholdi, J. J.; Eisenstein, D. D.: A production line that balances itself. *Operations Research* 44 (1996) 1, S. 21-34.

BARTHOLDI ET AL. 2006

Bartholdi, J. J.; Eisenstein, D. D.; Lim, Y. F.: Bucket brigades on in-tree assembly networks. *European Journal of Operational Research* (2006) 168, S. 870-879.

BAUDIN 2002

Baudin, M.: Lean assembly. The nuts and bolts of making assembly operations flow. New York: Productivity Press 2002. ISBN: 1-56327-263-6.

BAYBARS 1986

Baybars, I.: A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science* 32 (1986) 8, S. 909-932.

BECKER & SCHOLL 2006

Becker, C.; Scholl, A.: A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168 (2006) 3, S. 694-715.

BECKER 2007

Becker, C.: Abstimmung flexibler Endmontagefließbänder in der Automobilindustrie. Diss. Friedrich-Schiller-Universität Jena. Norderstedt: Books on Demand 2007. ISBN: 9783837012439.

BERKHOLZ 2008

Berkholz, D.: Einleitung: Wandlungsfähige Produktionssysteme - der Zukunft einen Schritt voraus. In: Nyhuis, P. et al. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme - Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2008, S. 13-18. ISBN: 978-3-93902-696-9.

BICK 1992

Bick, W.: Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter besonderer Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades. Diss. Technische Universität München (1991). Berlin: Springer 1992. ISBN: 9783540553779. (IWB Forschungsberichte 46).

BLEY ET AL. 2004

Bley, H.; Reinhart, G.; Seliger, G.; Bernardi, M.; Korne, T.: Appropriate Human Involvement in Assembly and Disassembly. *Annals of the CIRP* 53 (2004) 2, S. 487-510.

BOCK 2000

Bock, S.: Modelle und verteilte Algorithmen zur Planung getakteter Fließlinien. Ansätze zur Unterstützung eines effizienten Mass Customization. Diss. Universität Paderborn (1999). Wiesbaden: Gabler 2000. ISBN: 3824472279. (Gabler Edition Wissenschaft. Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre).

BOGUSCHEWSKI ET AL. 1990

Boguschewski, A.; Gehring, H.; Köstermann, K.: Montagelinien in der Pkw-Montage abstimmen. *Arbeitsvorbereitung (AV)* 27 (1990) 4, S. 130-133.

BOKRANZ & LANDAU 2006

Bokranz, R.; Landau, K.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. *MTM-Handbuch*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2006. ISBN: 9783791021331.

BOYSEN 2005

Boysen, N.: Variantenfließfertigung. Diss. Universität Hamburg (2005). Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. 2005. ISBN: 3-8350-0058-6.

BOYSEN ET AL. 2006

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung: Planungshierarchie und Hierarchische Planung. *Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft* (2006) 22.

BOYSEN ET AL. 2007

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research* 183 (2007) 2, S. 674-693.

BOYSEN ET AL. 2008

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics* 111 (2008) 2, S. 509-528.

BOYSEN ET AL. 2009

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research* 192 (2009) 2, S. 349-373.

BULLINGER 1986

Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Systematische Montageplanung. München: Hanser 1986. ISBN: 3446146067.

8 Literaturverzeichnis

BULLINGER 1995

Bullinger, H.-J.: Arbeitsgestaltung. Personalorientierte Gestaltung marktgerechter Arbeitssysteme. Stuttgart: Teubner 1995. ISBN: 9783519063698. (Technologiemanagement).

DAENZER & HABERFELLNER 2002

Daenzer, W. F.; Habermellner, R.: Systems engineering. Methodik und Praxis. Zürich: Verl. Industrielle Organisation 2002. ISBN: 978-3857439988.

DECKER 1993

Decker, M.: Variantenfließfertigung. Heidelberg: Physica-Verl. 1993. ISBN: 3-7908-0688-9. (Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre 7).

DEUSE ET AL. 2011

Deuse, J.; Bohnen, F.; Konrad, B.: Renaissance der Gruppentechnologie. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 5, S. 337-341.

DEUTSCHE BANK RESEARCH 2012

Deutsche Bank Research (Hrsg.): Nutzfahrzeuge - Marktumfeld schwierig - Energieeffizienz wird wichtiger. 03.08.2012.

<http://www.vda.de/de/publikationen/publikationen_downloads/detail.php?id=1096&PHPSESSID=hml2cvajvn9hd2kqfb7riuaqt0> - 06.06.2014.

DIN 199-1

DIN 199-1: Technische Produktdokumentation - CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten; Teil 1: Begriffe: März 2002.

DIN 6789, Teil 2

DIN 6789, Teil 2: Dokumentationssystematik: Aufbau technischer Produktdokumentationen. Berlin: Beuth 1990.

DIN 69901-5

DIN 69901-5: Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe. Berlin: Beuth 2009.

DOMBROWSKI & MEDO 2006

Dombrowski, U.; Medo, M.: Varianten im Takt - Gift für die Produktivität? ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) 12, S. 715-718.

DOMSCHKE ET AL. 1997

Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. Berlin: Springer 1997. ISBN: 9783540635604. (Springer-Lehrbuch).

EFTHYMIIOU ET AL. 2012

Efthymiou, K.; Pagoropoulos, A.; Papakostas, N.; Mourtzis, D.; Chryssolouris,

G.: Manufacturing Systems Complexity Review: Challenges and Outlook. *Procedia CIRP* 3 (2012), S. 644-649.

EGBERS 2013

Egbers, J.: Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses. Diss. Technische Universität München (2013).

EGBERS ET AL. 2012

Egbers, J.; Glonegger, M.; Magenheimer, K.; Meis, J.-F.; Pause, J.; Pröpster, M.; Reinhart, G.: Mensch und Produktionstechnik. *wt Werkstattstechnik online* 102 (2012) 9, S. 615-621.

ELMARAGHY ET AL. 2013

ElMaraghy, H. A.; ElMaraghy, W. H.: Variety, Complexity and Value Creation. In: Zaeh, M. F. (Hrsg.): *Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability*. München, 6. - 9. Oktober 2013. Heidelberg: Springer-Verlag 2013, S. 1-7. ISBN: 9783319020532.

ELMER 2012

Elmer, K.: Der einfachste Weg ist auch der beste Weg: Lean Production bei Eissmann - mehr als nur ein Schlagwort. 7. Kongress Automotive Lean Production. Leipzig, 07.11.2012.

ENGELHORN ET AL. 2005

Engelhorn, R.; Springer, R.: Stabile Prozesse durch flexible Standardisierung - Einführung eines Produktionssystems bei einem Nutzfahrzeughersteller. *VDI-Z* 147 (2005) 1/2, S. 28-31.

EVERSHEIM & ABELE 2003

Eversheim, W.; Abele, I.: Simulationsgestützte Personaleinsatzplanung in der Pkw-Endmontage. In: Bayer, J. et al. (Hrsg.): *Simulation in der Automobilproduktion*. Berlin: Springer 2003, S. 60-70. ISBN: 9783540441922.

EVERSHEIM 1992

Eversheim, W.: Flexible Produktionssysteme. In: Frese, E. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Organisation*. Stuttgart: C.E. Poeschel Verlag 1992, S. 2058-2066. ISBN: 3-7910-8027-X.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Produktionstechnik und -verfahren. In: Kern, W. et al. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag 1996, S. 1534-1544. ISBN: 9783791080444.

EVERSHEIM ET AL. 1981

Eversheim, W.; Witte, K.-W.; Peffekoven, K.-H.: Montage richtig planen Methoden und Hilfsmittel zur rationellen Gestaltung der Montage in Unternehmen mit Einzel- und Serienfertigung. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure 1981. ISBN: 3181445029.

FALKENAUER 2005

Falkenauer, E.: Line Balancing in the Real World. In: Bouras, A. et al. (Hrsg.): Product lifecycle management. Geneve: Inderscience Enterprises 2005, S. 360-370. ISBN: 9780907776192.

FASSE 2012

Fasse, M.: MAN im Sog der Euro-Krise, Nachfrageeinbruch zwingt den Lastwagenhersteller zu Produktionskürzungen. Handelsblatt, Düsseldorf. Ausgabe vom 01.08.2012.

GANS 2008

Gans, J. E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage. Diss. Universität Paderborn (2008).

GANS ET AL. 2011

Gans, J. E.; Lanza, G.; Müller, R.; Peters, S.; Schoen, L.: Prognose des Driftverhaltens getakteter Montagelinien. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 3, S. 162-166.

GÖRKE 1978

Görke, M.: Rechnerunterstütztes Verfahren zur Leistungsabstimmung von Mehrmodell-Montagesystemen. Diss. Universität Stuttgart (1978). Mainz: Krausskopf 1978. ISBN: 3783001552. (IPA Forschung und Praxis).

GOTTSCHALK 2006A

Gottschalk, B.: Wachstum und Chancen der internationalen Nutzfahrzeugindustrie. Vortrag Presseworkshop VDA zur 61. IAA Nutzfahrzeuge. 14.07.2006. <http://www.vda.de/de/publikationen/publikationen_downloads/detail.php?id=407> Zuletzt geprüft am: 06.06.2014.

GOTTSCHALK 2006B

Gottschalk, S. F.: Dedicated flexibility. Komplexitätsoptimale Gestaltung manueller Serienmontage. Diss. RWTH Aachen (2006).

GOTTSCHALK 2007

Gottschalk, L. L.: Flexibilitätsprofile. Analyse und Konfiguration von Strategien zur Kapazitätsanpassung in der industriellen Produktion. Diss. ETH Zürich

(2005). Zürich: vdf Hochschulverlag 2007. ISBN: 978-3-7281-3135-5. (vdf Wirtschaft).

GROBE-HEITMEYER & WIENDAHL 2004

Große-Heitmeyer, V.; Wiendahl, H.-P.: Einführung. In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Variantenbeherrschung in der Montage. Berlin: Springer 2004, S. 3-17. ISBN: 3540140425.

GRUNDIG 2009

Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. München: Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-41411-2.

HALUBEK 2012

Halubek, P.: Simulationsbasierte Planungsunterstützung für Variantenfließfertigungen. Diss. TU Braunschweig (2012).

HECHL 1995

Hechl, C.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte. Diss. Technische Universität München (1995). Berlin: Springer 1995. ISBN: 9783540603252. (Forschungsberichte iwB, Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München 92).

HEIKE ET AL. 2001

Heike, G.; Ramulu, M.; Sorenson, E.; Shanahan, P.; Moinzadeh, K.: Mixed model assembly alternatives for low-volume manufacturing. *International Journal of Production Economics* 72 (2001), S. 103-120.

HERNÁNDEZ MORALES 2003

Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Diss. Universität Hannover (2002). Düsseldorf: VDI-Verl. 2003. ISBN: 3183149168. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft 149).

HIROTANI ET AL. 2006

Hirotsani, D.; Myreshka; Morikawa, K.; Takahashi, K.: Analysis and design of self-balancing production line. *Computers & Industrial Engineering* 50 (2006) 4, S. 488-502.

HU 2013

Hu, S. J.: Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization. *Procedia CIRP* 7 (2013), S. 3-8.

HU ET AL. 2011

Hu, S. ; Ko, J.; Weyand, L.; ElMaraghy, H. A.; Lien, T. K.; Koren, Y.; Bley, H.; Chryssolouris, G.; Nasr, N.; Shpitalni, M.: Assembly system design and opera-

8 Literaturverzeichnis

tions for product variety. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 (2011) 2, S. 715-733.

HÜTTMEIR ET AL. 2009

Hüttmeir, A.; Treville, S. de; van Ackere, A.; Monnier, L.; Prenninger, J.: Trading off between heijunka and just-in-sequence. International Journal of Production Economics 118 (2009) 2, S. 501-507.

IFA 2006

Institut für Automobilwirtschaft (IFA) (Hrsg.): Die europäische Nutzfahrzeugindustrie im Zeichen der Globalisierung. Geislingen, 2006.

JANDER 2012A

Jander, H.: Verringerte Zeitspreizung in der Automobilmontage durch angepasste Produktgestaltung. Fachtagung Ergonomie: Faktor Mensch in der Automobil-Produktion. Stuttgart, 04.06.2012.

JANDER 2012B

Jander, H.: Entwicklung einer Methode zur produktbasierten Reduzierung der Zeitspreizung in der Automobilmontage. Diss. Technische Universität Chemnitz (2012). Göttingen: Cuvillier 2012. ISBN: 978-3-95404-161-9. (Audi Dissertationsreihe 64).

KISTNER & STEVEN 2001

Kistner, K.-P.; Steven, M.: Produktionsplanung. Heidelberg: Physica-Verl. 2001. ISBN: 9783790814262. (Physica-Lehrbuch).

KLUG 2010

Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-05292-7. (VDI-Buch).

KOETHER 1986

Koether, R.: Verfahren zur Verringerung von Modell-Mix-Verlusten in Fließmontagen. Diss. Universität Stuttgart (1986). Berlin: Springer 1986. ISBN: 3540164995. (IPA-IAO Forschung und Praxis 93).

KOHN & ÖZTÜRK 2012

Kohn, W.; Öztürk, R.: Mathematik für Ökonomen. Ökonomische Anwendungen der linearen Algebra und Analysis mit Scilab. Berlin: Springer Gabler 2012. ISBN: 978-3-642-28574-5. (Springer-Lehrbuch).

KOTANI ET AL. 2004

Kotani, S.; Ito, T.; Ohno, K.: Sequencing problem for a mixed-model assembly

line in the Toyota production system. *International Journal of Production Research* 42 (2004) 23, S. 4955-4974.

KRATZSCH 2000

Kratzsch, S.: *Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen*. Diss. TU Braunschweig (1999). Essen: Vulkan-Verl. 2000. ISBN: 3-8027-8654-8. (Schriftenreihe des IWF).

KREBS 2012

Krebs, P.: *Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten*. Diss. Technische Universität München (2011). München: Herbert Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4156-7. (Forschungsberichte IWB 255).

KROPIK 2009

Kropik, M.: *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-88990-8. (VDI-Buch).

KRÜGER 2004

Krüger, A.: *Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme*. Diss. Technische Universität München (2003). München: Utz 2004. ISBN: 3-8316-0371-5. (Forschungsberichte IWB 186).

LANZA & PETERS 2012

Lanza, G.; Peters, S.: *Integrated capacity planning over highly volatile horizons*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012) 1, S. 395-398.

LEE & VAIRAKTARAKIS 1997

Lee, C.-Y.; Vairaktarakis, G. L.: *Workforce planning in mixed model assembly systems*. *Operations Research* 45 (1997) 4, S. 553-567.

LIKER 2007

Liker, J. K.: *Der Toyota-Weg. 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns*. München: FinanzBuch-Verl. 2007. ISBN: 9783898791885.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 9783642014222. (VDI-Buch).

LÖDDING 2008

Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-76859-3. (VDI).

8 Literaturverzeichnis

LÖFFLER ET AL. 2011

Löffler, C.; Westkämper, E.; Unger, K.: Änderungsdynamik und Varianz im Automobilbau. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 3, S. 99-104.

LOTTER 1992

Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. Düsseldorf: VDI-Verl. 1992. ISBN: 3184011682.

LOTTER 2005A

Lotter, B.: Die Primär-Sekundär-Analyse. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin: Springer 2005, S. 59-93. ISBN: 3-540-21413-5.

LOTTER 2005B

Lotter, B.: Manuelle Montage von Großgeräten. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin: Springer 2005, S. 173-192. ISBN: 3-540-21413-5.

LUTZ 1974

Lutz, L.: Abtakte von Montagelinien. Diss. Universität Stuttgart (1972). Mainz: Krausskopf 1974. ISBN: 3-7830-0083-1. (Buchreihe Produktionstechnik heute 8).

MAKRIDAKIS ET AL. 1980

Makridakis, S.; Reschke, H.; Wheelwright, S. C.: Prognosetechniken für Manager. Wiesbaden: Gabler 1980. ISBN: 3-409-96081-3. (Gabler-Praxis).

MAN 2008

MAN Nutzfahrzeuge Gruppe (Hrsg.): Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik. Basiswissen Lkw und Bus. Bonn: Kirschbaum 2008. ISBN: 978-3781217270.

MAN 2013

MAN SE (Hrsg.): Q3 MAN Gruppe: Starker Auftragseingang bei Commercial Vehicles durch Vorzieheffekte in Europa, Konzernzwischenbericht zum 3. Quartal 2013. München, 2013.

MÄRZ & LANGSDORFF 2001

März, L.; Langsdorff, P. v.: Flexibilität und Marktorientierung in der Montage. In: Westkämper, E. et al. (Hrsg.): Montageplanung - effizient und marktgerecht. Berlin: Springer 2001, S. 3-10. ISBN: 3-540-66647-8.

MÄRZ ET AL. 2011A

März, L.; Winterer, T.; Mayrhofer, W.; Sihm, W.: Integrierte Programm- und Personaleinsatzplanung sequenzierter Produktionslinien. In: März, L. et al.

(Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin: Springer 2011, S. 133-150. ISBN: 978-3-642-14535-3.

MÄRZ ET AL. 2011B

März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-14535-3. (VDI-Buch).

MÄRZ ET AL. 2012A

März, L.; Mayrhofer, W.; Sihm, W.: Beyond human tetris: simulation-based optimization of personnel assignment planning in sequenced commercial vehicle assembly. In: Hu, S. J. (Hrsg.): Technologies and Systems for Assembly Quality, Productivity and Customization. Proceedings of the 4th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems 2012, S. 175-178. ISBN: 978-0-615-64022-8.

MÄRZ ET AL. 2012B

März, L.; Pröpster, M.; Röser, S.: Simulationsgestützte Bewertung getakteter Linien. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 3, S. 145-151.

MAYRHOFER ET AL. 2011

Mayrhofer, W.; März, L.; Sihm, W.: Planning assistance for pearl chain forecasts and personnel assignment planning of sequenced assembly lines. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 (2011) 1, S. 481-484.

MAYRHOFER ET AL. 2013

Mayrhofer, W.; März, L.; Sihm, W.: Simulation-based optimization of personnel assignment planning in sequenced commercial vehicle assembly: A software tool for iterative improvement. Journal of Manufacturing Systems 32 (2013) 3, S. 423-428.

MEDO 2010

Medo, M.: Kontinuierliche Planung der Fließfertigung von Varianten. Diss. TU Braunschweig (2010). Braunschweig: Shaker 2010. ISBN: 978-3-8322-9546-2.

MILBERG & MÖLLER 2008

Milberg, J.; Möller, N.: Valuation of changeable production systems. Production Engineering 2 (2008) 4, S. 417-424.

MILBERG & REINHART 1996

Milberg, J.; Reinhart, G.: Produktionssystemplanung. In: Eversheim, W. (Hrsg.): Betriebshütte. Berlin: Springer 1996, S. 10-1 - 10-126. ISBN: 3-540-59360-8.

8 Literaturverzeichnis

MILTENBURG 2002

Miltenburg, J.: Balancing and Scheduling Mixed-Model U-Shaped Production Lines. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 14 (2002) 2, S. 119-151.

MIRALLES ET AL. 2008

Miralles, C.; García-Sabater, J. P.; Andrés, C.; Cardós, M.: Branch and bound procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application to Sheltered Work centres for Disabled. *Discrete Applied Mathematics* 156 (2008) 3, S. 352-367.

MOLLEMEIER 1997

Mollemeier, A.: Integrierte Steuerung getakteter Variantenfließlinien. Diss. Universität Paderborn (1996). Paderborn: Dt. Univ.-Verlag 1997. ISBN: 3-8244-6514-0. (Gabler Edition Wissenschaft).

MONDEN 1998

Monden, Y.: Toyota production system. An integrated approach to just-in-time. Norcross, Ga: Engineering & Management Press 1998. ISBN: 041283930X.

MOREIRA ET AL. 2012

Moreira, M. C.; Costa, A. M.; Ritt, M.; Chaves, A. A.: Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Journal of Heuristics* 18 (2012) 3, S. 505-524.

NYHUIS ET AL. 2008

Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. Prof. Dr.-Ing. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme - Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2008. ISBN: 978-3-93902-696-9.

OJHA ET AL. 2013

Ojha, D.; White, R. E.; Rogers, P. P.: Managing demand variability using requisite variety for improved workflow and operational performance: the role of manufacturing flexibility. *International Journal of Production Research* 51 (2013) 10, S. 2915-2934.

OTTO & SCHOLL 2011

Otto, A.; Scholl, A.: Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 212 (2011) 2, S. 277-286.

PETERHÄNSEL 2011

Peterhänsel, P.: Moderne Montagetechnologien in der LKW-Montage. 23. Deutscher Montagekongress. München, 09.06.2011.

PETERSEN 2005

Petersen, T.: Organisationsformen der Montage. Theoretische Grundlagen, Organisationsprinzipien und Gestaltungsansatz. Diss. Universität Rostock (2005). Aachen: Shaker 2005. ISBN: 3832242082. (Schriftenreihe des Instituts für Produktionswirtschaft der Universität Rostock).

PRASCH 2010

Prasch, M.: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage. Diss. Technische Universität München (2010). München: Utz 2010. ISBN: 3831640335. (Forschungsberichte IWB 243).

PRÖPSTER & REINHART 2013

Pröpster, M.; Reinhart, G.: Dynamic Reaction to Fluctuations in Demand through Line Balancing in Commercial Vehicle Manufacturing. In: Zaeh, M. F. (Hrsg.): Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability. München, 6. - 9. Oktober 2013. Heidelberg: Springer-Verlag 2013, S. 177-182. ISBN: 9783319020532.

PRÖPSTER ET AL. 2013

Pröpster, M.; Grundstein, S.; Reinhart, G.: Taktzeitanpassung bei Nachfrageschwankungen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 3, S. 128-132.

PRÖPSTER ET AL. 2014

Pröpster, M.; März, L.; Reinhart, G.; Intra, C.: Validation of Line Balancing by Simulation of Workforce Flexibility. 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME 2014). Capri, 24.07.2014.

RALLY & HÄMMERLE 2010

Rally, P.; Hämmerle, M.: Kapazitätssteuerung in der Montage bei volatilen Märkten. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 9, S. 670-674.

REFA 1991

REFA: Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Steuerung. München: Hanser 1991. ISBN: 9783446163508. (Teil 2).

REFA 1992

REFA: Methodenlehre des Arbeitsstudiums. Teil 2: Datenermittlung. München: Hanser 1992. ISBN: 3446142355.

REFA 1993

REFA: Methodenlehre der Betriebsorganisation. München: Hanser 1993. ISBN: 3-446-17523-7.

8 Literaturverzeichnis

REINHART & PRÖPSTER 2012

Reinhart, G.; Pröpster, M.: Handlungsfelder der dynamischen Austaktung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 6, S. 404-408.

REINHART & SCHELLMANN 2012

Reinhart, G.; Schellmann, H.: A method to determine customer-specific volume flexibility in a supply network. Production Engineering 6 (2012) 1, S. 69-78.

REINHART & SCHNEIDER 1996

Reinhart, G.; Schneider, B.: Montage. In: Kern, W. et al. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag 1996, S. 1236-1248. ISBN: 9783791080444.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Glonegger, M.; Egbers, J.; Schilp, J.; Göritz, A.; Weikamp, J.: Taktzeitadaptation unter Berücksichtigung der zirkadianen Rhythmik. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 9, S. 595-599.

REKIEK & DELCHAMBRE 2006

Rekiek, B.; Delchambre, A.: Assembly line design. The balancing of mixed-model hybrid assembly lines with genetic algorithms. London: Springer 2006. ISBN: 978-1-84628-114-3. (Springer series in advanced manufacturing).

RICHTER 2005

Richter, R.: Gestaltung der Montageorganisation. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin: Springer 2005, S. 95-125. ISBN: 3-540-21413-5.

RÖHRIG 2002

Röhrig, M.: Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionsendstufen. Düsseldorf: VDI-Verl. 2002. ISBN: 3-183-62202-5. (Fortschritt-Berichte / VDI Fertigungstechnik 622).

ROPOHL 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe 2009. ISBN: 978-3-86644-374-7.

ROSCHER 2007

Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Diss. Universität Stuttgart (2007).

ROSE & MÄRZ 2011

Rose, O.; März, L.: Simulation. In: März, L. et al. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin: Springer 2011, S. 13-19. ISBN: 978-3-642-14535-3.

SALVESON 1955

Salveson, M. E.: The assembly line balancing problem. The Journal of Industrial Engineering 6 (1955) 3, S. 18-25.

SCHELLMANN 2012

Schellmann, H.: Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz. Diss. Technische Universität München (2012). München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4189-5. (Forschungsberichte IWB 260).

SCHOLL 1999

Scholl, A.: Balancing and sequencing of assembly lines. Heidelberg, , New York: Physica-Verl. 1999. ISBN: 3-7908-1180-7.

SCHOLL ET AL. 2008

Scholl, A.; Fliedner, M.; Boysen, N.: ABSALOM: balancing assembly lines with assignment restrictions. Jena research papers in business and economics (2008) 2.

SCHOLZE-STUBENRECHT 2013

Scholze-Stubenrecht, W. (Hrsg.): Duden. Die deutsche Rechtschreibung. Das umfassende Standardwerk auf der Grundlage der aktuellen amtlichen Regeln. Mannheim: Dudenverl. 2013. ISBN: 3411040165. (Der Duden in zwölf Bänden).

SCHUBERT 2005

Schubert, O.: Das MAN-Nutzfahrzeuge Produktionssystem. In: Dombrowski, U. (Hrsg.): Produktionstechnik im Wandel. Aachen: Shaker 2005, S. 107-122. ISBN: 3832245391.

SCHUH & SCHMIDT 2006

Schuh, G.; Schmidt, C.: Prozesse. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Berlin: Springer 2006, S. 108-194. ISBN: 354040306x.

SCHUH ET AL. 2011

Schuh, G.; Arnoscht, J.; Bohl, A.; Kupke, D.; Nußbaum, C.; Quick, J.; Vorspel-Rüter, M.: Assessment of the scale-scope dilemma in production systems: an integrative approach. Production Engineering 5 (2011) 4, S. 341-350.

SCHULTZ ET AL. 1995

Schultz, J.; Weigelt, M.; Mertens, P.: Verfahren für die rechnergestützte Produktionsfeinplanung - ein Überblick. Wirtschaftsinformatik 37 (1995) 6, S. 594-608.

SHELL 2010

Shell Deutschland Oil GmbH (Hrsg.): Shell LKW-Studie - Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Hamburg, 2010.

8 Literaturverzeichnis

SIEGWART 1992

Siegwart, H.: Kennzahlen für die Unternehmensführung. Bern: Haupt 1992. ISBN: 3-258-04647-6.

SPUR & HELWIG 1986

Spur, G.; Helwig, H.-J.: Einführung in die Montagetechnik. In: Spur, G. et al. (Hrsg.): Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser 1986, S. 591-606. ISBN: 9783446125360.

STAEHLE 1973

Staehe, W. H.: Kennzahlensysteme als Instrumente der Unternehmensführung. Wirtschaftswissenschaftliches Studium: WiSt, Zeitschrift für Studium und Forschung 2 (1973) 5, S. 222-228.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2010

Statistisches Bundesamt: Nutzfahrzeuge im Aufschwung - Export steigt um 26%. Pressemitteilung Nr. 337. Wiesbaden, 22.09.2010.

<https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2010/09/PD10_337_45212.html> Zuletzt geprüft am: 17.07.2014.

STATKEVICH 2012

Statkevich, K.: Entwicklung einer Vorgehensmethodik zur Umsetzung der Belieferung nach Perlenkette in der Automobilindustrie. Diss. Technische Universität Dortmund (2011). Göttingen: Cuvillier 2012. ISBN: 978-3-95404-009-4. (Audi-Dissertationsreihe 55).

STERNATZ 2010

Sternatz, J.: Automatische Taktung ohne Erstellung eines Vorranggraphen. MTM-Anwenderkonferenz 2010. Heilbronn, 16.04.2010.

SWIST 2014

Swist, M.: Taktverlustprävention in der integrierten Produkt- und Prozessplanung. Diss. RWTH Aachen (2014). Aachen: Apprimus Verlag 2014. ISBN: 978-3-86359-227-1.

SYSKA 2006

Syska, A.: Produktionsmanagement. Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute. Wiesbaden: Gabler 2006. ISBN: 3-8349-0235-7.

THEUER 2013

Theuer, H.: Dealing with Seasonalities - An Observation of Different Branches in a Seasonal Environment. In: Zaeh, M. F. (Hrsg.): Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability. München, 6. - 9. Oktober 2013. Heidelberg: Springer-Verlag 2013, S. 407-412. ISBN: 9783319020532.

THOMOPOULOS 1967

Thomopoulos, N. T.: Line Balancing-Sequencing for Mixed-Model Assembly. *Management Science* 14 (1967) 2, S. B-59 - B-75.

TRACHT & FUNKE 2011

Tracht, K.; Funke, L.: Auftragsorientierte Schichtplanung in der Montage. *wt Werkstattstechnik online* 101 (2011) 9, S. 591-594.

VDI 2815: Blatt 1

VDI 2815: Blatt 1: Begriffe der PPS. Berlin: Beuth Mai 1978.

VDI 3633

VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Berlin: Beuth März 2000.

VÖLKER ET AL. 2010

Völker, M.; Junker, F.; Schmidt, T.; Carl, S.; Schneider, H.: Organisation der Montage variantenreicher Maschinen und Anlagen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) 1-2, S. 84-90.

VOLLING ET AL. 2013

Volling, T.; Matzke, A.; Grunewald, M.; Spengler, T. S.: Planning of capacities and orders in build-to-order automobile production: A review. *European Journal of Operational Research* 224 (2013) 2, S. 240-260.

WEBER & WEGGE 2004

Weber, H.; Wegge, M.: Potenziale und Restriktionen von Produktionskonzepten für die Nutzfahrzeugproduktion im Vergleich zur PKW-Produktion. In: Institut für angewandte Arbeitswissenschaften e.V. (Hrsg.): *Ganzheitliche Produktionssysteme*. Köln: Wirtschaftsverl. Bachem 2004, S. 144-156. ISBN: 3-89172-447-0.

WEIß 2000

Weiß, C.: *Methodengestützte Planung und Analyse von Endmontagelinien in der Automobilindustrie*. Diss. Universität Karlsruhe (2000).

WENZEL 2001

Wenzel, R.: Produktion. In: Wenzel, R. et al. (Hrsg.): *Industriebetriebslehre*. München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl. 2001, S. 153-175. ISBN: 3-446-21343-0.

WESTKÄMPER & ROSCHER 2005

Westkämper, E.; Roscher, J.: Bewertung flexibler Endmontagesysteme für die Automobilindustrie durch Simulation des Realbetriebs. *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) 4, S. 181-185.

8 Literaturverzeichnis

WESTKÄMPER ET AL. 2001

Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Horváth, P.; Zahn, E. (Hrsg.): Montageplanung - effizient und marktgerecht. Berlin: Springer 2001. ISBN: 3-540-66647-8. (VDI-Buch).

WEYAND 2010

Weyand, L.: Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie. Diss. Universität des Saarlandes (2009). Saarbrücken: LKF 2010. ISBN: 978-3-930429-75-2. (Schriftenreihe Produktionstechnik 46).

WEYER & SPATH 2001

Weyer, M.; Spath, D.: Das Produktionssteuerungskonzept "Perlenkette". ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 96 (2001) 1-2, S. 17-19.

WEYER & SPATH 2009

Weyer, M.; Spath, D.: Das Produktionssteuerungskonzept "Perlenkette". ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 12, S. 1126-1130.

WEYER 2002

Weyer, M.: Das Produktionssteuerungskonzept Perlenkette und dessen Kennzahlensystem. Diss. Universität Karlsruhe (2002). Karlsruhe: Helmesverlag-Karlsruhe 2002. ISBN: 3-9808133-5-5.

WIEDEMANN 1990

Wiedemann, R.: EDV-gestützte Prognoseerstellung für univariate Zeitreihen. Diss. Universität Augsburg (1988). Frankfurt am Main: Lang 1990. ISBN: 3631430833. (Europäische Hochschulschriften. Reihe V, Volks- und Betriebswirtschaft 1126).

WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2002

Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.: Bottleneck Analysis of Assembly Lines with Characteristic Curves. CIRP Annals - Manufacturing Technology 51 (2002) 1, S. 15-19.

WIENDAHL 1996

Wiendahl, H.-P.: Produktionsplanung und -steuerung. In: Eversheim, W. (Hrsg.): Betriebshütte. Berlin: Springer 1996, S. 14-1 - 14-130. ISBN: 3-540-59360-8.

WILLNECKER 2001

Willnecker, U.: Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen. Technische Universität München (2000). München: Utz 2001. ISBN: 3896758918. (Forschungsberichte IWB 146).

WOMACK & JONES 1997

Womack, J. P.; Jones, D. T.: Auf dem Weg zum perfekten Unternehmen. (Lean thinking). Frankfurt/Main: Campus-Verl. 1997. ISBN: 3-593-35674-0.

ZAHN & SCHMIDT 1996

Zahn, E.; Schmidt, U.: Grundlagen und operatives Produktionsmanagement. Stuttgart: Lucius & Lucius 1996. ISBN: 3-8252-8126-4. (Grundwissen der Ökonomik Betriebswirtschaftslehre 1).

ZÄPFEL 2000

Zäpfel, G.: Taktisches Produktions-Management. München: Oldenbourg 2000. ISBN: 9783486254648. (Internationale Standlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

ZENNER 2006

Zenner, C.: Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung. Diss. Universität des Saarlandes (2006). Saarbrücken: LKF 2006. (Schriftenreihe Produktionstechnik 37).

ZHU ET AL. 2008

Zhu, X.; Hu, S. J.; Koren, Y.; Marin, S. P.: Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines. Journal of Manufacturing Science and Engineering 130 (2008) 5, S. 051013-1 - 051013-10.

ZÜLCH 1996

Zülch, G.: Arbeitswirtschaft. In: Eversheim, W. (Hrsg.): Betriebshütte. Berlin: Springer 1996, S. 12-94 - 12-124. ISBN: 3-540-59360-8.

ZWANZIG 2010

Zwanzig, F.: Taktung der Unikatfertigung am Beispiel des Werkzeugbaus. Diss. RWTH Aachen (2009). Aachen: Apprimus-Verl. 2010. ISBN: 3940565431. (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 2010,1).

9 Anhang

9.1 Betreute Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) in den Jahren 2011 bis 2014 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die folgenden studentischen Arbeiten. In diesen wurden verschiedene Fragestellungen zur Planung und Austaktung variantenreicher Montagelinien theoretisch sowie in der Praxis in unterschiedlichen Branchen und Unternehmen untersucht. Die gemeinsam erarbeiteten Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument mit eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden sehr herzlich für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

- Becker, M.: Flexibler Mitarbeiterereinsatz in der getakteten Montage, Diplomarbeit in Kooperation mit der MAN Truck & Bus AG, Technische Universität München, 2012.
- Danylyuk, A.: Kombiniertes Methodenkonzept zur dynamischen Austaktung variantenreicher Montagelinien, Diplomarbeit in Kooperation mit der MAN Truck & Bus AG, Technische Universität München, 2013.
- Dönmez, D.: Recherche und Bewertung von Methoden zur Austaktung variantenreicher Montagelinien, Bachelor's Thesis, Technische Universität München, 2011.
- Erl, M.: Bewertung wandlungsfähig austaktbarer Montagelinien im Nutzfahrzeugbau, Diplomarbeit in Kooperation mit der MAN Truck & Bus AG, Technische Universität München, 2012.
- Frost, M.: Organisation der Pilotmontage nach den Prinzipien der Serienproduktion, Diplomarbeit in Kooperation mit der BMW Group, Technische Universität München, 2012.
- Grundstein, S.: Dynamische, kennzahlbasierte Taktzeitadaption variantenreicher Montagelinien, Diplomarbeit in Kooperation mit der

- MAN Truck & Bus AG, Technische Universität München, 2012.
- Hübschmann, A.: Methodik zur dynamischen Austaktung von Montagelinien in der Kleinserie, Diplomarbeit in Kooperation mit der BMW Group, Technische Universität München, 2013.
- Lieb, C.: Simulative Bewertung von Strategien zum flexiblen Mitarbeiterereinsatz in getakteten Montagelinien, Bachelor's Thesis, Technische Universität München, 2013.
- Merz, J.: Einführung einer getakteten Fließmontage in einer von Varianten geprägten Kleinserie im Anlagenbau, Diplomarbeit in Kooperation mit der Siemens AG, Technische Universität München, 2012.
- Petersen, T.: Operative Personalbedarfsplanung in der Variantenfließmontage, Master's Thesis in Kooperation mit der MAN Truck & Bus AG, Technische Universität München, 2014.
- Piñeiro Diaz, A.: Development of a Line Balancing Method to Adjust Capacity in Takt Time Scenarios, Diplomarbeit, Technische Universität München, 2013.
- Schäfer, N.: Methode zur Überwachung und Austaktung der Montage im Nutzfahrzeugbau, Diplomarbeit in Kooperation mit der MAN Truck & Bus AG, Technische Universität München, 2011.
- Schupeck, M.: Entwicklung eines Methodenbaukastens zur Austaktung variantenreicher Montagelinien, Master's Thesis in Kooperation mit der MBtech Consulting GmbH, Technische Universität München, 2012.
- Thul, A.: Entwicklung einer Methode zur Mitarbeiterzuordnung nach Taktzeitszenarien, Diplomarbeit in Kooperation mit der MAN Truck & Bus AG, Technische Universität München, 2013.

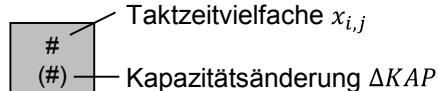
9.2 Taktzeitvielfache und Stückzahländerungen in Abhängigkeit der Werkerdichte

Tabelle 18 gibt einen Überblick über die resultierenden Taktzeitvielfachen, die sich durch einen Wechsel von einer Werkerdichte hin zu einer anderen Werkerdichte ergeben. Gleichzeitig ist in Klammern jeweils noch die entsprechende prozentuale Stückzahländerung mit angegeben. Die Tabelle beschränkt sich auf die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Werkerdichten bis hin zu neun Werkern.

Tabelle 18: Taktzeitvielfache und Stückzahländerung in Abhängigkeit der Anpassung der Werkerdichte

		Werkerdichte nach der Taktzeitanpassung								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Werkerdichte vor der Taktzeitanpassung	1	1,00	0,5 (+100%)	0,33 (+200%)	0,25 (+300%)	0,2 (+400%)	0,17 (+500%)	0,14 (+600%)	0,13 (+700%)	0,11 (+800%)
	2	2,00 (-50%)	1,00	0,67 (+50%)	0,5 (+100%)	0,4 (+150%)	0,33 (+200%)	0,29 (+250%)	0,25 (+300%)	0,22 (+350%)
	3	3,00 (-67%)	1,50 (-33%)	1,00	0,75 (+33%)	0,60 (+67%)	0,50 (+100%)	0,43 (+133%)	0,38 (+167%)	0,33 (+200%)
	4	4,00 (-75%)	2,00 (-50%)	1,33 (-25%)	1,00	0,80 (+25%)	0,67 (+50%)	0,57 (+75%)	0,5 (+100%)	0,44 (+125%)
	5	5,00 (-80%)	2,50 (-60%)	1,67 (-40%)	1,25 (-20%)	1,00	0,83 (+20%)	0,71 (+40%)	0,63 (+60%)	0,56 (+80%)
	6	6,00 (-83%)	3,00 (-67%)	2,00 (-50%)	1,50 (-33%)	1,20 (-17%)	1,00	0,86 (+17%)	0,75 (+33%)	0,67 (+50%)
	7	7,00 (-86%)	3,50 (-71%)	2,33 (-57%)	1,75 (-43%)	1,40 (-29%)	1,17 (-14%)	1,00	0,88 (+14%)	0,78 (+29%)
	8	8,00 (-88%)	4,00 (-75%)	2,67 (-63%)	2,00 (-50%)	1,60 (-38%)	1,33 (-25%)	1,14 (-13%)	1,00	0,89 (+13%)
	9	9,00 (-89%)	4,50 (-78%)	3,00 (-67%)	2,25 (-56%)	1,80 (-44%)	1,50 (-33%)	1,29 (-22%)	1,13 (-11%)	1,00

Legende:



9.3 Bestimmung der Taktzeitszenarien des Anwendungsbeispiels unter der Annahme einer Greenfieldplanung

Wie in Abschnitt 5.2.3.2 erläutert, sind je nach Planungsfall bei der Bewertung geeigneter Taktzeitszenarien unterschiedliche Parameter heranzuziehen bzw. sind diese unterschiedlich zu priorisieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Taktzeitszenarien für den vorliegenden Fall einer Brownfieldplanung bewertet (vgl. Abschnitt 6.3.1, insbesondere Tabelle 10). Um das Potential der entwickelten Methodik auch für einen Greenfieldplanung zu verdeutlichen, zeigt Tabelle 19 die Ergebnisse der Bewertung unter den Rahmenbedingungen einer Greenfieldplanung.

Tabelle 19: Ergebnisse der Bestimmung der Taktzeitszenarien unter Annahme einer Greenfieldplanung

Rang*	Taktzeitszenario			Bewertungsparameter					
				Greenfield			Brownfield		
	Szenariounummer	Werkdichte zur Basistaktzeit $w_{i,0}$	Basistaktzeit $t_{i,0}$	Gesamtabdeckung Stückzahlkorridor	Anzahl an Taktzeiten im Stückzahlkorridor	Mindestabstand zur wahrscheinlichsten Stückzahl	Anzahl an Taktzeiten im Taktzeitkorridor	Mindestabstand zur aktuellen Taktzeit	Abstand Taktzeit mit aktueller Werkdichte zur aktuellen Taktzeit
[-]	[-]	[min]	[%]	[-]	[Stk/Wo]	[-]	[min]	[Stk/Wo]	
1	40	4	7	100%	5	60	5	0,5	371
2	122	2	14	100%	5	60	5	7,5	371
3	34	4	6,5	100%	5	63	5	0	346
4	110	2	13	100%	5	63	5	6,5	346
5	23	5	5,5	100%	5	72	5	1	365
6	12	6	4,5	100%	5	83	5	2	359
7	63	3	9	100%	5	83	5	2,5	359
8	116	2	13,5	100%	5	83	5	7	359
9	92	2	11,5	100%	4	4	4	5	301
10	81	3	10,5	100%	4	11	4	4	407
...
45	32	2	6,5	100%	3	110	3	0	0
...
126	126	6	14	15%	1	261	1	7,5	585

*Top 10 der insgesamt 126 bewerteten Taktzeitszenarien (Brownfieldplanung)

Die Eingangsgrößen sind bis auf die Annahme einer Greenfieldplanung unverändert zu den in Abschnitt 6.3.1 beschriebenen Werten. Es wird zum einen deutlich, dass im Rahmen einer Greenfieldplanung noch eine weitere Steigerung der

Stückzahlflexibilität möglich ist, da in fast allen der zehn am besten bewerteten Szenarien sogar fünf Taktzeiten innerhalb des Stückzahlkorridors umsetzbar wären. Das im Rahmen des Anwendungsbeispiels ausgewählte Szenario liegt unter diesen Gesichtspunkten demgegenüber nur auf Rang 45 aller 126 bewerteten Szenarien. In Tabelle 20 ist darüber hinaus das am besten bewertete Szenario mit seinen einzelnen Taktzeiten, Stückzahlen sowie Kennzahlen aus dem Bereich Fahrzeugprogramm genauer aufgeführt.

Tabelle 20: Ergebnisse des am besten bewerteten Taktzeitszenarios der Greenfieldplanung

Laufvariable Werkdichte- kombination i	Parameter Taktzeitszenario				Stückzahlkorridor			Kennzahlen Fahrzeug- programm	
	Laufvariable Taktzeitvielfache j	Werkdichte $w_{i,j}$	Taktzeitvielfache $x_{i,j}$	Taktzeit $t_{i,j}$	Grundstückzahl $S_{g,t,i,j}$	Minimale Stückzahl $S_{min,t,i,j}$	Maximale Stückzahl $S_{max,t,i,j}$	Relative Stückzahl- flexibilität $\Delta S_{rel,t}$	Absolute Stückzahl- flexibilität ΔS_{abs}
[-]	[-]	[-]	[-]	[min]	[Stk/Wo]	[Stk/Wo]	[Stk/Wo]	[Stk/Wo]	[Stk/Wo]
4	0	4	1	7	643	231	849	618	1.157
4	1	2	2	14	321	116	424	308	
4	2	3	1,33	9,3	482	174	636	462	
4	3	5	0,8	5,6	804	289	1.061	772	
4	4	6	0,67	4,7	964	347	1.273	926	

9.4 Simulationsergebnisse des Anwendungsbeispiels

Im Planungsbeispiel in Abschnitt 6.3 wurden drei Austaktungsszenarien zu drei zusammenhängenden Taktzeitsprüngen entwickelt und mittels drei unterschiedlicher Fahrzeugprogramme mit Hilfe des Simulationswerkzeugs PePe validiert. Abbildung 61 bis Abbildung 63 geben einen Überblick über alle Auslastungsdiagramme der insgesamt neun Szenarien, die sich aus den drei Taktzeiten jeweils kombiniert mit den drei Fahrzeugprogrammen ergeben. Darüber hinaus zeigt Abbildung 64 die drei Auslastungsdiagramme der Ausgangssituation, ebenfalls jeweils unter Berücksichtigung der drei unterschiedlichen Fahrzeugprogramme.

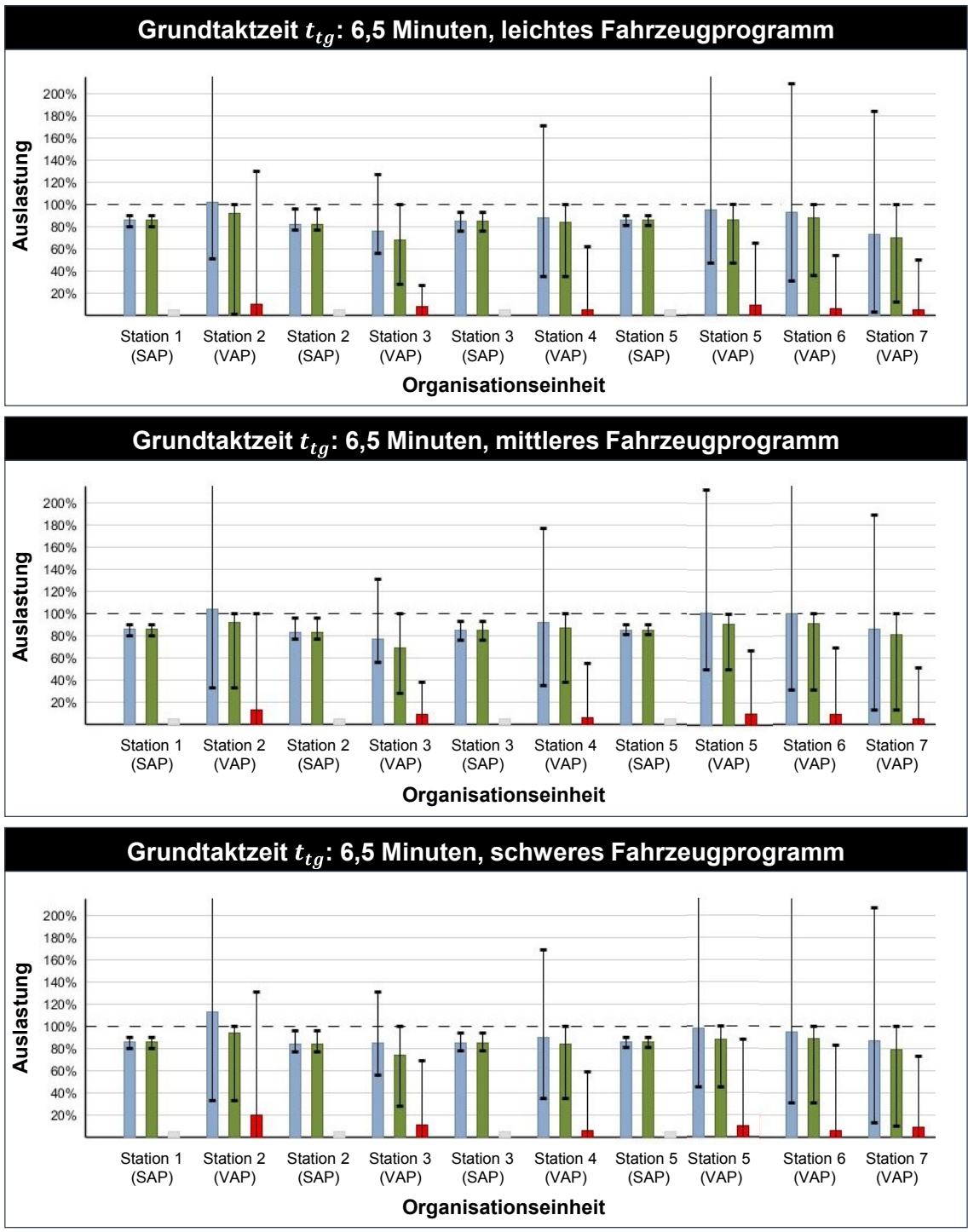


Abbildung 61: Auslastungsdiagramme des Planungsergebnisses der Grundtaktzeit (6,5 Minuten) für die drei verschiedenen Fahrzeugprogramme

9.4 Simulationsergebnisse des Anwendungsbeispiels

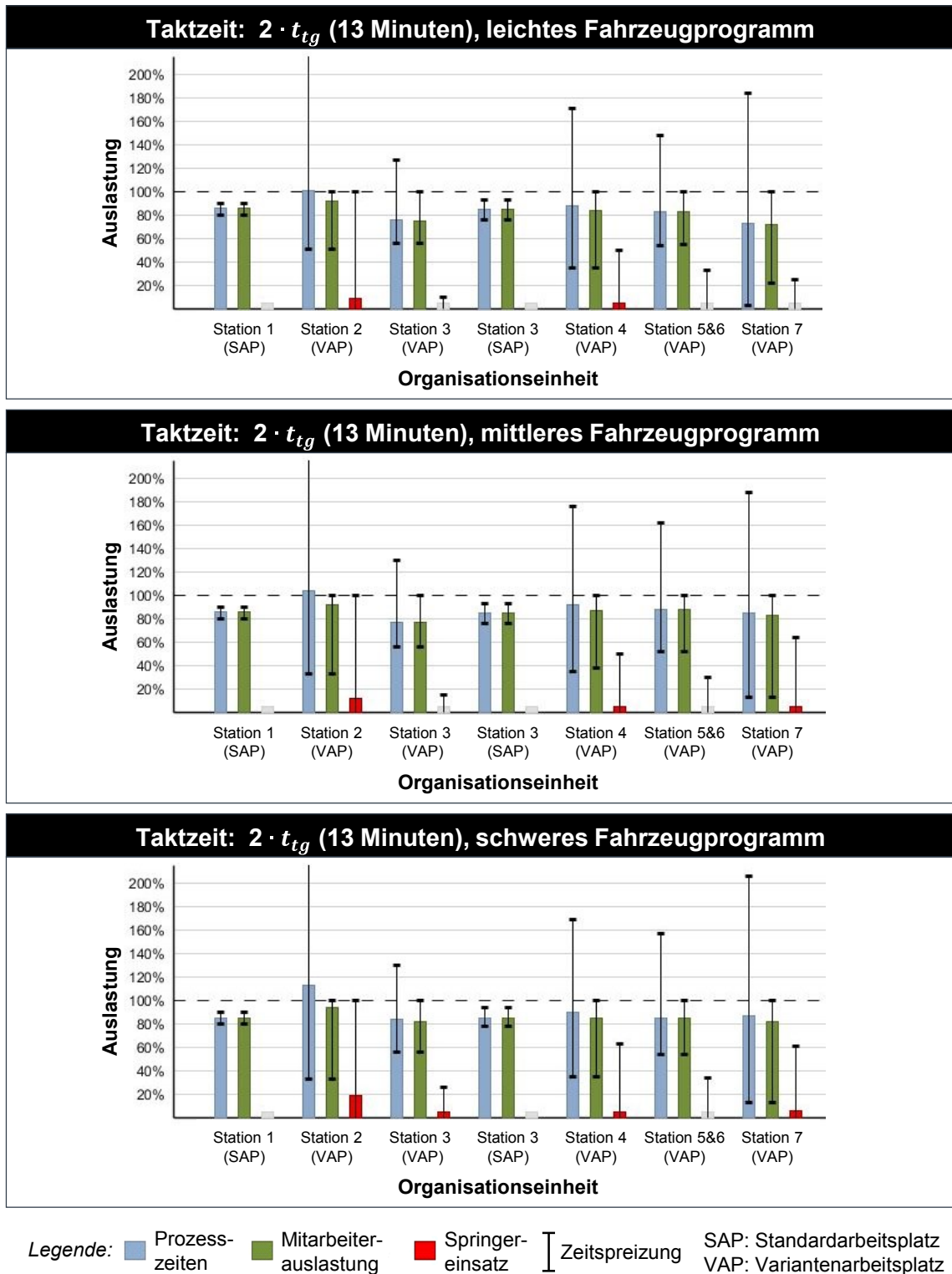


Abbildung 62: Auslastungsdiagramme des Planungsergebnisses der Taktzeit von 13 Minuten für die drei verschiedenen Fahrzeugprogramme

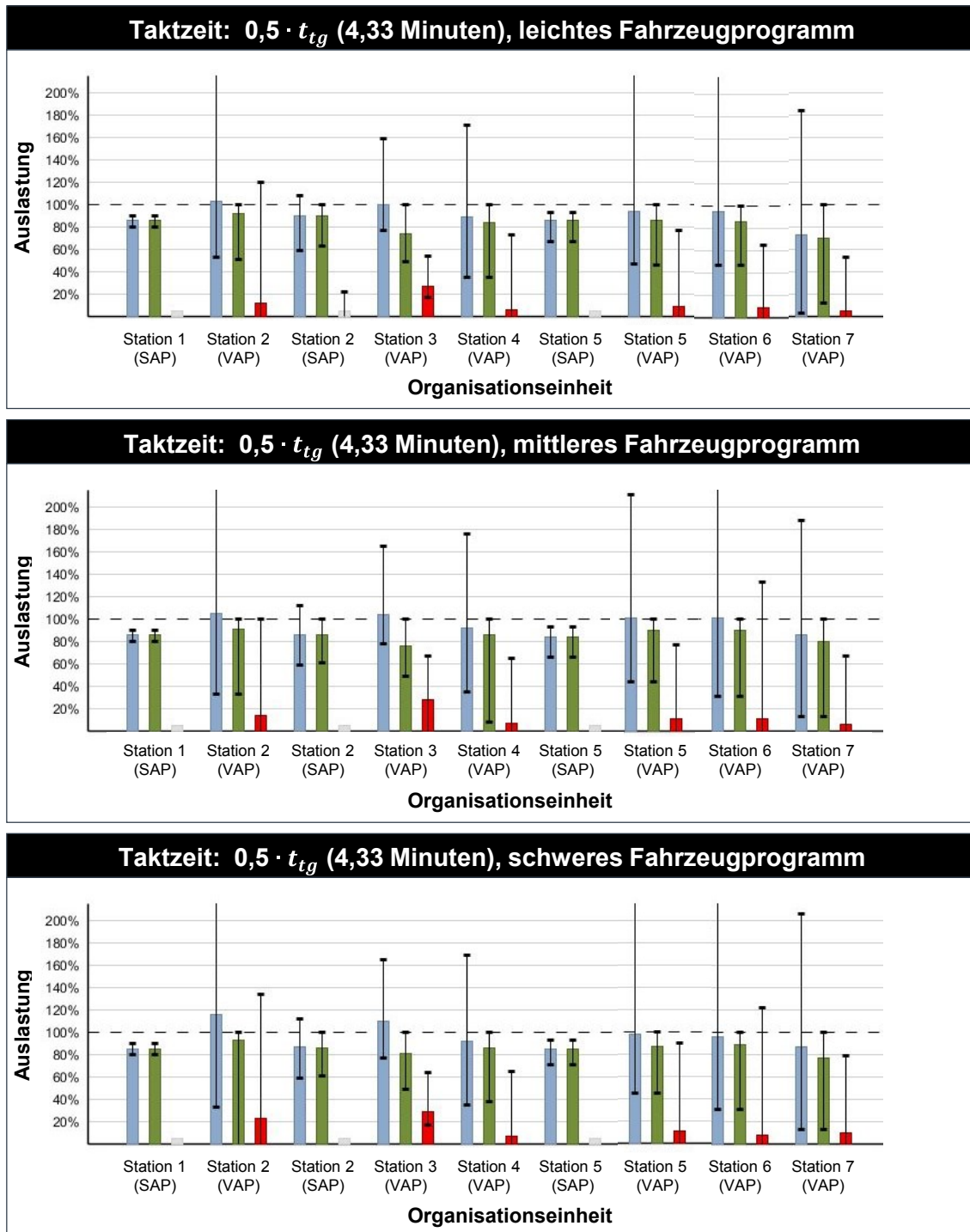


Abbildung 63: Auslastungsdiagramme des Planungsergebnisses der Taktzeit von 4,33 Minuten für die drei verschiedenen Fahrzeugprogramme

9.4 Simulationsergebnisse des Anwendungsbeispiels

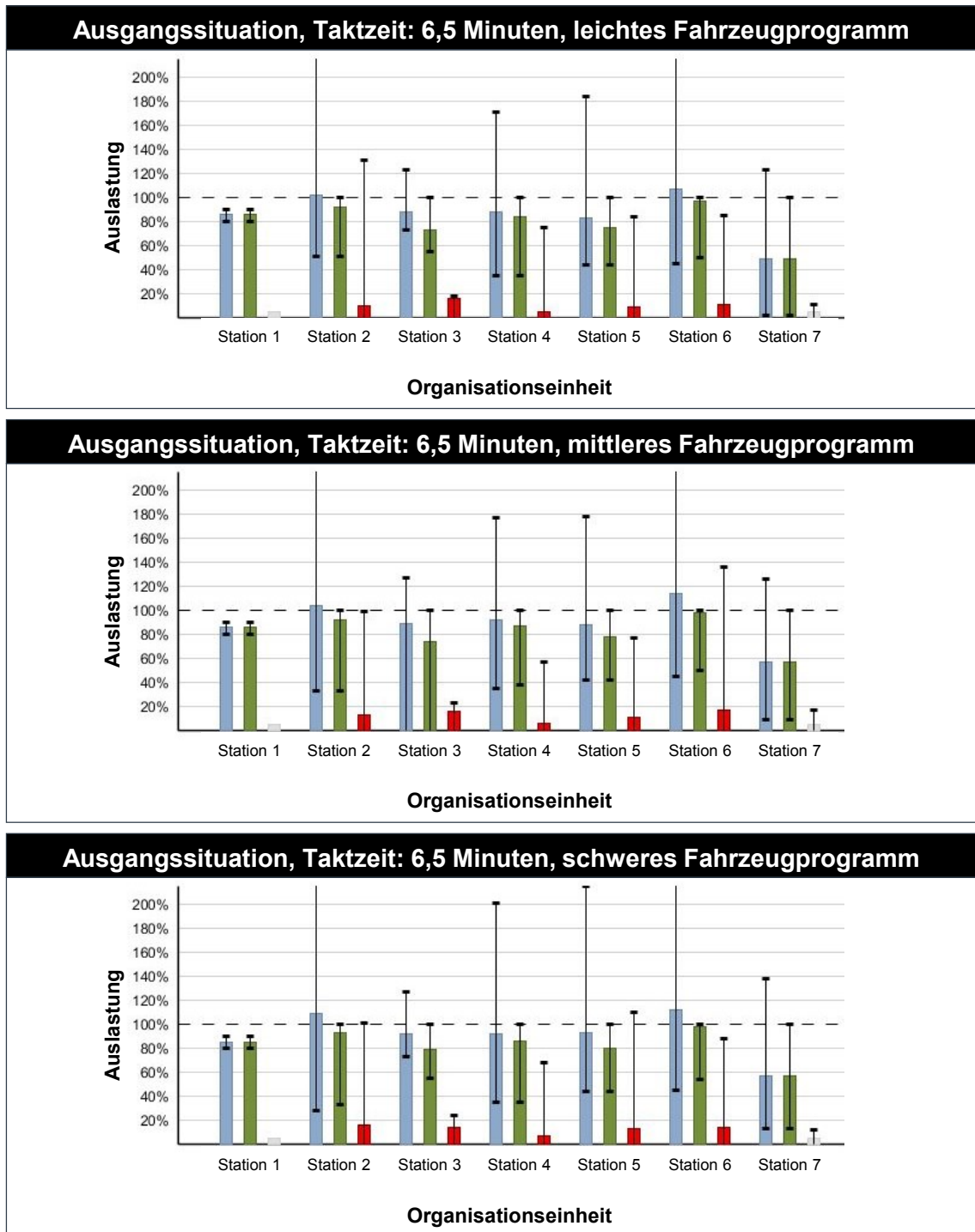


Abbildung 64: Auslastungsdiagramme der Ausgangskonfiguration für die drei verschiedenen Fahrzeugprogramme

9.5 Detailbetrachtung der Kennzahlen des Anwendungsbeispiels

Die in Abschnitt 6.3.4 vorgestellten Auswertungen der Kennzahlen des Planungsbeispiels sind zur Übersichtlichkeit zum Großteil über den gesamten ausgeplanten Bandabschnitt kumuliert. Zusätzlich zeigen Tabelle 15 (S. 154) und Tabelle 17 (S. 156) die Kennzahlen der Grundtaktzeit von 6,5 Minuten auf Arbeitsplatzebene. In Tabelle 21 bis Tabelle 23 sind für die Ausgangssituation vor Durchführung der Austaktungswshops sowie für die zwei weiteren Austaktungsszenarien jeweils die *Kennzahlen aus dem Bereich Austaktung auf Stations- bzw. Arbeitsplatzebene* unter Einbezug der drei unterschiedlichen Fahrzeugprogramme dargestellt. Es wird deutlich, dass auch in den Szenarien der Taktstufen bei den Standardarbeitsplätzen eine hohe Standardisierung der Arbeitsinhalte mit geringen Schwankungen in der Auslastung erreicht wurde. Gleichzeitig wird deutlich, an welchen Variantenarbeitsplätzen bei sich verändernden Variantenmix Anpassungsbedarf auftreten könnte. Außerdem ist bei der Ausgangssituation, die wie beschrieben den Zwischenstand im Rahmen einer groß angelegten Umstrukturierung darstellt, der Bedarf zur Austaktung aufgrund der Über- und Unterauslastungen an mehreren Stationen erkennbar.

Tabelle 21: Kennzahlen aus dem Bereich Austaktung auf Mitarbeitergruppenebene für die Ausgangssituation (6,5 Minutentakt)

Taktzeit: 6,5 min		Leichtes Fahrzeug- programm		Mittleres Fahrzeug- programm		Schweres Fahrzeug- programm	
Station/ Mitarbeitergruppe	Mitarbeiterantritt	Durchschnittliche Auslastung $\alpha_{\phi AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$	Durchschnittliche Auslastung $\alpha_{\phi AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$	Durchschnittliche Auslastung $\alpha_{\phi AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$
	[.]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	2	86%	9%	85%	9%	84%	9%
2	2	101%	263%	104%	251%	108%	255%
3	6	88%	50%	89%	52%	92%	54%
4	4	88%	137%	91%	142%	92%	166%
5	3	83%	140%	88%	136%	93%	172%
6	2	107%	177%	114%	222%	111%	207%
7	3	48%	122%	57%	117%	56%	126%
gesamt	22	85%	115%	88%	118%	90%	128%

Legende: **fett:** Anpassungsbedarf auf Arbeitsplatzebene

9.5 Detailbetrachtung der Kennzahlen des Anwendungsbeispiels

Tabelle 22: Kennzahlen aus dem Bereich Austaktung auf Mitarbeitergruppen-ebene für die Taktzeit 13 Minuten

Taktzeit: 13 min		Leichtes Fahrzeug- programm		Mittleres Fahrzeug- programm		Schweres Fahrzeug- programm	
Station/ Mitarbeitergruppe	Mitarbeiterantritt	Durchschnittliche Auslastung $a_{\phi AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$	Durchschnittliche Auslastung $a_{\phi AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$	Durchschnittliche Auslastung $a_{\phi AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$
	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1 (SAP)	1	85%	10%	85%	10%	85%	10%
2 (VAP)	1	101%	262%	103%	250%	112%	280%
3 (VAP)	2	75%	72%	77%	75%	84%	75%
3 (SAP)	1	85%	16%	85%	16%	84%	17%
4 (VAP)	2	87%	136%	91%	142%	89%	135%
5 & 6 (VAP)	3	83%	94%	87%	110%	85%	103%
7 (VAP)	1	72%	182%	85%	176%	87%	194%
gesamt	11	83%	106%	87%	111%	88%	112%

Legende:

SAP: Standardarbeitsplatz
VAP: Variantenarbeitsplatz

fett: Anpassungsbedarf auf
Arbeitsplatzebene

Tabelle 23: Kennzahlen aus dem Bereich Austaktung auf Mitarbeitergruppen-ebene für die Taktzeit 4,33 Minuten

Taktzeit: 4,33 min		Leichtes Fahrzeug- programm		Mittleres Fahrzeug- programm		Schweres Fahrzeug- programm	
Station/ Mitarbeitergruppe	Mitarbeiterantritt	Durchschnittliche Auslastung $a_{\phi AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$	Durchschnittliche Auslastung $a_{\phi AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$	Durchschnittliche Auslastung $a_{\phi AP}$	Zeitspreizung $\delta_{Bereich}$
	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1 (SAP)	3	85%	10%	85%	10%	85%	10%
2 (VAP)	2	102%	260%	104%	250%	116%	280%
2 (SAP)	3	90%	49%	85%	53%	86%	50%
3 (VAP)	6	99%	81%	103%	87%	109%	88%
4 (VAP)	6	88%	136%	92%	142%	92%	135%
5 (VAP)	3	94%	171%	100%	167%	97%	172%
5 & 6 (SAP)	2	86%	27%	84%	27%	84%	23%
6 (VAP)	3	93%	177%	100%	222%	96%	207%
7 (VAP)	3	72%	182%	85%	176%	87%	194%
gesamt	31	90%	118%	94%	123%	95%	124%

Legende: SAP: Standardarbeitsplatz **fett:** Anpassungsbedarf auf
VAP: Variantenarbeitsplatz Arbeitsplatzebene

Analog sind in Tabelle 24 bis Tabelle 26 die *Kennzahlen aus dem Bereich Mitarbeiterflexibilität* für die Ausgangssituation sowie für die Planungsergebnisse der Taktzeiten 13 Minuten und 4,33 Minuten aufgeführt. Auch hier wird der verstärkte Anpassungsbedarf in der Ausgangssituation im Vergleich zu den Planungsergebnissen deutlich. Auch die in Abschnitt 6.3.4 hauptsächlich anhand der Grundtaktzeit erläuterten Aussagen bestätigen sich für die ausgeplanten Taktzeitsprünge.

9.5 Detailbetrachtung der Kennzahlen des Anwendungsbeispiels

Tabelle 24: Kennzahlen aus dem Bereich Mitarbeiterflexibilität auf Mitarbeitergruppenebene für die Ausgangssituation (6,5 Minutentakt)

Taktzeit: 6,5 min			Leichtes Fahrzeugprogramm			Mittleres Fahrzeugprogramm			Schweres Fahrzeugprogramm		
Station/ Mitarbeitergruppe	Mitarbeiterantritt	Driftpotential D_p	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittliche Auslastung Werker α_{GW}	Driftquote q_D	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittliche Auslastung Werker α_{GW}	Driftquote q_D	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittliche Auslastung Werker α_{GW}	Driftquote q_D
	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	2	0%	0%	86%	0%	0%	85%	0%	0%	84%	0%
2	2	100%	10%	92%	9%	12%	91%	11%	16%	92%	11%
3	6	198%	15%	72%	25%	16%	73%	25%	13%	78%	24%
4	4	100%	4%	83%	7%	5%	86%	8%	6%	85%	8%
5	3	0%	9%	74%	0%	11%	77%	0%	13%	80%	0%
6	2	120%	10%	97%	13%	16%	98%	16%	13%	98%	13%
7	3	120%	0%	48%	1%	0%	57%	4%	0%	56%	1%
gesamt	22	-	8%	76%	10%	9%	79%	11%	9%	80%	10%

Legende: **fett:** Anpassungsbedarf auf Arbeitsplatzebene

Tabelle 25: Kennzahlen aus dem Bereich Mitarbeiterflexibilität auf Mitarbeitergruppenebene für die Taktzeit 13 Minuten

Taktzeit: 13 min			Leichtes Fahrzeugprogramm			Mittleres Fahrzeugprogramm			Schweres Fahrzeugprogramm		
Station/ Mitarbeitergruppe	Mitarbeiterantritt	Driftpotential D_p	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittliche Auslastung Werker α_{GW}	Driftquote q_D	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittliche Auslastung Werker α_{GW}	Driftquote q_D	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittliche Auslastung Werker α_{GW}	Driftquote q_D
	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1 (SAP)	1	0%	0%	85%	0%	0%	85%	0%	0%	85%	0%
2 (VAP)	1	50%	9%	92%	8%	12%	92%	10%	18%	94%	9%
3 (VAP)	2	66%	1%	75%	24%	1%	76%	24%	2%	82%	24%
3 (SAP)	1	0%	0%	85%	0%	0%	85%	0%	0%	84%	0%
4 (VAP)	2	50%	4%	83%	8%	5%	87%	10%	5%	84%	10%
5 & 6 (VAP)	3	180%	0%	83%	8%	0%	87%	12%	0%	84%	10%
7 (VAP)	1	40%	1%	71%	11%	2%	83%	15%	5%	81%	22%
gesamt	11	-	2%	82%	10%	2%	85%	12%	3%	84%	12%

Legende: SAP: Standardarbeitsplatz **fett:** Anpassungsbedarf auf Arbeitsplatzebene
VAP: Variantenarbeitsplatz

Tabelle 26: Kennzahlen aus dem Bereich Mitarbeiterflexibilität auf Mitarbeitergruppenebene für die Taktzeit 4,33 Minuten

Taktzeit: 4,33 min			Leichtes Fahrzeugprogramm			Mittleres Fahrzeugprogramm			Schweres Fahrzeugprogramm		
Station/ Mitarbeitergruppe	Mitarbeiterantritt	Driftpotential D_p	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittlich Auslastung Werker $a_{\phi W}$	Driftquote q_D	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittlich Auslastung Werker $a_{\phi W}$	Driftquote q_D	Springerquote q_{Sp}	Durchschnittlich Auslastung Werker $a_{\phi W}$	Driftquote q_D
	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1 (SAP)	3	0%	0%	85%	0%	0%	85%	0%	0%	85%	0%
2 (VAP)	2	100%	11%	91%	10%	13%	91%	11%	23%	93%	15%
2 (SAP)	3	150%	0%	90%	25%	0%	85%	18%	0%	86%	19%
3 (VAP)	6	198%	26%	73%	23%	28%	75%	22%	29%	80%	24%
4 (VAP)	6	150%	5%	93%	8%	6%	85%	10%	7%	85%	9%
5 (VAP)	3	180%	9%	85%	18%	11%	90%	19%	11%	87%	15%
5 & 6 (SAP)	2	0%	0%	86%	0%	0%	84%	0%	0%	84%	0%
6 (VAP)	3	180%	6%	87%	7%	10%	90%	12%	7%	88%	8%
7 (VAP)	3	120%	3%	69%	5%	5%	80%	9%	10%	77%	6%
gesamt	31	-	8%	84%	12%	10%	84%	13%	11%	84%	12%

Legende: SAP: Standardarbeitsplatz **fett:** Anpassungsbedarf auf Arbeitsplatzebene
VAP: Variantenarbeitsplatz