

# **Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Stuttgart zur Erlangung  
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
Dipl.-Wi.-Ing. Jörg Roscher  
aus Würzburg

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

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Dieter Spath

Tag der mündlichen Prüfung: 27.11.2007

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb

2008



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Variablen- und Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>14</b>
1.1 Ausgangssituation .....	14
1.2 Ziel der Arbeit .....	15
1.3 Aufbau der Arbeit.....	17
<b>2 Herausforderung flexible Endmontage</b> .....	<b>18</b>
2.1 Montageplanung .....	18
2.1.1 Montage in der Automobilfabrik.....	18
2.1.2 Montageplanung und ihre Gestaltungsfelder .....	20
2.1.3 Auswirkungen zunehmender Wettbewerbsintensität auf die Montageplanung..	22
2.2 Flexibilität in Produktionssystemen .....	24
2.2.1 Flexibilität als fabrikplanerisches Handlungsfeld der Kostenreduktion .....	24
2.2.2 Planung von Flexibilitätsstrategien als hierarchischer Planungsprozess .....	30
2.3 Flexibilität in Montagesystemen .....	34
2.3.1 Personalflexibilität .....	35
2.3.2 Volumen- und Produktflexibilität .....	37
2.3.3 Standort- und produktspezifische Flexibilitätsstrategien .....	42
2.4 Planung flexibler Montagesysteme .....	45
2.4.1 Konkretisierung der Erkenntnisse für die Montageplanung .....	45
2.4.2 Anforderungen an die Planungsmethodik.....	48
2.4.3 Abgrenzung der Planungsmethode.....	50
<b>3 Ansätze zur Planung flexibler Produktionssysteme</b> .....	<b>52</b>
3.1 Bewertungsansätze auf Basis von Optimierungsverfahren.....	53
3.1.1 Lösungsklassen und -verfahren für Optimierungsprobleme .....	53
3.1.2 Anwendungen.....	58
3.2 Systemdynamische Bewertungsansätze .....	62
3.2.1 Einführung in die System Dynamics Theorie .....	63
3.2.2 Anwendungen.....	64
3.3 Defizite und Ableitung des Handlungsbedarfs.....	65
3.3.1 Defizite der vorgestellten Ansätze .....	65
3.3.2 Handlungsbedarf .....	67
3.3.3 Lösungskonzept der Planungsmethodik.....	68
<b>4 Modell der Montage-Wirkzusammenhänge</b> .....	<b>71</b>
4.1 Ein-Perioden-Modell der Montage.....	72
4.1.1 Eingangsgrößen des Ein-Perioden-Modells .....	72
4.1.2 Entscheidungsvariablen des Ein-Perioden-Modells.....	73
4.1.3 Kostenfunktion des Ein-Perioden-Modells .....	74
4.1.4 Nebenbedingungen des Ein-Perioden-Modells.....	79

---

4.2	Mehr-Perioden-Modell der Montage .....	82
4.2.1	Eingangsgrößen des Mehr-Perioden-Modells .....	83
4.2.2	Entscheidungsvariablen des Mehr-Perioden-Modells.....	84
4.2.3	Kostenfunktion des Mehr-Perioden-Modells .....	84
4.2.4	Nebenbedingungen des Mehr-Perioden-Modells.....	85
<b>5</b>	<b>Antizipation von Montagebetrieb und Flexibilitätsnutzung .....</b>	<b>89</b>
5.1	Antizipation betrieblicher Lerneffekte mittels Lernkurven .....	89
5.1.1	Lernkurven-Konzept und sein wissenschaftlicher Nachweis.....	90
5.1.2	Vorgehen bei der Analyse von Lernkurveneffekten in Produktionssysteme .....	91
5.1.3	Analyse von Lernkurveneffekten in Automobilmontagelinien.....	93
5.1.4	Konzeption eines Lernkurven Modells für Montagezeit und Taktausgleichsverlust .....	101
5.2	Entwicklung eines Optimierungsmodells zur Antizipation der Flexibilitätsnutzung	105
5.2.1	Aufbau des Optimierungsmodells .....	105
5.2.2	Ansätze der Komplexitätsreduktion .....	109
5.3	Umsetzung eines Planungswerkzeugs.....	114
5.3.1	Übersicht über die Planungsmodule und ihre Nutzung.....	114
5.3.2	Architektur des Lifecycle Adaptation Planners .....	120
5.3.3	Aufbau der LAP-Optimierungsmodelle .....	121
5.3.4	Analyse der Rechenzeit .....	124
<b>6</b>	<b>Anwendung der Methode .....</b>	<b>126</b>
6.1	Beschreibung des Anwendungsfalls.....	126
6.2	Auswertung der Ergebnisse.....	136
6.3	Kritische Würdigung .....	144
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>148</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>151</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Flexibilitätsnutzung als Abstimmung von Flexibilitätsbedarf und Flexibilitätsangebot .....	16
Abbildung 2:	Exemplarische Montagelinie und ihre Bereiche als Element der Automobilfabrik .....	19
Abbildung 3:	Austaktung der Arbeitsvorgänge auf die Taktzeit.....	22
Abbildung 4:	Umsatzrendite und Auslastung nordamerikanischer Automobilhersteller von 1972 bis 2004 [Warburton, 2004]. .....	23
Abbildung 5:	Flexibilitätsbedarf und angepasste Produktionssysteme am Beispiel von Nachfrageschwankungen .....	26
Abbildung 6:	Flexibilitätsarten und ihre Auswirkungen auf die Auslastung der Montagelinien.....	28
Abbildung 7:	Hierarchischen Flexibilitätsplanung (i.A. an [Schneeweiß, 1999]) .....	31
Abbildung 8:	Planung und Bewertung von Flexibilitätsstrategien durch die Top-Planung.....	31
Abbildung 9:	Ebenen der Produktions- und Personalkapazitätsplanung (i.A. an [Günther, 1989]).....	33
Abbildung 10:	Ansatzpunkte der volumenflexiblen Solitärline.....	37
Abbildung 11:	Ansatzpunkte der produkt(mix)flexiblen Montagelinie .....	40
Abbildung 12:	Auswirkungen des Kosten- und Innovationsdruck auf die Flexibilitätsstrategien .....	43
Abbildung 13:	Flexibilitätsstrategien mit annähernd gleicher Reaktionsfähigkeit bei Nachfrageunsicherheit [Jordan et al., 1995].....	44
Abbildung 14:	Ableitung der Montage-Flexibilitätsstrategie aus produkt- und standortspezifischen Rahmenbedingungen .....	46
Abbildung 15:	Untersuchungsumfang der Dissertation .....	50
Abbildung 16:	Zeitliche Stufenstruktur deterministisch-dynamischer Programme (i.A. an [Schneeweiß, 1992]) .....	56
Abbildung 17:	Entscheidungsbaum eines deterministischen dynamischen Programms.....	57
Abbildung 18:	Entscheidungsbaum der flexiblen Planung .....	58
Abbildung 19:	Lösungskonzept einer Planungsmethodik zur Bewertung von Flexibilitätsstrategien .....	68
Abbildung 20:	Aufbau des Montagemodells für den Ein- und Mehr-Perioden Fall.....	71
Abbildung 21:	Lernkurve der Ausfallzeit über der Betriebsnutzungszeit [Mishima, 1997].	95
Abbildung 22:	Lernkurven der Montagezeit für ein Kompaktklassefahrzeug und seinen Nachfolger .....	98
Abbildung 23:	Veränderung des Taktausgleichsverlusts nach Umtaktung der Montagelinie.....	101

---

Abbildung 24:	Zustandsraumvergrößerung bei Einführung von Statusvariablen.....	109
Abbildung 25:	Bei der Komplexitätsreduktion zu berücksichtigende Abhängigkeiten der Zustandsvariablen .....	112
Abbildung 26:	Übersicht über die Planungsmodule.....	115
Abbildung 27:	Stufenweise Navigation im LAP.....	116
Abbildung 28:	Ausschnitte aus den Eingabemasken für Kostensätze (oben) und Arbeitszeitmodelle (unten) .....	117
Abbildung 29:	Aufbau des zentralen Tabellenblatts zur Lebenszyklusplanung .....	118
Abbildung 30:	Bewertung der Flexibilitätsstrategien über den mittleren und über den „Worst-Case“-Kosten-Kapitalwert.....	120
Abbildung 31:	Architektur des „Lifecycle Adaptation Planners“ LAP .....	120
Abbildung 32:	Pseudocode zur Identifikation der kostenoptimalen Nachfolgerzustände ..	122
Abbildung 33:	Pseudocode zur Identifikation des kostenoptimalen Anpassungspfads .....	123
Abbildung 34:	Ableitung der erforderlichen Rechenzeit in Abhängigkeit der zu realisierenden Anpassungsentscheidungen .....	124
Abbildung 35:	Prognostiziertes Nachfrageszenario sowie erwartete minimale und maximale Nachfrage .....	128
Abbildung 36:	Beschreibung der Flexibilitätsstrategien .....	131
Abbildung 37:	Taktausgleichsverluste der Linien im Solitär (S) und im Mix-Betrieb (M) über der Zeit .....	133
Abbildung 38:	Ergebnis des LAP, exemplarisch dargestellt für Nachfrageszenario 3 und Konzept 4 .....	137
Abbildung 39:	Arbeitskräftebedarf, befristete und unbefristete Mitarbeiter, Arbeits kräfte-Überschuss und Arbeitszeitkonto für Nachfrageszenario 3 und Konzept 4 .....	138
Abbildung 40:	Personal-, Anpassungs- und Betriebskosten für Nachfrageszenario 3 und Konzept 4 .....	140
Abbildung 41:	Gewichteter mittlerer und Worst-Case-Kapitalwerte der Betriebskosten (oben) und der Gesamtkosten (unten) .....	141

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vor- und Nachteile der volumenflexiblen Solitärlinie .....	39
Tabelle 2:	Vor- und Nachteile der produktflexiblen Montagelinie .....	41
Tabelle 3:	Nachgewiesene Lernkurveneffekte in den Studien 1 und 2 .....	99
Tabelle 4:	Zustandsvariablen in Anlehnung an die Entscheidungsvariablen des Montagemodells .....	106
Tabelle 5:	Zusammenhang zwischen Anpassungszuständen und Anpassungsentscheidungen über der Zeit. ....	107
Tabelle 6:	Zustands- und Statusvariablen der Optimierung im Ein-Linien-Modell ....	121
Tabelle 7:	Optimierung im Zwei-Linien-Modell .....	122
Tabelle 8:	Startwerte der Montagezeit-Lernkurven .....	127
Tabelle 9:	Verfügbarkeit nach Anläufen über der Zeit .....	134
Tabelle 10:	Anpassungskosten bei Linienumtaktung .....	135
Tabelle 11:	Anpassungskosten bei Wechsel der Schichtmodelle und der Arbeits- kräfte-Anzahl .....	135

## Variablen- und Abkürzungsverzeichnis

### **Allgemeine Abkürzungen**

€	Euro
AG	Aktiengesellschaft
AK	Arbeitskraft
AZ	Arbeitszeit
AZK	Arbeitszeitkonto
BMW	Bayerische Motoren Werke
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
C++, C#	Programmiersprachen
ca.	circa
d.h.	das heißt
DB	Datenbank
EDV	elektronische Datenverarbeitung
et al.	und andere
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
F	Formel
i.A.	in Anlehnung
inkl.	inklusive
IPA	Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
k.A.	keine Angabe
KVP	kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LAP	Lifecycle Adaptation Planner (Planungssoftware)
LKF	Lernkurvenfaktor
m.a.W.	mit anderen Worten
max.	maximal
min.	minimal
Min.	Minuten
Mio.	Millionen
MS	Microsoft
MTM	Methods Time Measurement
OEM	Original Equipment Manufacturer
OR	Operations Research
p.a.	per annum
Pkw	Personenkraftwagen
s.o.	siehe oben
s.u.	siehe unten
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel



### Variablenverzeichnis Kapitel 3

$a_t$	Entscheidungsvariable der Stufe $t$
$A_t(z_t)$	Menge der möglichen Entscheidungen
$c^T x, f(x), g_i(x)$	Ziel- bzw. Nutzen- und Nebenfunktionen
$f_t(z_t, a_t)$	Zustandstransformationsgleichung
$\mathfrak{R}_+$	Menge der reellen, positiven Zahlen
$t$	Index der Stufen des Optimierungsproblems
$x$	Variablenvektor
$z$	Zielkriterium des Optimierungsproblems
$z_t$	Zustandsvariable der Optimierungsstufe $t$
$Z_t$	Menge der diskreten Zustände
$Z_+$	Menge der natürlichen Zahlen

### Variablenverzeichnis Kapitel 4 und 5

#### Mengen und Indizes des Montage- und Lernkurvenmodells

$A, B$	Mengen ähnlicher Arbeitsvorgänge
$a, b$	Index der Menge ähnlicher Arbeitsvorgänge $A, B$
$L$	Menge der Linien
$l, m$	Index der Menge der Linien $L$
$P$	Menge der Produkte
$p$	Index der Menge der Produkte $P$
$S$	Menge der Schichtbetriebe (1 bis 3 Schichten)
$s$	Index der Menge der Schichtbetriebe $S$
$SB_l$	Menge der Schichtgruppen über alle Linien
$T$	Betrachtungszeitraum
$t$	Index des Betrachtungszeitraums $T$

#### Eingangsgrößen des Montage- und Lernkurvenmodells

$a_0, a_1, a_2$	[%]	problemspezifische Hilfsvariablen
$ait$	[%]	Anteil indirekter Tätigkeiten
$AK_{unab}$	[1]	Anzahl der von Takt- und Montagezeit unabhängigen AK
$antMZ$	[1]	arbeitskräftewirksamer Anteil der Montagezeit
$ap$	[€]	Anfahrtpauschale für die AK
$arbtage$	[Tag]	Anzahl an verfügbaren Kalender-Arbeitstagen
$azt$	[Min.]	tarifliche AZ
$bed$	[1]	Bedarf zur Befriedigung der Marktnachfrage
$bvl$	[%]	Bandvorlauf der Montagelinie
$fsk$	[%]	Krankenfehlstand bei tariflicher AZ
$fsu$	[%]	Urlaubsfehlstand
$gewabord$	[€]	Gewinn aus Abordnungen von AK
$jbr$	[1]	Anzahl an Betriebsruhetagen pro Jahr
$k$	[1]	Kosten einer produzierten Einheit
$kAK_{bd}$	[€]	Kosten für befristete direkte AK pro Periode
$kAK_{ud}$	[€]	Kosten für unbefristete direkte AK pro Periode
$KAK_{ui}$	[€]	Kosten für unbefristete indirekte AK pro Periode
$kalkz$	[%]	kalkulatorischer Zinssatz
$korraZK$	[h]	obere bzw. untere Grenze des AZK
$LKF$	[1]	Lernkurvenfaktor der Montagezeit

<i>MaxAbord</i>	[1]	maximale Anzahl an AK in Abordnung
<i>MaxBefr</i>	[1]	maximaler Anteil befristeter AK
<i>maxPVS</i>	[%]	maximale Programmverschiebung zwischen zwei Perioden
<i>mbr</i>	[Tag]	Anzahl individueller Urlaubstage
<i>minTZ</i>	[Min]	minimal mögliche Taktzeit
<i>mz</i>	[Min]	Montagezeit für die erste produzierte Einheit
<i>MZ</i>	[Min]	linienabhängige Montagezeit
<i>MZT</i>	[Min]	linienunabhängige theoretische Montagezeit
<i>psb</i>	[Min]	bezahlte Pausenminuten
<i>s</i>	[1]	Steigungsparameter der Lernkurve
<i>sl</i>	[€]	Stundenlohn als Basis der Schichtzuschläge
<i>tag</i>	[%]	Taktausgleichsverlust der Montagelinie
<i>tag<sup>Ziel</sup></i>	[%]	Ziel Taktausgleichsverlust der Montagelinie
<i>verf</i>	[%]	Verfügbarkeit der Linien
<i>wkausSt</i>	[€]	Kosten bei Ausstellung einer unbefristeten AK
<i>wkbFix</i>	[€]	fixe Kosten bei Wechsel der Betriebsnutzungszeit
<i>wkbVar</i>	[€]	arbeitskräftevariable Kosten bei Wechsel der Betriebsnutzungszeit
<i>wkeinFlex</i>	[€]	Kosten bei Einstellung einer befristeten AK
<i>wkeinSt</i>	[€]	Kosten bei Einstellung einer unbefristeten AK
<i>wksbFix</i>	[€]	fixe Kosten bei Wechsel des Schichtbetriebs
<i>wksbVar</i>	[€]	arbeitskräftevariable Kosten bei Wechsel des Schichtbetriebs
<i>wktFix</i>	[€]	fixe Kosten bei Wechsel der Taktzeit
<i>wktVar</i>	[€]	arbeitskräftevariable Kosten bei Wechsel der Taktzeit
<i>wkversVar</i>	[€]	Kosten bei Verschiebung von AK zwischen Montagelinien
<i>x</i>	[1]	kumulierte Ausbringungsmenge
<i>zs</i>	[%]	Schichtzuschlagssatz
<i>zü</i>	[%]	Überstundenzuschlagssatz
<i>zuszeit</i>	[Min]	zusätzlich für Umbauten etc. erforderliche Zeit

### Entscheidungsvariablen des Montage- und Lernkurvenmodells

<i>EV_AKAB</i>	[1]	AK-Anzahl in Abordnung
<i>EV_AKB</i>	[1]	Anzahl befristeter AK
<i>EV_AKU</i>	[1]	Anzahl unbefristeter AK
<i>EV_AKVERS</i>	[1]	zwischen Montagelinien zu verschiebende AK
<i>EV_BETRUR</i>	[1]	Anzahl an Betriebsruhen mit Urlaub
<i>EV_BNZV</i>	[Min]	Betriebsnutzungszeit pro Schicht
<i>EV_PADGF</i>	[Min]	durchgefahrene Pausenzeit pro Schicht
<i>EV_PFB</i>	[%]	Plattformbelegung
<i>EV_PV</i>	[%]	Programmverteilung
<i>EV_PVS</i>	[1]	Programmverschiebung aus Periode t+1 in Periode t
<i>EV_SB</i>	[1]	Schichtbetrieb
<i>EV_TZ</i>	[Min]	Taktzeit

**Hilfs- und Ergebnisgrößen des Montage- und Lernkurvenmodells**

$\Delta t_{LKVersch}$	[1]	zeitliche Rechtsverschiebung der Lernkurve
$\Delta t_{leUm}$	[1]	Zeitpunkt der letzten Umtaktung
$\alpha$	[%]	Gewichtungsfaktor
$ABED$	[1]	aktualisierter Produktionsbedarf nach Programmverschiebung
$AKABH$	[1]	theoretischer Grundbedarf der von Takt- und Montagezeit- unabhängigen AK
$AKABL$	[1]	Ablöser für direkte AK
$AKB$	[1]	Brutto-AK
$AKBVL$	[1]	AK zum Ausgleich des Bandvorlaufs
$AKFEHL$	[1]	AK in Fehlstand
$AKIND$	[1]	indirekt AK
$AKLIN$	[1]	Anzahl der in der Montagelinien erforderlichen AK
$AKNET$	[1]	Netto-AK
$AKPROD$	[1]	theoretischer AK-Grundbedarf
$AKTAG$	[1]	AK zum Ausgleich des Taktausgleichsverlusts
$AKV$	[1]	Anzahl eingestellter AK
$ant$	[%]	Anteil auf anderen Linien durchgeführter ähnlichen AVOs
$AUSL$	[1]	Auslastung
$AZK$	[h]	Stand des AZK
$AZKE$	[Min.]	Entwicklung des AZK
$AZRE$	[Min.]	durchschnittliche reale AZ
$AZV$	[Min.]	verfügbare AZ
$BETRTRAG$	[Tag]	Betriebstage
$BK$	[€]	Betriebskosten
$BWKMO$	[€]	Barwert der Montagekosten im Betrachtungszeitraum T
$DMZ$	[Min]	durchschnittliche Montagezeit
$FSG$	[%]	Gesamt-Fehlstand
$FSG^{AZK}$	[%]	bei der Arbeitszeitkontenrechnung zu berücksichtigender Fehlstand
$FSKR$	[%]	um Schichtlänge korrigierter Fehlstand
$FSUR$	[%]	Urlaubsstand nach Berücksichtigung der Betriebsruhen
$FSURRE$	[%]	Urlaubsstand nach Berücksichtigung der Betriebsruhen und des individuellen Urlaubs
$KAPA$	[1]	Kapazität
$KUMVOL$	[1]	Kumulierte Stückzahl
$MZ$	[Min]	linienabhängige Montagezeit
$PRODVOL$	[1]	Produktionsvolumen
$TARIFL$	[€]	durchschnittlicher Tariflohn
$VerfBNZ$	[Min.]	verfügbare Betriebsnutzungszeit
$WK$	[€]	Wechselkosten bei Anpassungen zwischen zwei Perioden
$ZUS$	[€]	Schichtzuschläge
$ZUSÜ$	[€]	Überstundenzuschläge

## Variablen des Optimierungsmodells

$ x $	Anzahl der Mengenbelegungen für die Variable $x$
$\hat{a}$	Anzahl der AK (Ziel)
$\hat{a}^v$	AK-Verschiebung (Ziel)
$ab$	Anzahl AK in Abordnung (Zustandsvariable)
$af$	Anzahl befristeter AK (Zustandsvariable)
$as$	Anzahl unbefristeter AK (Zustandsvariable)
$av$	Anzahl der zwischen den Montagelinien verschobenen AK (Zustandsvariable)
$b$	Betriebsnutzungszeit (Zustandsvariable)
$d$	Nachfrage (Zustandsvariable)
$n$	Anzahl eingeplanter Schichten (Zustandsvariable)
$p$	Betriebsnutzungszeit während der Pausen (Zustandsvariable)
$r$	Anzahl der Betriebsruhen (Zustandsvariable)
$s$	Schichtbetrieb (Zustandsvariable)
$\hat{s}$	Schichtbetrieb (Ziel)
$s\_azk$	Stand des AZK (Statusvariable)
$s\_br$	Anzahl einbeplanter Betriebsruhen (Statusvariable)
$s\_puffer$	Füllstand des theoretischen Puffers zur Entkopplung von Produktion und Nachfrage (Statusvariable)
$s\_sas$	Anzahl einbeplanter Samstage (Statusvariable)
$s\_takt$	Zeitpunkt der letzten Umtaktung (Statusvariable)
$tz$	Taktzeit (Zustandsvariable)
$\hat{t}z$	Taktzeit (Ziel)
$v$	Programmverteilungsfaktor (Zustandsvariable)
$z$	Anpassungszustand
$\bar{z}$	um Statusvariablen erweiterter Anpassungszustand

## Abstract

Flexibility strategies for assembly shops are described by the number of assembly lines, their level of automation and their product and volume flexibility. To evaluate these strategies in terms of financial efficiency, two cost factors have to be considered: the investment in the flexibility and the benefit of the flexibility during production.

This doctoral thesis proposes the necessary methods and models to anticipate the future benefits of a investment in flexibility. Therefore, based on the concept of hierarchical planning, three components are developed: The “dynamic assembly model”, the “learning curve model” and the “optimization model”. The dynamic assembly model describes the functional dependencies between the tactical assembly planning, the necessary resources and the resulting cost. For example, it calculates the impact of takt times and shift models on the required amount of employees. The learning curve model describes the learning curve effects in the assembly lines. For ramp ups and takt time changes, learning curves for assembly times, uptimes and takt efficiency losses are quantified. Finally, linked to both the dynamic assembly model and the learning curve model, the optimization model calculates the cost optimal solution to use the given flexibility during production. The optimization is executed by dynamic programming. As an example, takt times, the amount of fix and temporary workers, the shift models and the production program are optimized for every period of the production lifecycle. The smaller the anticipated operational cost of the future, the higher the benefits of the planned flexibility.

The models and methods developed were implemented in a decision supporting system named “Lifecycle Adaptation Planner” (LAP). In the case study, the LAP proves the benefits of product flexible assembly lines for the production of innovative compact cars in volatile markets. The higher and constant capacity utilization in the flexible lines is leading to a lower investment and to a reduced necessity of expensive takt time changes. Additionally, learning curves after ramp-ups can be realized with a much higher volume. Thus, assembly times are reduced more quickly and for longer term than in one-product lines with lower volumes.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Um auf eine zunehmende Wettbewerbsintensität und Dynamik der Märkte zu reagieren, steht die Automobilindustrie vor der Herausforderung, innovative Produkte mit kurzen Lebenszyklen am Markt zu positionieren. Um in diesem Umfeld den Aufbau von Überkapazitäten zu vermeiden und profitabel zu produzieren, wird die Planung von *Flexibilitätsstrategien* zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor (vgl. [Radtke et al., 2004], [Warburton, 2004], [Westkämper et al., 2005]).

Prinzipiell können für Flexibilitätsstrategien in der Produktion zwei grundlegende Montagelinienkonzepte unterschieden werden: die produktflexible Linie und die Solitärlinie. Die *produktflexible Montagelinie* kann selbst bei starken Volumenschwankungen konstant ausgelastet werden. Das ist möglich, weil sich Nachfrageänderungen für einzelne Produkte im Produkt-Mix ausgleichen. Man spricht von so genannten Stückzahlen-Ausgleichseffekten. Die effiziente Montage verschiedener Produkte auf einer Linie ist allerdings nur bei ähnlicher Produktstruktur möglich. Unterscheiden sich die Produkte stark, so sinkt durch die hohe Varianz der Arbeitsvorgänge die Effizienz der Arbeitskräfte in der Linie; außerdem steigen die Kosten für produktflexible Anlagen ([Westkämper et al., 2005], [Alden et al., 2002]). Bei diesen Randbedingungen entfalten sich die Stärken der *Solitärlinie*. Sie ist ausgerichtet auf die effiziente Produktion eines innovativen und komplexen Produkts. Nachfrageschwankungen können jedoch nur über eine begrenzte Volumenflexibilität abgefangen werden, die stark abhängig ist von der Personalflexibilität des Standorts.

Beide Strategien lassen sich heute in ihrer Reinform kaum mehr anwenden. Selbst bei innovativen Premiumprodukten erlauben ausgeprägte Nachfrageschwankungen keine konstant hohe Auslastung der fixkostenintensiven Solitärlinien. Und die ständig steigenden Anforderungen an die Produktattraktivität führen dazu, dass Kostenführer in Teilbereichen innovative Produktkomponenten und Varianten einführen müssen, die sich nicht effizient auf produktflexiblen Linien montieren lassen [Westkämper et al., 2005]. Die Wahl der wirtschaftlichsten Flexibilitätsstrategie wird zusätzlich erschwert, weil ein heutiger „Big Player“ der Automobilindustrie mehrere Marktsegmente besetzt. Marken wie Toyota und Lexus, Volkswagen und Audi oder Mercedes-Benz und Chrysler sind in eine Konzernstrategie integriert und vereinen Elemente der Innovations- und Kostenführerschaft.

Insbesondere in der Automobilindustrie wurde die Notwendigkeit einer dynamischen Flexibilitätsplanung und kapazitiver Anpassungsmaßnahmen erkannt (vgl. [Sesterhenn, 2003], [Westkämper et al., 2003], [Holweg et al., 2004]). Infolgedessen sucht die Fabrikplanung nach Produktionssystemen, die ein optimales Maß an technischer und organisatorischer Flexibilität integrieren [Fine et al., 1990]. Hierfür nutzt sie eine Kombination aus produktflexiblen Linien und Solitärlinien [Bish et al., 2000]. Jedoch sind die in der Praxis verwendeten Planungsansätze nicht ausgereift. Sie orientieren sich an fixen Annahmen bzgl. der zukünftigen Rahmenbedingungen des Produktionsbetriebs und basieren stark auf den Erfahrungswerten der Planer (vgl. [Schauerhuber, 1998], [Sesterhenn, 2003]). So ist zu erklären, dass die eingesetzten Methoden die reale Ressourcenauslastung nicht merklich verbessern ([IPA, ISST, 1997], [McKinsey, 2005]).

Die Planungsmethoden der Wissenschaft eignen sich vor allem für anlagenintensive Produktionssysteme. Bei hohen Investitionssummen und geringen kostenwirksamen Entscheidungsmöglichkeiten im Produktionsbetrieb kann bewertet werden, wie schnell sich die implementierte Flexibilität durch eine bessere Kapazitätsauslastung amortisiert (vgl. Konzept der flexiblen Planung, [Schneeweiß, 1992a]). Die Ansätze sind jedoch schwer auf die personalintensive Automobilmontage übertragbar, bei der die Linieneffizienz stark abhängig ist von der Flexibilitätsnutzung im Produktionsbetrieb und von den damit verbundenen Lernkurveneffekten.

## **1.2 Ziel der Arbeit**

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Modelle und Methoden erarbeitet werden, die eine Bewertung des Nutzens der implementierten Systemflexibilität ermöglichen. Dafür sollen die zu erwartenden operativen Montage-Betriebskosten bei gegebener Flexibilität berechnet werden. Je geringer diese Montage-Betriebskosten ausfallen, desto höher der Nutzen der Investition in die Flexibilität des Montagesystems. Dabei sollen markt-, produkt- und standortspezifische Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, muss das Montagesystem an zukünftige Flexibilitätsbedarfe angepasst werden. Markt- und Produktentwicklungen spiegeln sich wider in einem variierenden Produktionsvolumen und in veränderten Montagezeiten der Produkte. Als Flexibilitätsangebot steht die implementierte Volumen-, Produkt- und Nachfolgeflexibilität der Montagelinien zur Verfügung. Z. B. kann bei einem Nachfragerückgang die Taktzeit erhöht

oder die Betriebsnutzungszeit gesenkt werden. Auch die Neuverteilung des Produktionsprogramms auf die Montagelinien ist möglich, um beispielsweise einen reduzierten Schichtbetrieb voll auszulasten. Die Personalflexibilität als grundlegende Flexibilitätsart ermöglicht dabei Ein- und Ausstellungen, Arbeitszeitvariationen und Verschiebungen von Arbeitskräften zwischen Montagelinien.

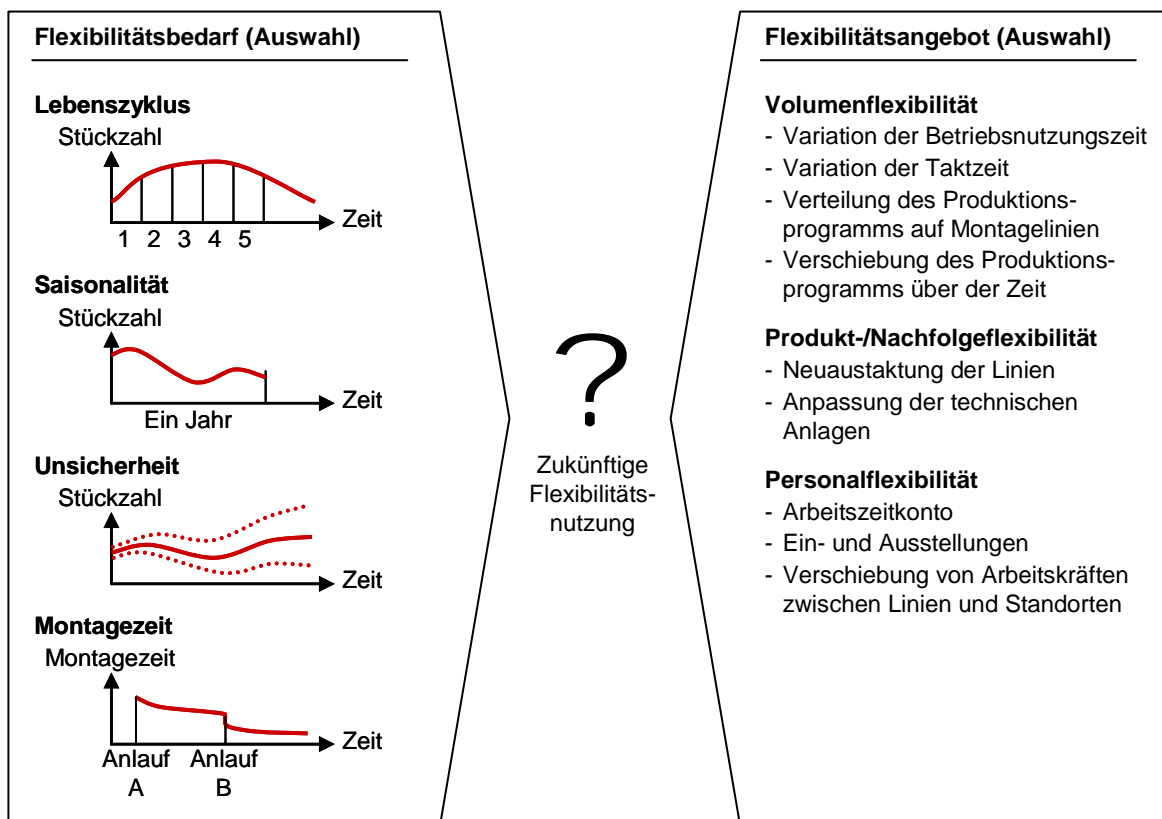


Abbildung 1: Flexibilitätsnutzung als Abstimmung von Flexibilitätsbedarf und Flexibilitätsangebot

Das Vorgehen zur Bewertung des Flexibilitätsnutzens baut auf dem Konzept der hierarchischen Planung auf [Schneeweiß, 1999]. Um zukünftige Betriebskosten ermitteln zu können, sollen die Anpassungsmaßnahmen „antizipiert“ werden. M.a.W. soll vorhergesagt werden, wie die implementierte Flexibilität operativ genutzt wird. Dabei ist insbesondere die zeitliche Dynamik zu berücksichtigen: Erstens erfolgt die Flexibilitätsnutzung situativ in Abhängigkeit der gegebenen Rahmenbedingungen. Zweitens verursacht die Nutzung der technischen und organisatorischen Flexibilitätsinstrumente Effizienzverluste, die über betriebliche Lerneffekte wieder reduziert werden.

Die Arbeit soll in der Praxis nutzbare Ergebnisse liefern. Aus diesem Grund wird die Umsetzung eines Planungswerkzeugs angestrebt, das der strategischen Montageplanung zur Bewertung alternativer Flexibilitätsstrategien dient.



### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Bevor die erforderlichen Modelle und Methoden erarbeitet werden, erfolgt in Kapitel 2 und 3 eine Einführung in die Montage- und Flexibilitätsplanung: Im zweiten Kapitel werden die Anforderungen an die Planung von Flexibilitätsstrategien für die Automobilmontage herausgearbeitet. Das dritte Kapitel zeigt eine Übersicht der bereits existierenden Planungsmodelle zur Antizipation der Flexibilitätsnutzung. Neben dem Einsatz von Optimierungsverfahren wird das Konzept der System Dynamics erläutert. Die Verfahren und ihre Anwendungen werden kritisch diskutiert, um Defizite aufzuzeigen und den Handlungsbedarf abzuleiten.

In den Kapiteln 4 und 5 werden die Modelle und Methoden für die Planung von Flexibilitätsstrategien entwickelt. Im vierten Kapitel wird ein allgemeines Modell des Montagebetriebs aufgebaut. Das Modell erlaubt die Kostenbewertung des Montagebetriebs. In Kapitel 5 werden Lernkurven- und Optimierungsmodelle erarbeitet, die eine Antizipation der zukünftigen Flexibilitätsnutzung ermöglichen. Abschließend wird die Umsetzung der Modelle im Planungswerkzeug „Lifecycle Adaptation Planner“ LAP präsentiert.

Im sechsten Kapitel werden die Modelle und Methoden validiert und kritisch beurteilt. Dafür werden verschiedene Flexibilitätsstrategien für Kompaktklassefahrzeuge bewertet. Die Bewertung basiert auf verallgemeinerten Referenzwerten und zeigt das Potenzial produktflexibler Montagelinien für innovative Fahrzeuge auf. Die Arbeit schließt im siebten Kapitel mit einer Zusammenfassung. Hier wird ein Ausblick auf offene Handlungsfelder und zukünftige Arbeiten gegeben.

## 2 Herausforderung flexible Endmontage

### 2.1 Montageplanung

Aufgrund gesättigter Triademärkte steigt heute für die Automobilindustrie die Wettbewerbsintensität und die Marktunsicherheit. Um in diesem Umfeld bestehen zu können, müssen die Hersteller ihre Produktattraktivität steigern und gleichzeitig ihre Produktionskosten senken. Der Innovationsdruck schlägt sich nieder in verkürzten Produkt-Lebenszyklen und Nischenprodukten, deren Variantenreichtum und Innovationsgrad die Automobilindustrie, unabhängig von ihrer strategischen Ausrichtung, vor neue Herausforderungen stellt [Westkämper et al., 2005]. Bevor in diesem Kapitel auf die Auswirkungen des zunehmenden Wettbewerbs auf die Fabrik- und Montageplanung eingegangen wird, wird die Montage in die Automobilfabrik eingeordnet und mit ihren wesentlichen Merkmalen dargestellt. Außerdem wird die Montageplanung als Teilgebiet der Fabrikplanung mit ihren Gestaltungsfeldern beschrieben.

#### 2.1.1 Montage in der Automobilfabrik

Automobilfabriken sind typischerweise in drei Gewerke untergliedert<sup>1</sup>. Im ersten Gewerk, dem Rohbau, werden in hoch automatisierten Prozessen die Karosserien gefügt. Personalkosten entstehen hauptsächlich für Instandhaltungs- und Logistik-Umfänge. Im zweiten Gewerk, der ebenfalls hoch automatisierten Lackierung, erfolgt die Oberflächenbehandlung der Karosserie. Im Gewerk Montage wird im Anschluss das Endprodukt einschließlich seiner wichtigen Module montiert. Eine Entkopplung der Gewerke erfolgt durch Puffer. Sie nehmen Aufgaben der *Störungs- und Schichtentkopplung* wahr. Zusätzlich ermöglichen sie eine Sequenzierung der Fahrzeuge für die nächste Produktionsstufe und somit eine günstige Produktionsreihenfolge [Baumgärtel, 1999].

---

<sup>1</sup> Teilweise wird das Presswerk als ein weiteres Gewerk bezeichnet.

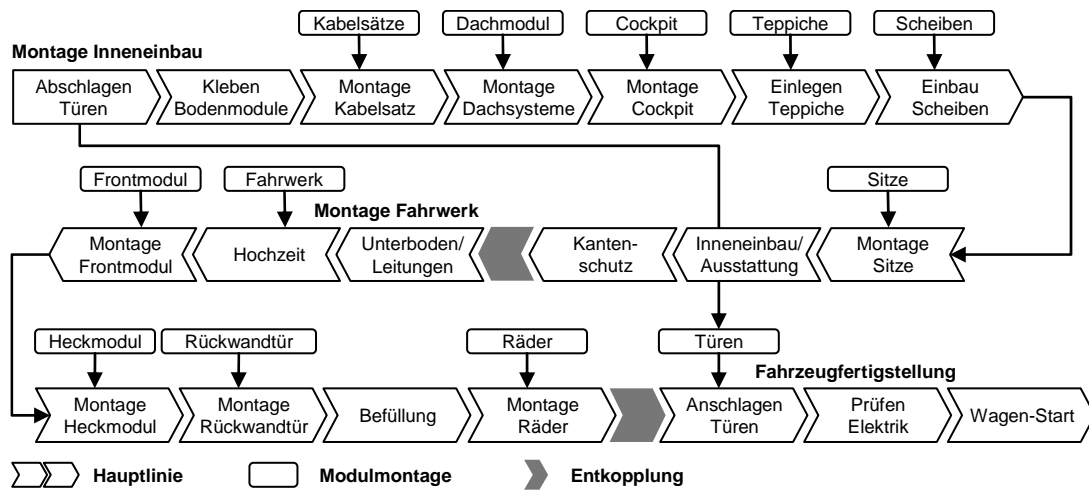


Abbildung 2: Exemplarische Montagelinie und ihre Bereiche als Element der Automobilfabrik

Abbildung 2 stellt eine *Montagelinie* als Element der Automobilfabrik dar. Sie besteht aus mehreren Bereichen, die sich jeweils nach ähnlichen Arbeitsinhalten klassifizieren lassen und mit Anforderungen an die Produkt-Zugänglichkeit und an die Fördertechnik verbunden sind:

- *Hauptlinien:* Auf ihnen wird das Endprodukt montiert. Sie gliedern sich in drei Abschnitte. Im *Inneneinbau* erfolgt die Montage der Interieurelemente und der Module, im *Fahrwerksbereich* der Zusammenbau von Unterboden und Chassis. Die *Fahrzeugfertigstellung* umfasst letzte Montageumfänge und qualitätssichernde Maßnahmen.
- *Modulmontagen:* Auf ihnen werden Fahrzeugmodule, beispielsweise Türen, Cockpits und Aggregate montiert.

Die Bereiche einer Montagelinie sind in Bezug auf Schichtentkopplung und Sequenzbildung starr verkettet. Die *Taktzeit* der Linie orientiert sich an der Nachfrage und an der zur Verfügung stehenden *Betriebsnutzungszeit*<sup>2</sup>. Beide legen die Kapazität der Linie fest. Die Taktzeit gibt gleichzeitig die verfügbare Arbeitszeit pro Arbeitsstation vor.

Arbeitsstationen der Montagelinie können automatisiert werden. Typischerweise liegt der Automatisierungsgrad bei unter 5% [Holweg et al., 2004]. Dieser im Vergleich zu den Gewerken Rohbau und Oberfläche geringe Automatisierungsgrad der Montage spiegelt sich wider in ihrer *Kostenstruktur*. Während die Investition in eine Montagelinie zwischen 50 und 200 Millionen Euro liegt, übersteigen die Personalkosten in Deutschland diese Werte bereits nach wenigen Jahren.

<sup>2</sup> Sie wird auch als Nettoarbeitszeit bezeichnet (vgl. Abschnitt 2.3.1)

### 2.1.2 Montageplanung und ihre Gestaltungsfelder

Die Fabrikplanung als produktionswirtschaftliche Disziplin beschäftigt sich mit der Gestaltung von Fabriken und mit der rationellen Verwirklichung von Investitionsvorhaben [Schmigalla, 1995]. Zu ihren Aufgaben gehören „*die Analyse, Zielfestlegung, Funktionsbestimmung, Dimensionierung, Strukturierung, Integration und Gestaltung von Fabriken als System, wie auch ihrer Teilsysteme, Elemente, Substrukturen und Prozesse*“ [Wiendahl, 1996]. In ihrem Ablauf orientiert sich die Fabrikplanung an der Durchführung von Problemlösungsprozessen. Regelkreisbasiert und in iterativen Detaillierungsschritten führt die Planung zu einem an die Anforderungen angepassten System [Dangelmaier, 2002].

Die Montageplanung stellt einen speziellen Bereich der Fabrikplanung dar. Ihr Gestaltungsobjekt ist die Montage. Ziel der Planung ist die Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit des Automobilherstellers. Es wird erreicht, wenn die Montage des Produktionsprogramms wirtschaftlich, qualitätsorientiert, vorausschauend sowie mengen-, termin-, zielpreis- und variantengerecht erfolgt [März et al., 2001]. Grundsätzlich müssen bei der Planung des Montagesystems alle die Montageplanung tangierenden Bereiche integriert werden. Neben der gewerkeübergreifenden Fabrikplanung sind das u.a. die Entwicklung, der Vertrieb, die Finanz-, die Logistik- und die Personalplanung [Balve et al., 2001]. Bestimmte Vorgaben sind vereinfachend als Ausgangspunkte für die Investitionen anzusehen:

- Das vom Vertrieb prognostizierte *Produktionsprogramm* repräsentiert die zukünftige Nachfrage nach den zu produzierenden Fahrzeugen über der Zeit. Abgebildet werden wirtschaftliche, lebenszyklusbedingte und saisonale Schwankungen.
- Der *Vorranggraph* definiert die Montagereihenfolge der Produktkomponenten. Reihenfolgerestriktionen für die Durchführung der Fügevorgänge sind in ihm berücksichtigt.
- Die *Produktgeometrie* bestimmt die Abmessung der Bauteile. Gleichzeitig legt sie die Aufnahmepunkte der Karosserie für die Fördertechnik fest.

Sind diese Randbedingungen gesetzt, so reduziert sich das Ziel der Montageplanung auf die Gestaltung eines nachhaltig wirtschaftlichen Montagesystems für gegebene Produkte an einem Standort. Zu diesem Zweck können im Rahmen der Investitionsplanung zwei Gestaltungsfelder unterschieden werden: Die technischen Anlagen und die Austaktung der Montagelinien. Beide Gestaltungsfelder determinieren die Wirtschaftlichkeit der Linie und werden im Folgenden beschrieben:

## **Gestaltungsfeld „technische Anlagen“**

In das Gestaltungsfeld „technische Anlagen“ fallen alle Betriebsmittel, die einen Montagefortschritt im Sinne der Ziele des Montagesystems bewirken. Hierzu gehören z.B. Fördertechnik, Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen sowie Mess- und Prüfeinrichtungen [Zeile, 1995]. Erfolgt die Planung für eine einzelne Montagelinie, so lassen sich die wesentlichen Eigenschaften der technischen Anlagen unmittelbar aus den vertriebs- und entwicklungsseitigen Vorgaben ableiten. Beispielsweise bestimmt die maximal erwartete Nachfrage die Taktzeit der Linie, und der Modularisierungsgrad der Fahrzeuge gibt die erforderlichen Modulmontagen vor. Die Planung wird hingegen komplexer, wenn in mehrere Hauptlinien investiert werden kann: Um eine wirtschaftliche Produktion zu ermöglichen, wird z.B. das variantenreiche Produktionsprogramm auf Linien mit geringer Taktzeit montiert, während standardisierte Volumenprodukte über die schnell getakteten und stärker automatisierten „Rennerlinien“ laufen. Aussagen zur Produktallokation sind dann aufgrund der Vielzahl von Systemalternativen schwer kostenoptimal zu treffen [Inman et al., 1997].

Besondere Relevanz bei der Ausgestaltung der technischen Anlagen hat die Automatisierung von Arbeitsvorgängen. Sie ist nicht nur aus wirtschaftlichen, sondern auch aus qualitativen und ergonomischen Gründen erforderlich. Exemplarisch seien automatisierte Klebprozesse und die maschinelle Handhabung von Großmodulen genannt. Während jedoch qualitative und ergonomische Randbedingungen zum Großteil vorgegeben sind, müssen wirtschaftliche Gesichtspunkte durch die Montageplanung untersucht werden: Es gilt zu bewerten, in wieweit eine Automatisierung die manuelle Montagezeit reduziert, wodurch Personalbedarfe im direkten Bereich gesenkt werden können [Kratzsch, 2001].

## **Gestaltungsfeld Austaktung**

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. Dieser Planungsvorgang erfolgt heute manuell oder softwaregestützt. Zuerst werden die Füge-Tätigkeiten am Produkt, die Handhabungs- und die Wegezeiten der Mitarbeiter, z.B. auf Basis der MTM<sup>3</sup>-Methode, zeitlich definiert. Anschließend werden sie als *Tätigkeitszeiten* eingeplant.

---

<sup>3</sup> Aus dem Englischen: Methods Time Measurement.

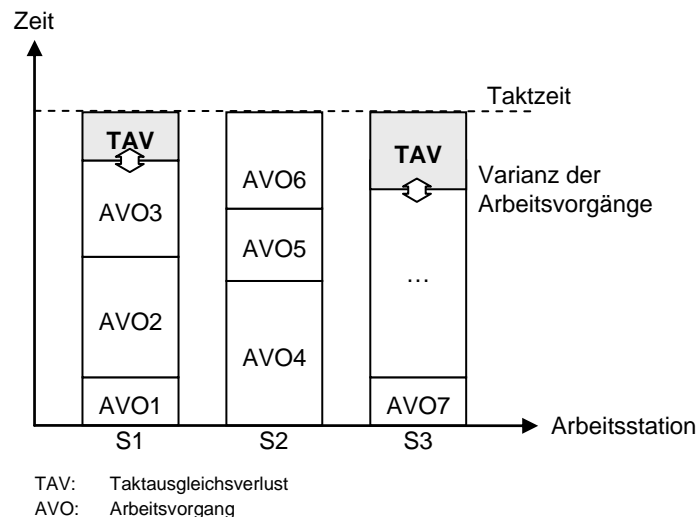


Abbildung 3: Auslastung der Arbeitsvorgänge auf die Taktzeit

Die daraus resultierende Auslastung der Mitarbeiter pro Station wird durch den *Taktausgleichsverlust* beschrieben (vgl. Abbildung 3). Er gibt an, zu wie viel Prozent der Taktzeit die Mitarbeiter keine Tätigkeiten ausführen. Ein hoher Taktausgleichsverlust, u.a. ausgelöst durch eine hohe Varianz der Arbeitsvorgänge, führt zu einem Mehrbedarf an Arbeitskräften und Stationen in der Linie und senkt folglich die Effizienz. Als Maßgröße für die Güte der Auslastung wird die von den direkten Arbeitskräften zu erbringende *Montagezeit* definiert. Sie beinhaltet neben der Tätigkeitszeit die Zeiten des Taktausgleichsverlusts.

### 2.1.3 Auswirkungen zunehmender Wettbewerbsintensität auf die Montageplanung

Eine wesentliche Herausforderung der automobilen Fabrikplanung liegt in den hohen Fixkosten. Technische Anlagen wie Rohbauten, Lackierungen und Montagelinien erfordern Investitionen im Bereich mehrerer hundert Millionen Euro, und auch Personalkosten sind in westlichen Industrienationen zum Großteil den Fixkosten zuzuordnen [Westkämper, 2002]. Dies liegt u.a. darin begründet, dass bei komplexen arbeitsrechtlichen Rahmenbedingungen Entlassungen schwer möglich sind bzw. das Image des Unternehmens schädigen [Dembrowsky, 1998].

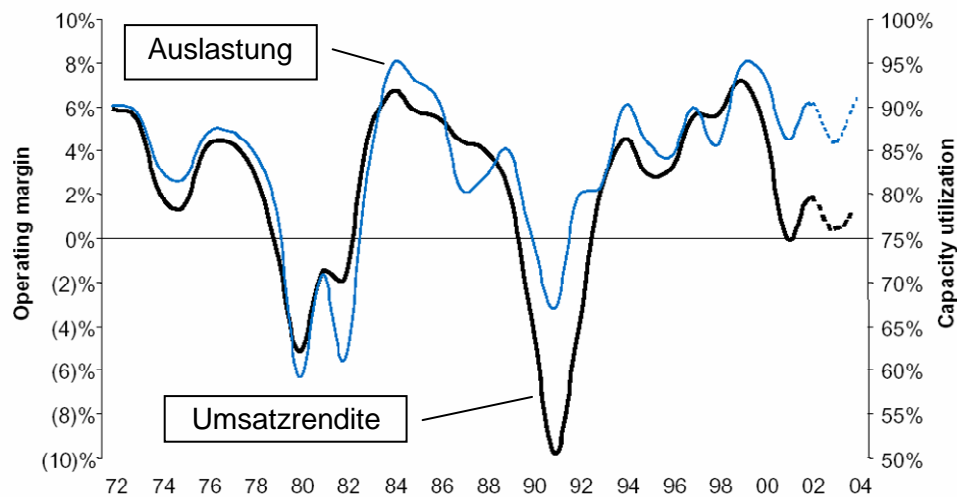


Abbildung 4: Umsatzrendite und Auslastung nordamerikanischer Automobilhersteller von 1972 bis 2004 [Warburton, 2004].

Fixkosten gefährden insbesondere dann die wirtschaftlichen Ziele einer Unternehmung, wenn die ursprünglich geplante Auslastung der Kapazitäten nicht erreicht wird. Abbildung 4 verdeutlicht diesen Zusammenhang: Ressourcenauslastung und Umsatzrendite korrelieren bei nordamerikanischen Automobilherstellern stark [Warburton, 2004]. Diesen Sachverhalt bestätigen verschiedene Studien, in denen die geringe Ressourcenauslastung als wesentliche Herausforderung der Hersteller im Produktionsbereich identifiziert wird (vgl. [McKinsey, 2004], [Warburton, 2004], [Westkämper et al., 2001]). Beispielsweise wird aufgezeigt, dass die 50-prozentige Auslastung eines Montagewerks zu Kosten von über 70 Prozent der Vollauslastung führt [Holweg et al., 2004]. Die Montageplanung steht vor der Herausforderung, die Investitionen in technische und bei geringem Automatisierungsgrad vor allem personelle Kapazitäten zu optimieren, um nicht in eine Auslastungsfalle zu geraten [Warburton, 2004]. Hierbei sind insbesondere die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- *Marktdynamik:* Das Nachfrageverhalten der Kunden drückt sich in *Lebenszykluskurven* für die Produkte aus. Je stärker die Nachfrage von Trends und Konjunktur bestimmt wird, desto ausgeprägter und unsicherer sind die Kurven. Gleichzeitig verteilt sich die Nachfrage nicht gleichmäßig auf die Kalendermonate, sondern variiert über das Jahr. Cabrios verkaufen sich im Frühjahr und Sommer besser, während Fahrzeuge mit Allrad-Antrieb im Winter verstärkt nachgefragt werden. Es wird von einer *Saisonalität* der Nachfrage gesprochen.
- *Produkt- und Prozessänderungen:* Der Kosten-, Qualitäts- und Innovationsdruck führt zu einer stetigen Weiterentwicklung der Produkte und der technischen Prozesse. Geringfügige Anpassungen werden zunehmend in der laufenden Serie vorgenommen, und bei Neuprodukten werden Innovationen eingeführt. Auch die Wertschöpfungstiefe

verändert sich. Das erfordert insbesondere bei An- und Ausläufen ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit der Produktionssysteme.

- *Betriebliche Lerneffekte*: Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit sind kontinuierliche Effizienzsteigerungen im Montagebetrieb erforderlich. Sie werden durch kontinuierliche Verbesserungsprozesse und Lerneffekte der Mitarbeiter realisiert. Um das wirtschaftliche Potenzial zu heben, müssen die Montagelinien kontinuierlich angepasst werden.

Voraussetzung für eine Reduktion des Auslastungsrisikos ist, dass Anpassungen an eine veränderte Nachfrage und an veränderte Produkte und Prozesse wirtschaftlich tragbar sind. Diesen Zusammenhang haben die Unternehmen branchenübergreifend erkannt und reagieren über eine höhere Gewichtung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung [Westkämper et al., 2003]. Die Frage der optimalen Ressourcenauslastung von Anlagen und Personal ist demzufolge eine Frage der richtigen *Flexibilität* [Sesterhenn, 2003]. Sie wird als Handlungsfeld der Fabrikplanung im folgenden Kapitel beschrieben.

## **2.2 Flexibilität in Produktionssystemen**

In den vorangehenden Kapiteln wurden die Grundlagen und die Herausforderungen der Montageplanung beschrieben. Es wurde angedeutet, dass Flexibilität ein Mittel zur Reaktion auf Veränderungen der Produkte<sup>4</sup> und der Nachfrage darstellt. In diesem Kapitel erfolgt eine allgemeine Einführung in die Flexibilität und in ihre Planung. Hierfür werden in einem ersten Schritt Flexibilitätsbegriffe definiert. Darauf aufbauend wird der hierarchische Planungsprozess als Grundlage der Flexibilitätsplanung für Produktionssysteme identifiziert. Das Kapitel dient damit als Grundlagen für Kapitel 2.3, in dem die Planung von flexiblen Montagesystemen konkretisiert wird.

### **2.2.1 Flexibilität als fabrikplanerisches Handlungsfeld der Kostenreduktion**

In diesem Abschnitt wird, zuerst ausgehend von allgemeinen Definitionen des Begriffs Flexibilität, eine für diese Arbeit zweckmäßige Definition gesucht. Um auf die Montage anwendbar zu sein, muss diese technische und betriebswirtschaftliche Aspekte berücksichtigen. Dann wird aufgezeigt, dass Flexibilität grundsätzlich kontext- und bedarfsspezifisch ist und dass aus diesem Grund zwischen Flexibilitätsbedarf und Flexibilitätsangebot unter-

---

<sup>4</sup> Im Rahmen der Arbeit umfassen Produktänderungen im Folgenden auch Prozessänderungen.



schieden werden muss. Schließlich werden Anpassungsbefähiger zur Realisierung des Flexibilitätsangebots aufgezählt.

### **Einführung in den Flexibilitätsbegriff**

Infolge der zunehmende Dynamik und Unsicherheit im industriellen Umfeld existieren eine Vielzahl von Arbeiten zur Flexibilität. Der Begriff Flexibilität, abgeleitet vom lateinischen „flectere“ (biegen), wird bereits seit den 30er Jahren in der betriebswirtschaftlichen Literatur verwendet [Pibernik, 2001]. Er lässt sich als die Fähigkeit beschreiben, auf Veränderungen des Umfelds angemessen reagieren zu können ([Wolf, 1989], [Schneeweiß, 1992]). Westkämper erweitert diese Definition um den Aspekt des Vordenkens der Anpassungsmöglichkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf seine Definition zurückgegriffen: *„Ein System wird als flexibel bezeichnet, wenn es im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs von Merkmalen sowie deren Ausprägungen an veränderte Gegebenheiten reversibel anpassbar ist“* [Westkämper et al., 2000a].

Die Bedeutung der Flexibilität für ein System ist kontextspezifisch bestimmt über dessen *Flexibilitätsbedarf* [Haller, 1999]. Dieser wird ausgelöst durch Veränderungen im Systemumfeld. Um die Deckung des Bedarfs und damit eine hohe Reaktionsfähigkeit sicher zu stellen, wird zum Planungszeitpunkt in ein *Flexibilitätsangebot* des Systems investiert. Dieses kann im späteren Systembetrieb im Sinne eines Potenzials genutzt werden (vgl. [Schneeweiß, 1992a], [Westkämper et al., 2000a]).

In Abbildung 5 ist der Zusammenhang am Beispiel dynamischer und unsicherer Stückzahlen verdeutlicht. Ein starres, kostengünstiges Produktionssystem kann bei geringer Dynamik und Unsicherheit der Stückzahlen auf einen hoch effizienten Betriebspunkt ausgelegt sein. Geringe Abweichungen des Produktionsprogramms führen dann allerdings zu einem erheblichen Anstieg der Stückkosten. Flexible Produktionssysteme sind im optimalen Betriebspunkt häufig nicht so effizient wie starre Anlagen, sie erlauben jedoch Anpassungen an die hohe Dynamik und Unsicherheit und damit eine wirtschaftliche Produktion. Die Nutzung des Flexibilitätsangebots erfolgt bei Bedarf kontinuierlich über der Zeit, so dass dauerhaft in einem wirtschaftlichen Betriebspunkt produziert werden kann [Westkämper, 2002].

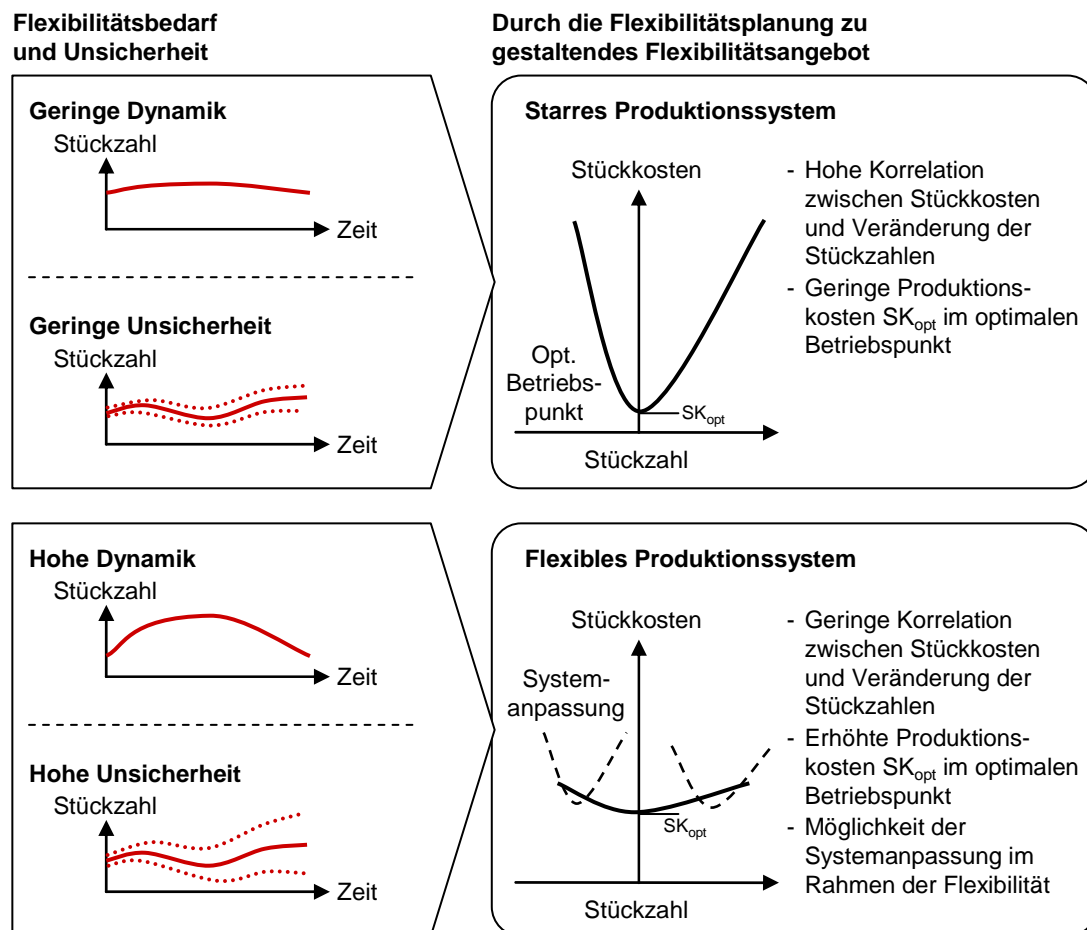


Abbildung 5: Flexibilitätsbedarf und angepasste Produktionssysteme am Beispiel von Nachfrageschwankungen

Dabei ist festzustellen, dass Flexibilität nicht prinzipiell zu höheren Stückkosten im optimalen Betriebspunkt führt. Z. B. können bei flexiblen Anlagen Skaleneffekte im Einkauf umgesetzt werden, wenn nicht in unterschiedliche Einzelanlagen, sondern in flexible Anlagen des gleichen Typs investiert wird. Außerdem lassen sich durch die Standardisierung von Anlagen die Wartungs- und Instandhaltungskosten senken. Allerdings bleibt festzuhalten, dass die Bewertung von Flexibilität insbesondere dann wichtig ist, wenn sich Kostenunterschiede zwischen flexiblen und nicht flexiblen Systemen abzeichnen. Als Grundlage dafür ist die Flexibilität modellhaft zu beschreiben.

### Definition von Flexibilitätsarten

Es wird vielfach angemerkt, dass Flexibilität kein Unternehmensziel an sich darstellt, sondern übergeordnete Unternehmensziele unterstützt ([Slack, 1989], [Schuh et al., 2005]): Im Rahmen der Arbeit soll ein vorgegebenes innovatives, variantenreiches, dynamisches und unsicheres Produktionsprogramm zu minimalen Kosten produziert werden. Die in diesem Abschnitt definierten *Flexibilitätsarten* erlauben eine Umsetzung dieser Ziele, indem sie ein bestimmtes Flexibilitätsangebot vorgeben. Die Definitionen basieren auf der Arbeit von

Brown et al. Ihr Schwerpunkt liegt auf flexiblen Fertigungssystemen [Brown et al., 1984]. Sethi et al. erweitern das Klassifikationsschema und liefert ein umfassendes Verzeichnis der verschiedenen Flexibilitätsarten [Sethi et al., 1990]. Angesichts der Vielzahl von Definitionen wird an dieser Stelle auf eine vollständige Darstellung verzichtet (vgl. u.a. [De Toni et al., 1998]). Es wird nur auf die montage- und arbeitsrelevanten Flexibilitätsarten eingegangen [Tidd, 1997]:

- Die *Volumenflexibilität* beschreibt die Fähigkeit, variierende Stückzahlen wirtschaftlich fertigen zu können.
- Die *Produktflexibilität* beschreibt die Fähigkeit, verschiedene Produkte oder Varianten fertigen zu können<sup>5</sup>. Ziel ist die Nutzung von Skaleneffekten und eine Reduktion der erforderlichen Volumenflexibilität bei reduzierter Gesamtkapazität. Es wird von einer *Produktmixflexibilität* gesprochen, wenn unterschiedliche Produktmix-Verhältnisse produzieren zu können. Dies ist in getakteten Linien keineswegs trivial, da die Austaktung der Linie ein bestimmtes Verhältnis der Produkte voraussetzt.
- Die *Routenflexibilität* beschreibt die Fähigkeit, ein Produkt auf unterschiedlichen Wegen durch das System zu schleusen. Es existieren redundante Wege, die erlauben, Kapazitätsengpässe zu umgehen. Dies bedeutet für die Montage, dass ein Produkt auf mehreren Linien gefertigt werden kann.
- Die *Nachfolgefähigkeit* beschreibt die Fähigkeit, das Produktionssystem für neue Produkte zu nutzen. Ziel ist die Vermeidung von Investitionen.

Die vorgestellten Flexibilitätsarten veranschaulicht Abbildung 6 mit den dazugehörigen Produktallokationen und ihren wichtigsten Vorteilen bzgl. der Auslastung des Produktionssystems. Eine detaillierte Darstellung der Vor- und Nachteile im Rahmen von Flexibilitätsstrategien für Montagesysteme wird in Kapitel 2.3 durchgeführt.

---

<sup>5</sup> Die Möglichkeit, verschiedene Produktvarianten fertigen zu können, wird häufig als Variantenflexibilität bezeichnet. Da sich die Begriffe Produkt- und Variantenflexibilität lediglich bezüglich der Ausprägung der Produktunterschiede differenzieren, werden sie in dieser Arbeit nicht unterschieden.

Flexibilitatsart	Produktallokation	Auslastungseffekt
Volumenflexibilität	P1 ○ — □ L1	<p>Kapazitätsanpassung</p>
Produkt(mix)-flexibilität	P1 ○ P2 ○ — □ L1	<p>Stückzahlen-Ausgleichseffekte</p>
Routenflexibilität	P1 ○ — □ L1 □ L2	<p>Höchste Auslastung</p> <p>Abfangen der Spitzenlast</p>
Nachfolgeflexibilität	P1 ○ — □ L1 P1' ○ — □ L1	<p>Reduktion der Investitionssummen</p>

○ Produkt    □ Linie

Abbildung 6: Flexibilitätsarten und ihre Auswirkungen auf die Auslastung der Montagelinien

## Realisierung der Flexibilitätsarten durch Anpassungsbefähiger

Die Gestaltung der Flexibilitätsarten erfordert, dass dem System und seinen Elementen konkrete Eigenschaften zugeordnet werden, die im Produktionsbetrieb als Flexibilitätspotenzial genutzt werden können. Sie erlauben eine Reaktion auf den Flexibilitätsbedarf und determinieren die durch Investitionen und Produktionsbetrieb entstehenden Kosten. Hernandez identifiziert sechs *Anpassungsbefähiger*, die neben der *Überdimensionierung* als Gestaltungsparameter für Produktionssysteme zur Verfügung stehen<sup>6</sup>. Sie erlauben eine spätere Anpassung des Systems [Hernandez, 2003]:

- Die *Mobilität* ermöglicht eine Beweglichkeit von Objekten. Sie bezieht sich nicht nur auf klassische Mobilien, sondern auch auf Immobilien wie z.B. Gebäude.
- Die *Erweiter- und Reduzierbarkeit* (auch: Skalierbarkeit) beschreibt räumliche Freiheitsgrade, die eine Ausdehnung oder Schrumpfung von Objekten erlauben.

<sup>6</sup> Hernandez bezieht sich insbesondere auf technische Anlagen und Gebäude. Aus theoretischer Sicht können die Anpassungsbefähiger jedoch auch auf Mitarbeiter bezogen werden. Die daraus resultierende *Personalflexibilität* wird in Abschnitt 2.3.1 beschrieben.

- Die *Modularität* geht von über standardisierte Schnittstellen verknüpften Objekten aus, so dass der einfache Austausch einzelner Module möglich ist.
- Die *Funktions- und Nutzungsneutralität* stellt sicher, dass die Objekte für vielfältige Funktionen eingesetzt werden können.
- Die *Vernetzungsfähigkeit* und die *Desintegrations- und Integrationsfähigkeit* beschreibt die Eigenschaft, verschiedenartige Beziehungen im System aufwandsarm bilden zu können.

### **Nutzung der Flexibilität in Aktionen**

In Anlehnung an Schneeweiß wird davon ausgegangen, dass die Nutzung des Flexibilitätsangebots, also die Nutzung der Flexibilitätsarten und ihrer Anpassungsbefähiger, in *Aktionen* erfolgt. Sie zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus [Schneeweiß et al., 1990]:

- Die *Zielgerichtetheit* der Aktion beschreibt die aktive Ausrichtung der Aktion auf einen bestimmten Flexibilitätsbedarf.
- Das *Aktionsvolumen* beschreibt die Menge aller Aktionen, die zur Anpassung zur Verfügung stehen.
- Der *Anpassungsumfang* stellt das Ausmaß der Aktion dar. Diese kann von einer reinen Nutzung der Systemelastizität bis hin zu strukturellen Anpassungen des Systems gehen.
- Die *Reagibilität* beschreibt die Zeitspanne, nach der eine Aktion wirksam wird.
- Die *Planungsfähigkeit* der Aktion beschreibt die Vorhersehbarkeit der Aktion zum Planungszeitpunkt.

Zukünftige Aktionen sind schwer vorherzusehen. Damit wird die Planung der zu implementierenden Flexibilitätsarten und ihrer Anpassungsbefähiger zur Herausforderung. Es besteht das Risiko, ein überdimensioniertes, nicht an den Flexibilitätsbedarf angepasstes Flexibilitätsangebot aufzubauen. Dieser Herausforderung sieht sich die Flexibilitätsplanung gegenüber gestellt. Ihre Aufgabe ist die Abstimmung von Flexibilitätsbedarf und Flexibilitätsangebot und damit die Vorbereitung des Systems auf potenzielle zukünftige Umweltentwicklungen [Hopfmann, 1988].

## 2.2.2 Planung von Flexibilitätsstrategien als hierarchischer Planungsprozess

Nach der Einführung in den Flexibilitätsbegriff wird in diesem Abschnitt beantwortet, wie die Flexibilitätsplanung prinzipiell vonstatten geht und welche Faktoren bei der Abstimmung von Flexibilitätsbedarf und Flexibilitätsangebot zu berücksichtigen sind. Um eine ganzheitliche Sicht auf die Planung der Systemflexibilität zu erhalten, wird der Begriff der *Flexibilitätsstrategie* eingeführt. Er orientiert sich am Begriff der Produktionsstrategie nach Hopfmann und beschreibt, welche Flexibilitätsarten in das System implementiert werden und welche Zielrichtung damit angestrebt wird. Die Flexibilitätsstrategie ist eingebettet in die Wettbewerbs- und Marktstrategie des Unternehmens und dient den hier definierten Zielen. Sie lässt sich anhand der Erfolgsfaktoren Kosten, Qualität und Lieferzeit bewerten [Hopfmann, 1988].

Als Grundlage der Flexibilitätsplanung wird im Folgenden auf das Konzept der hierarchischen Planung eingegangen. Es basiert auf dem Erkenntnis, dass zeitlich vorgelagerte strategische Entscheidungen in ihren Auswirkungen auf zeitlich nachgelagerte taktische und operative Bereiche beurteilt werden müssen [Upton, 1994]: Der Produktionsbetrieb und damit die zukünftige Flexibilitätsnutzung werden „antizipiert“.

### **Flexibilitätsplanung als Antizipation der Flexibilitätsnutzung**

Die *hierarchische Planung* spielt bei der Planung von Flexibilitätsstrategien eine besondere Rolle [Schneeweiß, 1999]. Die Planung wird in nicht gleichrangige Teilplanungen zerlegt, so dass geordnete Planungsebenen entstehen. Diese werden im Zwei-Ebenen-Fall als Top- und Basis-Planung bezeichnet. Die Top-Planung legt die (strategischen) Rahmenbedingungen für die (operative) Basis-Planung fest. Um zielgerichtet Rahmenbedingungen zu schaffen, antizipiert die Top-Planung die Auswirkungen ihrer Entscheidungen auf die zeitlich nachgelagerte Basis-Planung. In Abbildung 7 wird das Konzept der hierarchischen Planung auf die Planung von Flexibilitätsstrategien angewandt.

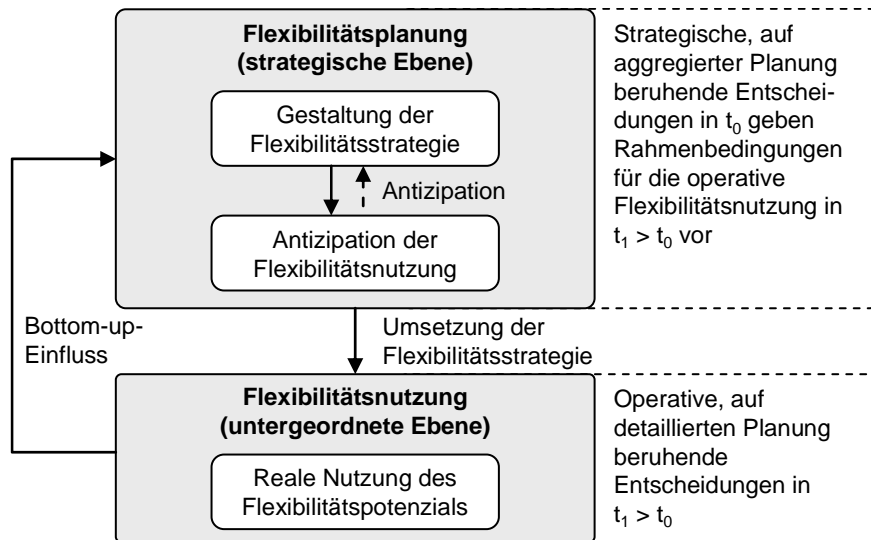


Abbildung 7: Hierarchischen Flexibilitätsplanung (i.A. an [Schneeweiß, 1999])

Die Flexibilitätsplanung findet als Top-Planung zeitlich vor der operativen *Flexibilitätsnutzung* der Basis-Planung statt und legt damit deren Reaktionsmöglichkeiten fest [Pibernik, 2001]. Um eine zielgerichtete und damit nutzenorientierte Gestaltung der Flexibilitätsstrategie zu gewährleisten, wird die Flexibilitätsnutzung der untergeordneten Ebenen bei erwarteten Randbedingungen antizipiert [Schneeweiß, 1999]. Die Antizipation dient als Grundlage für die Bewertung des Flexibilitätsangebots. Sie erlaubt kontextspezifische Analysen und die Generierung von Kennzahlen. Vor dem Hintergrund der unsicheren Einflussgrößen sind dabei Chancen und Risiken der Flexibilitätsstrategie transparent zu machen [Eppen et al., 1989]. Hierfür stehen Verfahren der Entscheidungstheorie zur Verfügung [Domschke et al., 2003]. Im Sinne eines Risikomanagements können dann Flexibilitätsbedarfe und –angebote angepasst werden, um so eine Optimierung des Systemfunktion zu erzielen [Dangelmaier, 2002]. Z. B. wird erkannt, dass die Nachfrageschwankungen zu hohe Produktionskosten verursachen. In der Folge können mit dem Vertrieb vorab Marketingaktionen zur Glättung der Nachfrage abgestimmt werden, oder die Volumenflexibilität der Linien wird ausgebaut.

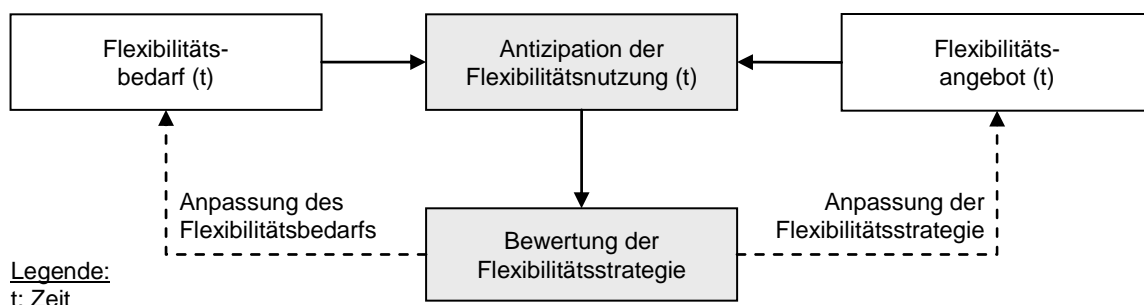


Abbildung 8: Planung und Bewertung von Flexibilitätsstrategien durch die Top-Planung

Wie in Abbildung 8 dargestellt, ist eine Antizipation der Flexibilitätsnutzung nur in Abhängigkeit des Flexibilitätsbedarfs und -angebots möglich. Sie ist dann schwierig, wenn der zu antizipierende Betrachtungsraum komplex ist. Dies ist bei Produktionssystemen meistens der Fall: Zum einen entwickelt sich der Flexibilitätsbedarf dynamisch und unsicher. Zum anderen steht der Basis-Planung ein großes Aktionsvolumen zur Verfügung, das situativ in Abhängigkeit zeitlicher und arbeitsorganisatorischer Restriktionen genutzt wird. Ein Beispiel verdeutlicht diesen Sachverhalt:

1. *Zielgerichtetheit*: Eine Montagelinie soll an Nachfrageschwankungen angepasst werden.
2. *Aktionsvolumen*: Als Reaktionsmöglichkeiten stehen die Variation der Betriebsnutzungszeit und die Variation der Taktzeit zur Verfügung.
3. *Anpassungsumfang*: Es können sowohl ausschließlich Takt- oder Betriebsnutzungszeit als auch beide Instrumente in Kombination genutzt werden.
4. *Reagibilität*: Beide Instrumente wirken nicht unmittelbar, sondern erfordern einen Planungs- und Implementierungsvorlauf.
5. *Planungsfähigkeit*: Die Frage, ob auf Nachfrageschwankungen mit einer Variation der Betriebsnutzungszeit, der Taktzeit oder einer kombinierten Variation beider Größen reagiert werden soll, ist abhängig von der zukünftigen Entwicklung der Nachfrage und von den aktuellen Betriebsgrößen: der aktuellen Takt- und Betriebsnutzungszeit, dem Stand des Arbeitszeitkontos und dem Anteil befristeter Mitarbeiter. Alle Variablen verändern sich über der Zeit, so dass die Reaktion schwierig zu antizipieren ist. Überdies kann das Aktionsvolumen zu bestimmten Zeitpunkten eingeschränkt sein, oder die Basis-Planung verhält sich aufgrund anderer Ziele und Risikopräferenzen anders als erwartet.

Die hohe Planungskomplexität verhindert eine zeitdynamische Simulation aller Flexibilitätsbedarfe. Damit wird eine Problemaggregation auf Top-Planungsebene erforderlich, die nur die relevanten Flexibilitätsbedarfe und -angebote einbezieht. Das Aggregationsniveau der Planung bezieht sich auf Aspekte der Zeit, der Zustände, der Information und der Bewertung [Schneeweiß, 1992a].

Durch die zeitliche und entscheidungsorientierte Komponente liegt ein fundamentaler Unterschied zur statischen Planung von Produktionssystemen vor. Voraussetzung für eine erfolgreiche Antizipation der komplexen Zusammenhänge sind Informationssysteme, die das



dynamische Verhalten simulieren [Pibernik, 2001]. Außerdem erfordert die Flexibilitätsplanung eine „Flexibilität der Planung“: Sie muss auf veränderte Prämissen umgehend reagieren können, sonst ist eine umfassende Analyse verschiedener Planungsvarianten kaum möglich [Hopfmann, 1988].

### Hierarchische Flexibilitätsplanung in der Praxis

Für die Planung von Produktionssystemen hat sich heute aus Gründen der Komplexitätsreduktion ein iteratives Vorgehen etabliert, bei dem vorgelagerte Planungsebenen den nachgelagerten Planungsebenen Rahmenbedingungen vorgeben. Abbildung 9 stellt eine Übersicht der hierarchischen Planungsebenen und ihrer traditionellen Bereiche dar. Die linke Seite repräsentiert die Produktsicht, während die rechte Seite investitions- und personalorientiert ist und somit die Ressourcensicht wider spiegelt [Günther, 1989].

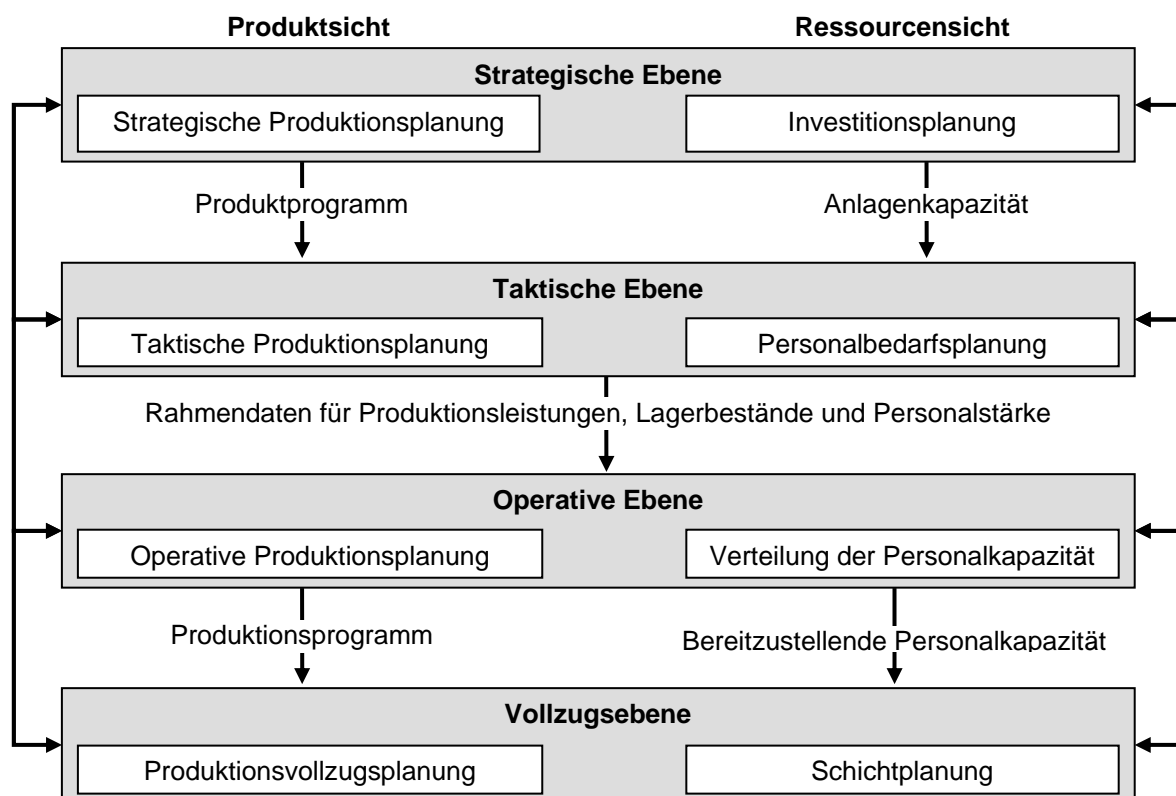


Abbildung 9: Ebenen der Produktions- und Personalkapazitätsplanung (i.A. an [Günther, 1989])

Entscheidungen mit langfristigen Auswirkungen auf die Unternehmensziele werden auf *strategischer Ebene* getroffen. In der strategischen Produktionsplanung werden das Produktprogramm, dessen Positionierung am Markt und so ein wesentlicher Teil des Flexibilitätsbedarfs festgelegt. Damit verbunden ist die Investitionsplanung, die Entscheidungen über Fertigungstechnologien, Anlagenkapazität und -flexibilität trifft. Außerdem werden die lang-

fristige Personalstruktur sowie die personalpolitischen Grundsätze des Unternehmens bestimmt. Das Flexibilitätsangebot der Produktionssysteme wird mit dem Ziel gestaltet, eine ausreichende Flexibilität zu gewährleisten, ohne die Systeme überzudimensionieren [Günther, 1989]. Die strategische Planung unterliegt aufgrund des zu betrachtenden Zeithorizonts einem hohen Risiko. Die Planung von Fertigungskonzepten ist hier besonders betroffen, da Markt-, Produkt- und Prozessänderungen schwer zu antizipieren sind ([Hopfmann, 1988], [Aurich et al., 2004]).

Die *taktische Ebene* bildet die Schnittstelle zwischen den induzierten Flexibilitätsbedarfen und den Vorgaben der strategischen Ebene. Auf dieser Ebene wird die Flexibilität genutzt. Dies beinhaltet die Anpassungen des Produktionsprogramms und der Kapazitäten. Eine detaillierte Planung von Einzelaufträgen ist auf taktischer Ebene kaum möglich, allerdings erfolgt die Anpassung der Ressourcen an auftretende Trends [Günther, 1989].

Auf den Rahmenbedingungen der strategischen und taktischen Ebene aufbauend wird in der *operativen Ebene* das zu fertigende Produktionsprogramm detailliert erstellt. Überdies werden die Personalkapazitäten individuell auf die Produktionssysteme verteilt. Die Nutzung der Arbeitszeitflexibilität ist in dieser Planungsstufe ein wichtiges Ziel. Die Produktions- und Personalplanung auf Basis der Einzelaufträge findet auf der darunter liegenden *Vollzugs- und Steuerungsebene* statt [Günther, 1989].

Es kann zusammengefasst werden, dass die Flexibilitätsplanung einer hohen Komplexität unterworfen ist und dass in der Praxis aus diesem Grund eine iterative Planung durchgeführt wird. Insbesondere die strategische Planung von Produktionssystemen unterliegt hierbei aufgrund ihres Zeithorizonts und ihrer Auswirkungen auf die Fixkosten einem hohen Risiko. Jede Planungsstufe antizipiert die Auswirkungen ihrer Entscheidungen auf untergeordneten Planungsebenen so gut wie möglich. Um eine hierarchische Flexibilitätsplanung für die Montage zu unterstützen, ist es erforderlich, die allgemeinen Erkenntnisse auf die spezifischen Randbedingungen und Freiheitsgrade der Montageplanung zu übertragen. Dies geschieht im nächsten Kapitel.

### **2.3 Flexibilität in Montagesystemen**

Nach der Einführung in die Montage- und Flexibilitätsplanung werden in diesem Kapitel die montagespezifischen Grundlagen der Flexibilitätsplanung erarbeitet. In einem ersten Schritt wird die Personalflexibilität als grundlegendes Flexibilitätsangebot erläutert. Darauf

aufbauend werden in einem zweiten Schritt die prinzipiellen Gestaltungsalternativen für Montage-Flexibilitätsstrategien vorgestellt: die Produkt- und die Volumenflexibilität<sup>7</sup>. Anschließend werden in einem dritten Schritt linienübergreifende Flexibilitätsstrategien dargestellt. Deren Bewertung unter Beachtung der markt-, produkt- und standortspezifischen Charakteristika stellt den Schwerpunkt dieser Arbeit dar.

### 2.3.1 Personalflexibilität

Bei der Anpassung an Stückzahlschwankungen, Produktänderungen und betriebliche Lerneffekte ist die Personalflexibilität als grundlegendes Flexibilitätsangebot anzusehen [McKinsey, 2005]. Der Abgleich von Personalkapazität und Personalbedarf wird auf den Ebenen der strategischen bis operativen Personalbedarfsplanung durchgeführt [Günther, 1989]. Bei gegebenen gesetzlichen, tariflichen und betriebsverfassungsrechtlichen Regelungen stehen der Personalbedarfsplanung Instrumente zur Verfügung, die eine Anpassung der Personalkapazitäten ermöglichen. Sie werden nach Abstimmung mit dem Betriebsrat festgelegt und geben die Personalflexibilität des Standorts vor (vgl. [Fischer et al., 2002], [McKinsey, 2005]). Zwei Dimensionen der Personalflexibilität werden in diesem Abschnitt dargelegt: Die Variation der Arbeitskräfte-Anzahl (*Arbeitskräfte-Flexibilität*) und die Variation der Arbeitszeit (*Arbeitszeit-Flexibilität*). Neben der flexiblen Zuordnung von Arbeitskräften auf Arbeitsprozesse, die nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen, erlauben sie die Anpassung der Personalkapazität [Günther, 1989].

Die Anpassung der Arbeitskräfte-Anzahl ist von den Anstellungsverträgen abhängig und wird auf strategischer und taktischer Ebene festgelegt. Es lassen sich mindestens vier Arbeitskräfte-Gruppen mit jeweils unterschiedlicher Personalflexibilität und Personalkosten unterscheiden. Teilweise sind die Verhältnisse der Gruppen zueinander in Betriebsvereinbarungen fixiert.

- *Unbefristete Arbeitskräfte*: Als Basis der Personalkapazität werden sie langfristig eingeplant. In westlichen Industrienationen ist ihre Reduktion nur durch kostenintensive Kündigungen oder die Mitarbeiter-Fluktuation möglich.
- *Befristete Arbeitskräfte*: Sie werden für einen Zeitraum von wenigen Jahren eingestellt und sind damit flexibler einsetzbar als unbefristete Arbeitskräfte.

---

<sup>7</sup> Die Nachfolgefähigkeit stellt keine eigene Flexibilitätsstrategie dar, sondern wird als ergänzende Möglichkeit der Fixkostenreduktion für volumen- und produktflexible Montagelinien angesehen.

- *Zeitarbeitskräfte*: Summe aller auf kurz- und mittelfristiger Basis eingesetzter Arbeitskräfte, z.B. Leiharbeitskräfte und Ferienarbeiter.

Als Flexibilitätsinstrumente zur Variation der Arbeitskräfte-Anzahl können neben Ein- und Ausstellungen von Mitarbeitern auch Personalverschiebungen durchgeführt werden. Sie werden im Folgenden als *Arbeitskräfte-Verschiebungen* zwischen Linien und als *Abordnungen* zwischen Standorten bezeichnet. Abordnungen werden nicht nur innerhalb eines Unternehmens durchgeführt; üblich ist auch der Austausch von Arbeitskräften mit Zulieferern und anderen Automobilherstellern. Der konsequente Einsatz beider Instrumente birgt ein signifikantes Einsparpotenzial für die Automobilindustrie, da sie Einstellungen und Qualifizierungskosten reduzieren ([McKinsey, 2005], [Buchenau, 2005]).

Die Arbeitszeit wird auf taktischer bis operativer Ebene angepasst. Die Arbeitszeit-Flexibilität erlaubt eine Entkopplung der tariflichen Arbeitszeit von der Betriebsnutzungszeit [McKinsey, 2005]. Die personalpolitischen Auswirkungen sind im Vergleich zu einer Veränderung der Arbeitskräfte-Anzahl geringer, und das Qualifizierungsniveau der Mitarbeiter bleibt konstant. Folgende Stellhebel zur Variation der Betriebsnutzungszeit können variiert werden (vgl. [Lehndorff, 2000], [WVS, 2000]):

- *Schichtlänge* (von Kurzarbeit bis zum Überstundenaufbau)
- *Pausenproduktion* (Verlängerung der Betriebsnutzungszeit durch Produktion während der Pausen)
- *Schichtbetrieb* (Ein- bis Drei-Schicht-Betrieb)
- *Freischichten* (Individuelle „Gleittage“ zum Ausgleich von Überstunden)
- *Zusatzschichten* (z.B. Samstags- und Sonntagsschichten)
- *Absageschichten* (Ausfall von Schichten)
- *Betriebsruhen* (z.B. Einstellung des Produktionsbetriebs während der urlaubsintensiven Sommermonate)

Die Entlohnung der Arbeitszeit und der Überstunden ist in den standortspezifischen Betriebsvereinbarungen organisiert. Durchgesetzt hat sich in der europäischen Automobilindustrie das *Arbeitszeitkonto*. Es erlaubt den Mitarbeitern, eine bestimmte Anzahl von Über- und Unterstunden in die Zukunft zu übertragen und über einen definierten Zeitraum ab- oder aufzubauen [Lehndorff, 1999]. Das Unternehmen kann dadurch die Arbeitszeit variieren, ohne dass Überstunden ausgezahlt werden müssen [Seifert, 2001].

### 2.3.2 Volumen- und Produktflexibilität

Die strategische Montageplanung soll ein optimales Maß an Flexibilität in das Montagesystem hineinzukonstruieren (vgl. Abschnitt 2.2.1). Ihr stehen für diese Aufgabe zwei komplementäre Flexibilitätsstrategien für einzelne Montagelinien zur Verfügung. Die *volumenflexible Solitärlinie* und die *produktflexible Linie*<sup>8</sup>. Beide Grundkonzepte können zu standortspezifischen Flexibilitätsstrategien oder im Produktionsverbund kombiniert werden.

#### Die volumenflexible Solitärlinie

Ziel der volumenflexiblen Solitärlinie ist ein wirtschaftliches Abfangen von Nachfrageschwankungen, indem Taktzeit und Betriebsnutzungszeit an eine veränderte Stückzahl angepasst werden. Die Auslegung der Linie auf ein Produkt erlaubt dabei eine effiziente Produktion. Wesentlich abhängig ist die Volumenflexibilität von der Personalflexibilität. Abbildung 10 stellt den Zusammenhang zwischen den Anpassungsmöglichkeiten und ihren Voraussetzungen dar.

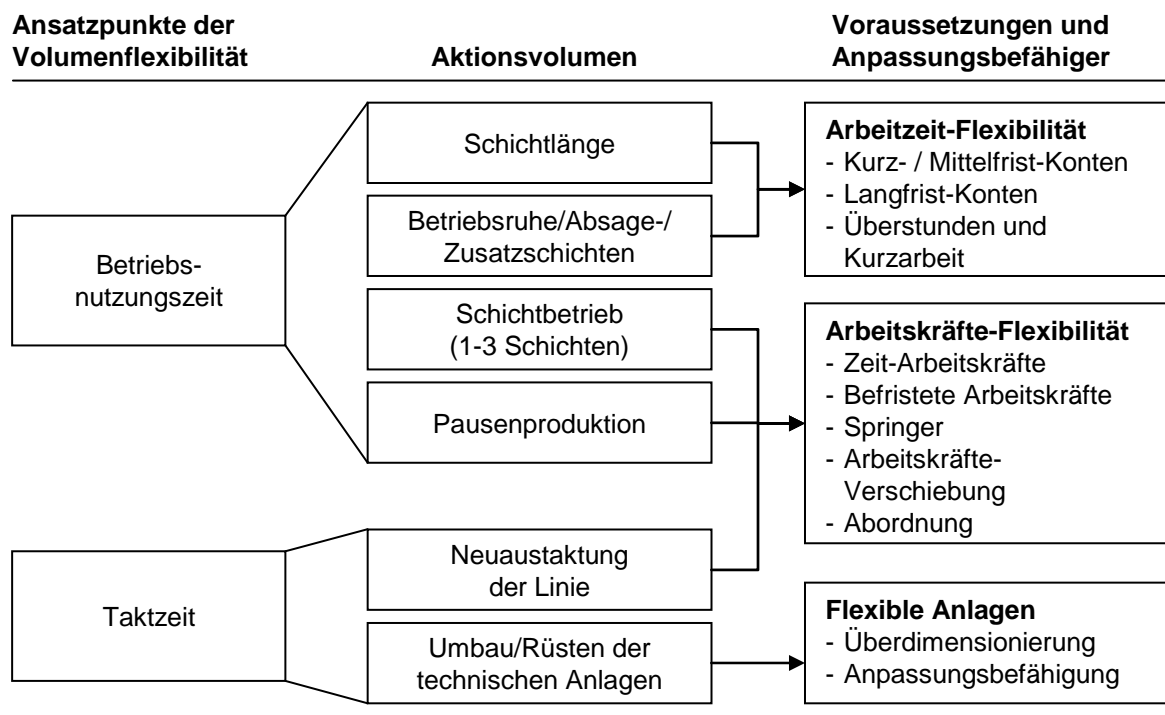


Abbildung 10: Ansatzpunkte der volumenflexiblen Solitärlinie

Die Variation der *Betriebsnutzungszeit* stellt ein wichtiges Mittel zur kapazitiven Anpassung dar und erfolgt über die in Kapitel 2.3.1 dargelegten Instrumente. Sie ist direkt gekoppelt an

<sup>8</sup> Für die nachfolgefleible Linie gelten gleiche technische Voraussetzungen und die im Folgenden beschriebenen Stärken und Schwächen. Aus diesem Grund wird sie nicht als eigene Flexibilitätsstrategie dargestellt.

die Arbeitszeit-Flexibilität: Die Veränderung der Betriebsnutzungszeit kann durch Arbeitszeitkonten, Überstunden oder Kurzarbeit abgefangen werden. Erst wenn dieses Flexibilitätsangebot an seine Grenzen stößt, werden die Maßnahmen arbeitskräftewirksam und es kommt zu Ein- bzw. Ausstellungen. Hingegen haben Veränderungen des Schichtbetriebs und der Pausenproduktion sofort Einfluss auf den Arbeitskräfte-Bedarf. So wird beim Wechsel in einen Mehr-Schicht-Betrieb eine zusätzliche Schichtgruppe erforderlich. Bei Pausenproduktion müssen zur Sicherstellung der individuellen Pausen so genannte Ablöser zur Verfügung gestellt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Kapazitätsanpassung ist die Variation der Taktzeit. Sie wird als *Umtaktung* bezeichnet und führt zu erheblichen Planungs- und Umsetzungskosten. Da durch die Variation der Taktzeit Arbeitsvorgänge in der Linie verschoben werden, erfolgt grundsätzlich eine *Neuaustaktung*. Neben dem hierfür erforderlichen Planungsaufwand fallen Umbau-, Rüst- und Qualifizierungskosten an: Technische Anlagen zur Materialbereitstellung müssen versetzt werden, und die Mitarbeiter müssen für neue Arbeitsvorgänge geschult werden. Einen erheblichen Kostenfaktor stellt darüber hinaus der Verlust von arbeitsorganisatorischen Lerneffekten nach der Umtaktung dar. Er reduziert die Prozesseffizienz kurz- bis mittelfristig<sup>9</sup> und erhöht aus diesem Grund den Arbeitskräftebedarf. In der Regel eignet sich dieses Instrument deshalb nicht für kurzfristige Anpassungen an Bedarfsschwankungen, sondern dient der Anpassung an Nachfrage-Trends.

Wird durch die Umtaktung eine durch technische und organisatorische Rahmenbedingungen vorgegebene Bandbreite der Taktzeit unter- bzw. überschritten, so werden zum Teil größere Investitionsmaßnahmen notwendig. Nach unten ist diese Bandbreite bedingt durch den Engpass der Linie. Er determiniert die *minimale Taktzeit*. Häufig stellen ihn automatisierte Anlagen oder zeitkritische Prozesse dar. Aus technischer Sicht ist ein Umbau der Anlagen möglich, und zeitkritische manuelle Arbeitsvorgänge, die länger als die Taktzeit dauern, können durch so genannte „Mehrtakter“ auf mehrere Takte verteilt werden. Für die Taktzeitreduktion muss eine ausreichende Anzahl von Arbeitsstationen und Mitarbeitern zur Verfügung stehen.

Die obere Grenze der Bandbreite, die *maximale Taktzeit*, stellt eine theoretische Wirtschaftlichkeitsgrenze dar. Sie liegt darin begründet, dass bei zunehmender Taktzeit keine lineare

---

<sup>9</sup> Diese Lernkurveneffekte werden in Kapitel 5.1 beschrieben.

Reduktion der Arbeitskräfte mehr möglich ist. Folgende Faktoren sind hierfür verantwortlich: Die durchzuführenden Arbeitsvorgänge pro Mitarbeiter nehmen bei steigender Taktzeit zu. Dabei sollte ein gewisser Umfang nicht überschritten werden, da die Anforderung an die Qualifizierung steigen. Außerdem erfordern insbesondere automatisierte Prozesse wie z.B. die Scheibenmontage eine Mindestanzahl von *taktzeitunabhängigen* Arbeitskräften. In Ausnahmefällen sind technische Aspekte für eine maximale Taktzeit verantwortlich. So darf bei einigen Klebprozessen ein maximaler zeitlicher Abstand zwischen Klebeauftrag und Fügeprozess nicht überschritten werden.

<b>Stärken</b>	<b>Schwächen</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Prozesseffizienz durch Auslegung der Montagelinie auf ein Produkt</li> <li>- Geringe Investitionen pro Linie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Anforderungen an die Takt- und Personalflexibilität, die zu Effizienzverlusten führt</li> </ul>
<b>Chancen</b>	<b>Risiken</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Produktentwicklungsfreiheit</li> <li>- Abfangen von Kapazitätsengpässen durch weitere Linien (Routenflexibilität)</li> <li>- Reduzierung der Fixkosten durch Wiederverwendbarkeit der Anlagen (Nachfolgeflexibilität)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohes Fixkostenrisiko, falls die Nachfrage hinter den Erwartungen zurückbleibt:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Auslastung der technischen Anlagen über der Zeit</li> <li>- Geringe Auslastung des Personals, wenn keine Arbeitskräfte-Verschiebungen oder Abordnungen möglich sind</li> </ul> </li> </ul>

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der volumenflexiblen Solitärlinie

Tabelle 1 zeigt die Vor- und Nachteile der volumenflexiblen Solitärlinie auf. Sie ist die klassische Produktionslinie des Premiumherstellers, bei dem die Produktentwicklung eine hohe Freiheit genießt und uneingeschränkt auf neueste Technologien und Fahrzeugkonzepte zugreift. Durch ein „entwicklungsgetriebenes Produktdesign“ entstehen komplexe, innovative und variantenreiche Produkte, die auf Solitärlinien kostenminimal montiert werden [Westkämper et al., 2005]. Allerdings sinkt bei einem Rückgang der Nachfrage die Ressourcenauslastung; das Fixkostenrisiko steigt. Während hierauf auf technischer Seite durch eine implementierte Nachfolgeflexibilität reagiert werden kann, gestaltet sich die Anpassung der Personalkapazitäten schwieriger. Abordnungen oder Arbeitskräfte-Verschiebungen stellen adäquate Instrumente zur Verfügung, sind jedoch nicht immer möglich.

### **Die produktflexible Montagelinie**

Bei geringer Personalflexibilität, bei dynamischen, unsicheren und geringen Stückzahlen und bei kurzen Produkt-Lebenszyklen gewinnt die produktflexible Linie an Bedeutung. Da sich gegenläufige saisonale, lebenszyklusbedingte und stochastische Nachfrageschwankungen

einzelner Produkte auf einer Linie gegenseitig ausgleichen, erlaubt sie eine konstant hohe Auslastung der personellen und technischen Ressourcen.

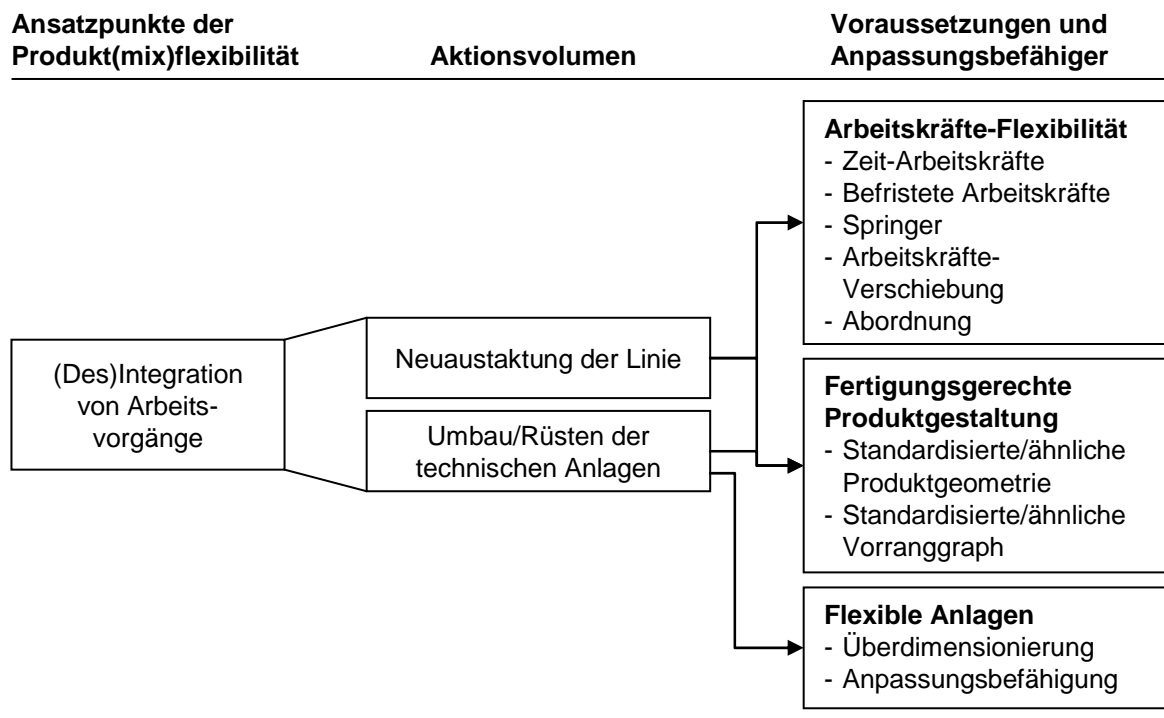


Abbildung 11: Ansatzpunkte der produkt(mix)flexiblen Montagelinie

Der Ansatzpunkt zur Realisierung produktflexibler Linien ist die kostengünstige *Integration und Desintegration von Arbeitsvorgängen*. Sie muss insbesondere bei An- und Ausläufen von Produkten gewährleistet sein. Voraussetzung für die Integration manueller Arbeitsvorgänge ist die Neuaustaktung der Linie. Die Integration automatisierter Arbeitsvorgänge erfordert eine Überdimensionierung der Linie oder die in Kapitel 2.2 beschriebenen Anpassungsbefähiger. Eine *produktflexible Anlagen- und Fördertechnik* erlaubt die Durchführung verschiedener Prozesse und die Förderung unterschiedlicher Fahrzeuge und Zulieferteile. Produktflexible Produktionssysteme sind am Markt verfügbar. Sie wurden u.a. im Rahmen des Verbundprojektes „Entwicklung neuer Konzepte für wandlungsfähige Satellitenfabriken und Fabrikparks“ (SatFab) hinsichtlich ihrer Flexibilität bewertet. Eine Übersicht der Ergebnisse findet sich bei [Vielhaber, 2004].



<b>Stärken</b>	<b>Schwächen</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Auslastung und Lieferfähigkeit aufgrund von Stückzahlen-Ausgleichseffekten</li> <li>- Geringe erforderliche Gesamtkapazität und damit geringe Investitionen</li> <li>- Einfache An- und Ausläufe ähnlicher (Nischen-)Produkte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Prozesseffizienz durch hohen Taktausgleichsverlust bei hoher Varianz der Arbeitsvorgänge</li> </ul>
<b>Chancen</b>	<b>Risiken</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Entwicklungskosten bei einem hohen Prozentsatz an Übernahmeteilen von bereits entwickelten Produkten („Regalentwicklung“)</li> <li>- Hoher Reifegrad der konventionellen Produkt- und Prozesstechnologien über der Zeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eingeschränkte Produktentwicklungsfreiheit</li> <li>- Verringerte Qualität bei hoher Varianz der manuellen Arbeitsvorgänge</li> <li>- Langfristige Kapazitätsplanung für zukünftige Produkte erforderlich</li> </ul>

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der produktflexiblen Montagelinie

Tabelle 2 stellt die Vor- und Nachteile der produktflexiblen Montagelinie dar. Den größten Vorteil aus Produktionssicht bietet die hohe Auslastung und Lieferfähigkeit der Linie, die zu einer geringen erforderlichen Gesamtkapazität und damit zu geringen Investitionen führt. Im Vergleich zur Solitärline erreicht die produktflexible Linie allerdings eine geringere Prozesseffizienz. Die Taktzeit muss an den zeitintensivsten Arbeitsvorgängen ausgerichtet werden, und die Auslastung der Werker wird durch einen höheren Taktausgleichsverlust reduziert. Gleichzeitig steigt die Montagezeit aufgrund der am längsten Fahrzeug orientierten Stationslänge und der damit verbundenen höheren Wegzeiten. Beides kann durch eine optimale Sequenzbildung nur teilweise ausgeglichen werden. Kommen neue zeitkritische Arbeitsvorgänge hinzu, so kann sogar eine Taktzeiterhöhung erforderlich werden.

Vor dem Hintergrund einer steigenden Relevanz von Produkt- und Prozessinnovationen im Wettbewerb birgt die produktflexible Linie bei langer Nutzungsdauer einen gewichtigen Nachteil. Können den Wettbewerb entscheidende Innovationen nicht ohne weiteres in die Montagelinie integriert werden, so fallen erneut Anpassungsinvestitionen an. Dadurch können erhebliche Kosten und Produktionsstillstände entstehen. Dem von Innovationen ausgehenden Flexibilitätsbedarf kann begegnet werden, indem das Montagesystem eine Integration neuer Technologien zulässt. Beispielhaft sei der Aufbau von Bypass- oder entkoppelten Stationen genannt. Der Einsatz von fahrerlosen Transportsystemen, deren Reifegrad sich in den letzten Jahren signifikant erhöht hat, bietet hier ein hohes Potenzial [Schraft et al., 2005].

Mit ihren Stärken und Schwächen wird die produktflexible Linie traditionell von den Kostenführern genutzt. Sie setzen auf eine fertigungsgerechte Produktentwicklung und versetzte Produktlebenszyklen für Volumenprodukte und minimieren die Entwicklungs- und Produktionskosten. Das bedeutet insbesondere, dass sich die Produkte nicht wesentlich unterscheiden und aufwandsarm in vorhandene Linien integriert werden können [Alden et al., 2002]. Da die Vorgaben der Produktion die Freiheit der Produktentwicklung und des Vertriebs stark limitieren, sind insbesondere Premiumhersteller mit produktflexiblen Systemen vorsichtig, denn sie fürchten negative Auswirkungen bei der Produktattraktivität. Sie nutzen produktflexible Linien vor allem für Nischenprodukte mit geringer Stückzahl, für die sich Solitärlinien nicht rentieren [Westkämper et al., 2005].

### **2.3.3 Standort- und produktspezifische Flexibilitätsstrategien**

Bei steigendem Kosten- und Innovationsdruck erlaubt weder eine vollständige Produktflexibilität, bei der alle Produkte auf allen Linien gefertigt werden können, noch ein reines Solitärkonzept eine kostenoptimale Produktion [Westkämper et al., 2000a]. Für die Automobilhersteller entsteht auf diese Weise ein Zielkonflikt [Friese et al., 2004]. Zwar lassen sich die innovativen und komplexen Produkte effizient auf Solitärlinien produzieren. Die für eine hohe Umsatzrendite wichtige Ressourcenauslastung ist dann allerdings über den potenziellen Anlagenlebenszyklus gering. Flexible Linien sind leichter auszulasten, schränken jedoch die Produktentwicklung stark ein. Aus diesem Grund investieren sowohl Kostenführer als auch Innovationsführer heute in beide Linienkonzepte und entwickeln standort- und produktspezifische Flexibilitätsstrategien [Westkämper et al., 2005]. Abbildung 12 stellt diese Zusammenhänge dar.

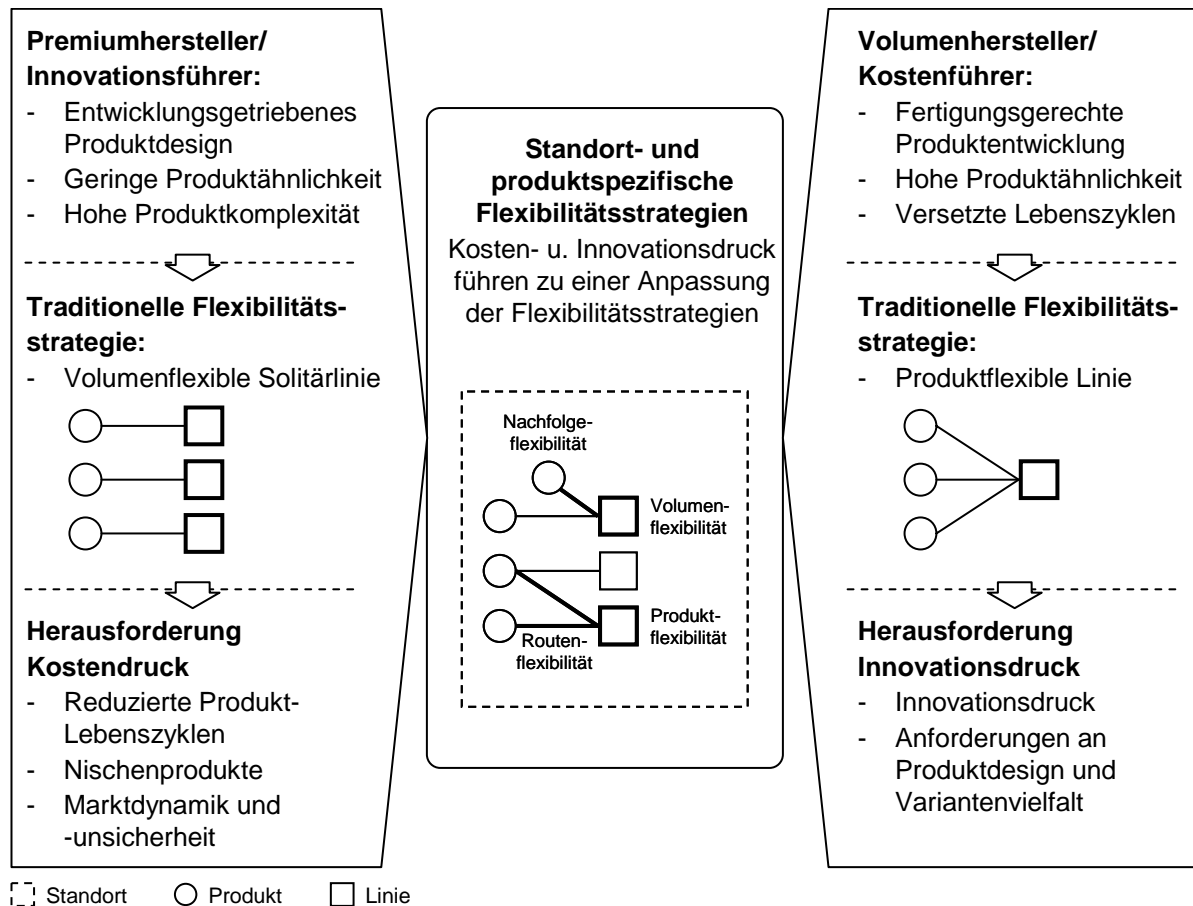


Abbildung 12: Auswirkungen des Kosten- und Innovationsdruck auf die Flexibilitätstrategien

Um standortspezifische Flexibilitätstrategien zu entwickeln, müssen die Flexibilitätarten linienübergreifend und unter Berücksichtigung der vorhandenen Personalflexibilität aufeinander abgestimmt werden. Linienübergreifende Synergieeffekte gehen über die Anpassungsinstrumente der Einzellinien hinaus und müssen explizit berücksichtigt werden<sup>10</sup>:

- Die *Arbeitskräfte-Verschiebung* zwischen den Linien erlaubt die Nutzung hocheffizienter Solitärlinien bei gleichzeitig reduziertem Arbeitskräfte-Fixkostenrisiko. Sie hat den Vorteil, dass ein bereits hoch qualifiziertes Personal weiter in der Produktion eingesetzt werden kann [McKinsey, 2005].
- Durch die *Routenflexibilität* kann das Produktionsprogramm auf mehrere Linien verteilt werden. Die Kombination von automatisierten, schnellen und gut ausgetakteten Solitärlinien mit produktflexiblen Montagelinien erlaubt beispielsweise eine hohe Auslastung der Solitärlinien, während Spitzenlasten durch die produktflexiblen Linien abgefangen werden. [Friese et al., 2004].

<sup>10</sup> Die Zusammenhänge gelten auch standortübergreifend im Produktionsverbund. Die Arbeit konzentriert sich jedoch auf standortinterne Flexibilitätstrategien.

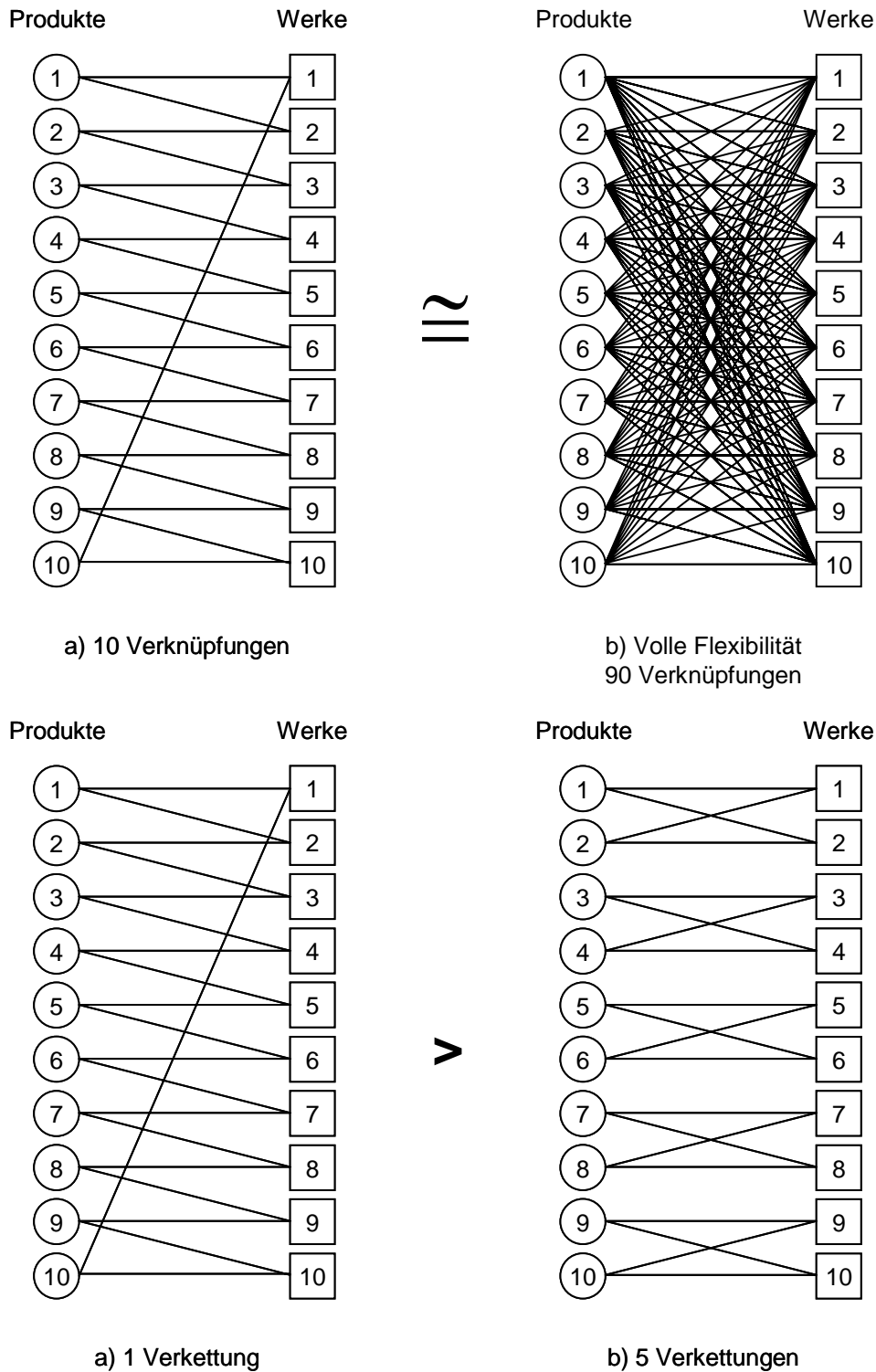


Abbildung 13: Flexibilitätsstrategien mit annähernd gleicher Reaktionsfähigkeit bei Nachfrageunsicherheit [Jordan et al., 1995]

Bei der Frage nach einem wirtschaftlichen Maß an Produkt- und Routenflexibilität für die Montagelinien ist zu berücksichtigen, dass die Linienflexibilität einem Grenznutzen bzgl. Auslastung und Lieferfähigkeit unterliegt: vollflexible System, bei denen jedes Produkt auf jeder Linie gefertigt werden kann, weisen keine höhere Lieferfähigkeit auf als teilflexible Flexibilitätsstrategien, bei denen manche Produkte auf mehreren Linien gefertigt werden

können. Jordan und Graves weisen diese Zusammenhänge in ihren Studien nach, indem sie so genannte Verkettungsstrategien miteinander und gegenüber vollflexiblen Strategien vergleichen. Auszüge sind in Abbildung 13 dargestellt: Kreise stellen die Produkte, Quadrate die Montagelinien oder Standorte dar. Die Verknüpfungen bilden die mögliche Produktallokation und damit die Flexibilität ab. Jordan und Graves sprechen von einer „Verkettung“, wenn die Verknüpfungen über ein oder mehrere Produkte und Standorte sich zyklisch schließen. Im Bild oben führt die Strategie mit einer Verkettung zu einer ähnlichen Lieferfähigkeit wie die voll routen- und produktflexiblen Strategie. Im Bild unten wird aufgezeigt, dass die Strategie mit einer Verkettung eine höhere Lieferfähigkeit erreicht als die Strategie mit fünf Verkettungen [Jordan et al., 1995].

## **2.4 Planung flexibler Montagesysteme**

Nachdem in Kapitel 2.1 die Flexibilitätsstrategie als Handlungsfeld der Kostenreduktion für die Montageplanung identifiziert wurde, erfolgte in Kapitel 2.2 eine allgemeine Einführung in die Flexibilitätsplanung. In Kapitel 2.3 wurden die grundlegenden Flexibilitätsstrategien für Montagesysteme und ihre Kombinationsmöglichkeiten dargestellt. In diesem Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und für die Montageplanung konkretisiert. Anschließend werden die Anforderungen an die Planungsmethoden hergeleitet. Das Kapitel schließt mit der Abgrenzung des Untersuchungsumfangs der Arbeit.

### **2.4.1 Konkretisierung der Erkenntnisse für die Montageplanung**

Die Vorteile flexibler Montagesysteme sind nach Aussage verschiedener Autoren nicht ausgeschöpft. Zum einen, weil die steigende Dynamik und Komplexität in der strategischen Planung keine ausreichende Berücksichtigung findet, zum anderen, weil vorhandene technische und organisatorische Flexibilitätsangebote im Montagebetrieb nicht optimal genutzt werden (vgl. [Sesterhenn, 2003], [McKinsey, 2005]).

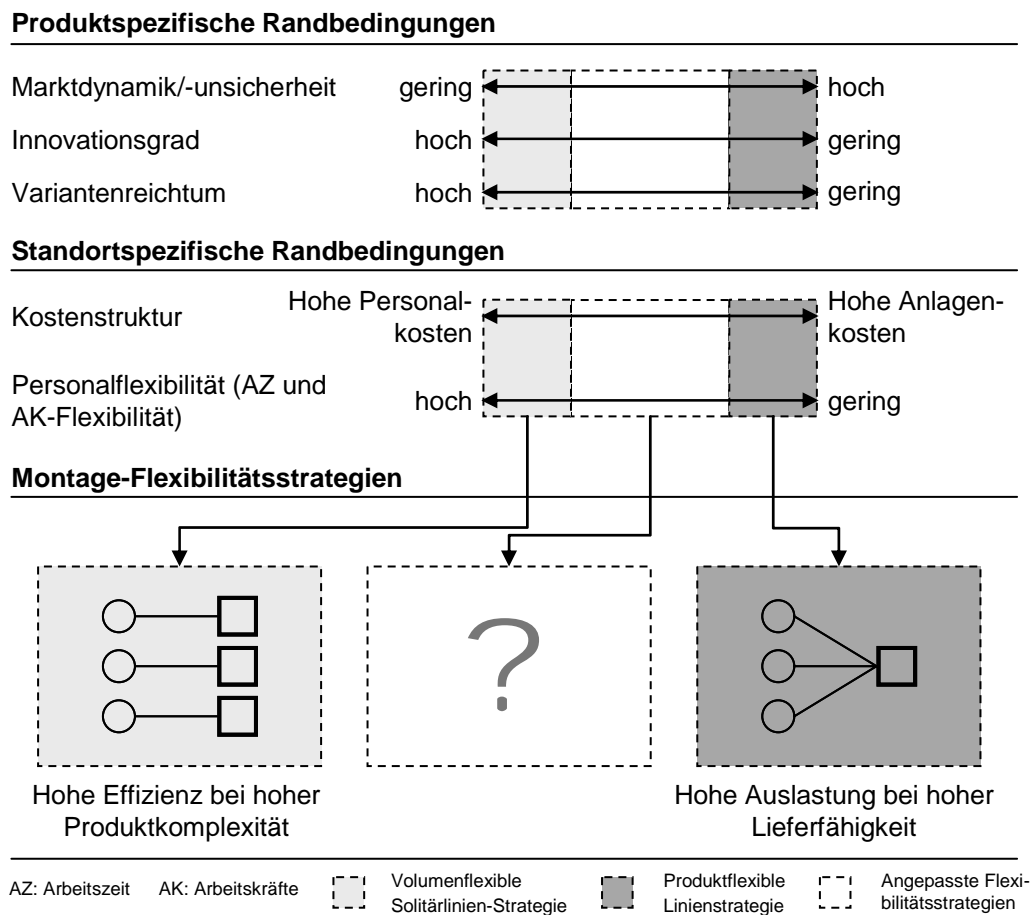


Abbildung 14: Ableitung der Montage-Flexibilitätsstrategie aus produkt- und standortspezifischen Rahmenbedingungen

Bei der Planung von Flexibilitätsstrategien sind die bereits beschriebenen produkt- und standortspezifischen Randbedingungen zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 14). Tendenziell lässt sich die Aussage treffen, dass bei geringer Dynamik und Unsicherheit, hohem Innovationsgrad und hohem Variantenreichtum volumenflexible Solitärlinien von Vorteil sind. Standortseitig sind sie des Weiteren zweckmäßig bei hohen Personalkosten im Vergleich zu den Anlagenkosten. Unterstützt werden sie durch eine hohe Personalflexibilität. Hingegen eignen sich produktflexible Linien vor allem bei entgegengesetzten Prämissen. Bereits beschriebene Voraussetzungen wie versetzte Lebenszyklen und die Verfügbarkeit flexibler Anlagen sind bei ihrer Planung zu beachten. Die Abstimmung von Flexibilitätsbedarf und -angebot wird erschwert, wenn die produkt- und standortspezifischen Randbedingungen nicht klar ausgeprägt sind. In diesem Fall ist grundsätzlich zwischen der hohen Linieneffizienz der Solitärlinie und der hohen Auslastung der produktflexiblen Linie abzuwägen. Beide stehen sich komplementär gegenüber, was folgende Beispiele verdeutlichen:

- Produkt- und Nachfolgefähigkeit erfordert eine Ausrichtung der Stationslänge auf das längste Fahrzeug. Die erhöhte Stationslänge führt zu längeren Wegzeiten in- und außerhalb der Linie und damit zu einer geringeren Linieneffizienz.

- Produkt- und Routenflexibilität führen zu einer höheren Varianz der Arbeitsvorgänge und zu einem variierenden Produktmix-Verhältnis. Die Austaktung der Linie wird erschwert und die Effizienz sinkt.
- Volumenflexibilität wird u.a. durch Umtaktungen realisiert. Sie führen zu einem höheren Taktungleichsverlust nach der Umtaktung und damit zu einem erhöhten Arbeitskräftebedarf.

Als grundlegendes Mittel zur Verbesserung der Flexibilitätsplanung wurde die hierarchische Planung erkannt. Überträgt man sie auf die Montageplanung, so müssen zur Bewertung einer Investition die zukünftige Flexibilitätsnutzung und die entstehenden Betriebskosten antizipiert werden. Die Montage mit ihren komplexen Wirkzusammenhängen macht die Antizipation allerdings schwierig [Schneeweiß, 1992]. März et al. schreiben: „*Die hohe Vernetztheit zwischen Montagesystemelementen lässt es nur schwer zu, Voraussagen über das dynamische Verhalten des Gesamtsystems zu treffen*“ [März et al., 2001]. Insbesondere die folgenden Aspekte tragen hierzu bei:

- Vom Menschen beeinflusste Prozesse unterliegen *Lerneffekten*. Ihre Stärke ist abhängig von einer Vielzahl technischer und arbeitsorganisatorischer Parameter der Flexibilitätsstrategie. Diese verändern sich im Rahmen der Flexibilitätsnutzung über der Zeit.
- Die realen Handlungsalternativen der taktischen und operativen Ebenen sind neben den technischen auch *arbeitsorganisatorischen und personalpolitischen Randbedingungen* unterworfen. So müssen standortspezifische Arbeitszeitmodelle einschließlich der Arbeitszeitkonten-Regelung in die Planung integriert werden, um das Potenzial der Systemflexibilität zu bewerten.

Die Planung von Flexibilitätsstrategien für die Montage muss mit allen sie tangierenden Planungsbereichen abgestimmt werden, um aktuelle und zukünftige Entwicklungen möglichst exakt vorherzusehen und abzustimmen. Beispielhaft seien für die produktseitigen Randbedingungen die Produktentwicklung und der Vertrieb genannt. Für standortspezifische Randbedingungen ist z.B. die Personalplanung verantwortlich. Diese Forderung begründet sich darin, dass Entscheidungen der Bereiche komplementär, redundant oder synergetisch aufeinander wirken können [Günther, 1989]. Folgende Beispiele verdeutlichen das:

- *Produktentwicklung*: Zur Kostenreduktion bei hoher Variantenvielfalt wird der Modularisierungsgrad eines Produkts erhöht. Das resultierende Modulgewicht erfordert

automatisierte Arbeitsstationen, die als Fixpunkte in der Fabrik die Produkt- und Volumenflexibilität reduzieren.

- *Vertriebsplanung*: Um marktnah zu agieren, plant der Vertrieb ein innovatives Nischenprodukt zu einem Zeitpunkt, zu dem die produktflexible Ziel-Montagelinie bereits ausgelastet ist. Der hohe Innovationsgrad und die nicht ausreichend versetzten Produkt-Lebenszyklen machen eine wirtschaftliche Integration kaum möglich.
- *Personalplanung*: Die Montageplanung erarbeitet eine technisch volumenflexible Linie, bei der Umtaktungen kostengünstig durchzuführen sind. In Betriebsvereinbarungen wird allerdings eine geringe Personalflexibilität festgelegt. Die sich daraus ergebenden Arbeitskräfte-Fixkosten machen eine kostenreduzierende Nutzung der technischen Volumenflexibilität kaum möglich.

Die Bewertung der Flexibilitätsstrategien kann aufgrund der beschriebenen Abhängigkeiten nur standortspezifisch für ein definiertes Produktionsprogramm erfolgen. Allgemeine Aussagen zur Vorteilhaftigkeit einer Flexibilitätsstrategie lassen sich kaum treffen. Die strategische Montageplanung entscheidet dementsprechend bei jeder Montagesystem-Planung über die optimale Flexibilitätsstrategie. Deshalb liegt ein Schwerpunkt der zukünftigen Montageplanung auf dem Einsatz EDV-unterstützter Planungsmethoden. Diese versprechen eine höhere Transparenz und eine bessere Planungsgrundlage [Westkämper et al., 2003].

## 2.4.2 Anforderungen an die Planungsmethodik

Ziel der Arbeit ist es, auf die Montageplanung angepasste Modelle und Methoden zu entwickeln, mit denen der Produktionsbetrieb von Montagesystemen vor Produktionsanläufen antizipiert und bewertet werden kann. Dafür werden die folgenden Anforderungen definiert.

### **Antizipative Planung**

Die Bewertung der Flexibilitätsstrategie basiert auf einer Antizipation zukünftiger Entwicklungen im Montagebetrieb. Dort wird das zur Verfügung stehende Flexibilitätsangebot genutzt. Die Modelle und Methoden müssen folglich der operativen Planung vergleichbare Planungsergebnisse generieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Entscheidungen der operativen Planung durch kontinuierliche Lerneffekte, durch technische und durch arbeitsorganisatorische Restriktionen beeinflusst werden.



## **Dynamische Planung**

Da der Flexibilitätsbedarf durch eine Veränderung der kombinierten Einflussvariablen über der Zeit ausgelöst wird und das Flexibilitätsangebot vom aktuellen Systemzustand abhängt, ist eine zeitdynamische Planung notwendig. Die Planung von Flexibilitätsstrategien unterscheidet sich damit zwangsläufig von einer statischen Planung von Produktionssystemen.

## **Kostenorientierte Planung**

Die Flexibilitätsplanung mündet in eine Investitionsentscheidung, die vor allem monetär bewertet wird. In Anlehnung an die entscheidungsorientierte Kosten- und Investitionsrechnung müssen zu diesem Zweck die für die Entscheidungen relevante Ein- bzw. Auszahlungen berücksichtigt werden [Schneeweiß, 1992a]. Die erforderlichen Kennzahlen lassen sich durch die Antizipation des Realbetriebs generieren. Grundlage dafür ist ein Kostenmodell der Montage (vgl. z.B. [Hartmann, 1993]). Prinzipiell sollen dabei alle gewinnrelevanten Faktoren berücksichtigt werden. Die Montage stellt jedoch lediglich einen Teilbereich der Automobilproduktion dar. Die Ausbringung der Fabrik ist zusätzlich von den vorgelagerten Zulieferern und Gewerken abhängig. Darüber hinaus steuert der Vertrieb die Lieferfähigkeit mit. Eine den Gewinn maximierende Implementierung des Flexibilitätsangebots für die Montage ist demnach nur auf Ebene des Produktionsverbunds zu treffen. Im Vordergrund der Antizipation stehen deshalb die Montagekosten.

## **Unsichere Planung**

Eine Berücksichtigung der Unsicherheit beinhaltet implizit eine Bewertung der Chancen und Risiken. Dabei kann unterschieden werden zwischen einer Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen aus heutiger Sicht (Bereich der strategischen Planung) und einer Unsicherheit bei der zu antizipierenden Entscheidungsfindung im operativen Montagebetrieb (Bereich der operativen Planung). Da sich ein wesentlicher Vorteil der Flexibilität aus den Reaktionsmöglichkeiten auf unsichere Entwicklungen ergibt, ist erstere auf jeden Fall zu berücksichtigen. Eine Berücksichtigung der Unsicherheit der operativen Planung ist nur dann zu integrieren, wenn sich die operative Planung bei Sicherheit wesentlich von der operativen Planung bei Unsicherheit hinsichtlich der entstehenden Kosten unterscheidet.

## **Praxisorientierte Planung**

Da die Methode als Entscheidungsgrundlage in die Montageplanung transferiert werden soll, muss sie allgemeinen Anforderungen für den praktischen Einsatz gerecht werden. Bezugnehmend auf [Baumgärtel, 1999] werden folgende Anforderungen gestellt:

- *Transparenz und Nachvollziehbarkeit:* Ziel ist die Erhöhung der Transparenz bei der Planung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage. Auswirkungen von Maßnahmen unterschiedlicher Planungsbereiche auf die Kennzahlen müssen nachvollziehbar aufgezeigt werden. Die Modelle der Endmontage müssen für den Produktionsplaner verständlich sein.
- *Flexibilität und Skalierbarkeit:* Das System muss eine einfache Modellierung alternativer Flexibilitätsstrategien zulassen und einfach an Änderungen der Planungsprämissen und des Informationsstands angepasst werden können.
- *Aggregationsgrad und Genauigkeit:* Da realitätsnahe Modelle der Endmontage sehr groß werden können, muss das Modell einen Aggregationsgrad für die zeitliche, organisatorische und technische Dimension nutzen, der zuverlässige Aussagen in akzeptabler Rechenzeit liefert.

### 2.4.3 Abgrenzung der Planungsmethode

In diesem Abschnitt wird eine Abgrenzung der Planungsmethode vorgenommen. Es wird aufgezeigt, welcher Bereich der Automobilmontage das Gestaltungsobjekt darstellen und welche Flexibilitätsbedarfe und -angebote in die Methodik integriert werden. Hintergrund der Abgrenzung ist das Ziel, die strategische Montageplanung bei der Bewertung alternativer Flexibilitätsstrategien zu unterstützen.

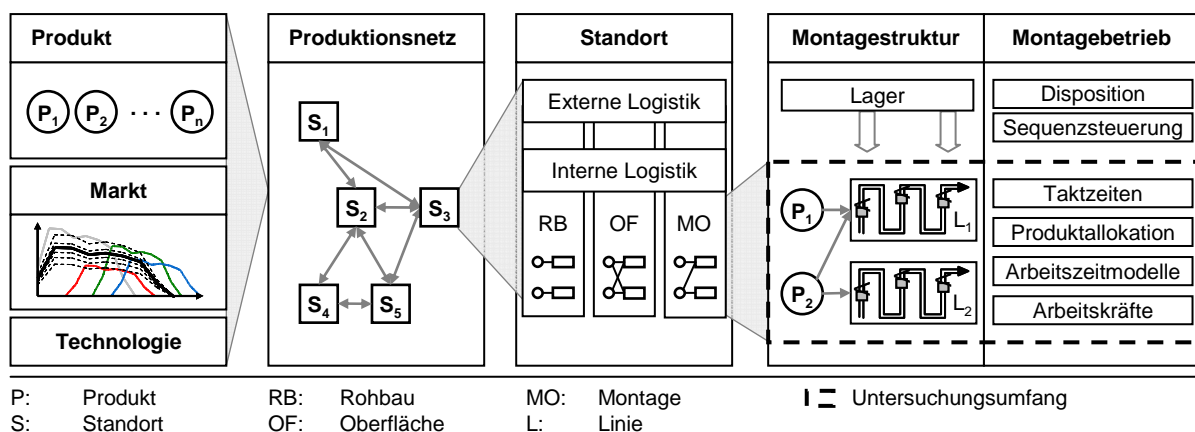


Abbildung 15: Untersuchungsumfang der Dissertation

Abbildung 15 stellt den Untersuchungsumfang dar. Als *Gestaltungsobjekt* wird die Gesamtheit der Montagelinien inkl. der Modulmontagelinien an einem Standort verstanden. Eine dazugehörige Flexibilitätsstrategie zeichnet sich aus durch eine definierte Produkt-, Routen-,

Nachfolge- und Volumenflexibilität dieser Linien. Sie wird mitbestimmt durch den Automatisierungsgrad, die technische Kapazität und die Anzahl und Länge der Arbeitsstationen.

Als wesentliche Flexibilitätsbedarfe werden das sich verändernde Produktportfolio und die Marktdynamik angesehen. Sie wirken sich auf zukünftige Montagezeiten und zu produzierende Stückzahlen aus. Die Faktoren unterliegen einer Unsicherheit, die wesentlichen Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit der Strategien hat. Der erforderliche Detaillierungsgrad des Flexibilitätsangebots ergibt sich aus den Anforderungen an die Planungsmethodik. Betrachtet werden müssen alle kostenrelevanten Parameter der Montage, die von der Flexibilitätsstrategie und seinem Flexibilitätsangebot abhängen. Sie sind im Bilanzrahmen beinhaltet: Die Verteilung des Produktionsprogramms auf Montagelinien, die Arbeitskräfte-Planung und die erforderlichen Anpassungen der Takt- und Betriebsnutzungszeit bei Veränderung des Flexibilitätsbedarfs. Auf dieser Basis lassen sich rechnerisch die Produktionskosten ermitteln, die eine Bewertung verschiedener Flexibilitätsstrategien zulassen.

Nicht berücksichtigt werden Aspekte der Materialbelieferung und -bereitstellung (Disposition) und der Produktionsplanung- und Steuerung (Sequenzsteuerung). Sie fallen in das Gestaltungsfeld der Logistik und werden im Rahmen dieser Arbeit lediglich als Randbedingungen des zukünftigen Produktionsbetriebs erwähnt. Außerdem liegt der Fokus der Arbeit nicht auf technischen Fragestellungen. Aus diesem Grund werden technische Anpassungen lediglich mit Kosten bewertet, sie werden jedoch weder aus Produkt- noch aus Prozesssicht im Detail erläutert.

### 3 Ansätze zur Planung flexibler Produktionssysteme

Nachdem in Kapitel 2 Flexibilitätsstrategien als wesentliches Handlungsfeld zur Kostenreduktion im dynamischen und unsicheren Umfeld identifiziert wurden, folgt in diesem Kapitel eine Übersicht über den Stand der Technik zur antizipativen Bewertung flexibler Produktionssysteme. Die Anforderungen an die Modelle und Methoden wurde bereits aufgezeigt, jedoch soll ein Aspekt besonders hervorgehoben werden: Eine zielgerichtete Bewertung der Flexibilitätsstrategien muss zeitliche und monetäre Auswirkungen der Investitionsentscheidungen sowie deren Chancen und Risiken aufzeigen.

Zur Unterstützung der Entscheidungsprozesse stehen verschiedene methodische Ansätze zur Verfügung. An erster Stelle seien die *statistischen Ansätze der Ökonometrie* genannt. Sie suchen, aufbauend auf vergangenheitsorientierten Analysen, nach Gesetzmäßigkeiten, die sich in die Zukunft übertragen lassen. Voraussetzung dafür ist, dass sich die Planungsprämissen aus der Vergangenheit in die Zukunft übertragen lassen. Ist das nicht der Fall, so müssen Modelle erarbeitet werden, die die Zukunft abbildenden. Hier bieten sich die Ansätze des „*Operations Research*“ (OR) an. Sie optimieren ein zukünftiges Systemverhalten mathematisch hinsichtlich eines gegebenen Zielsystems. Neben den Optimierungsverfahren stehen dabei unterschiedliche heuristische Simulationsverfahren wie die Monte-Carlo-Simulation zur Verfügung. Allerdings finden OR-Verfahren nur dann geschlossene Lösungen, wenn die Problemkomplexität ein bestimmtes Maß nicht überschreitet. In der Realität ist das jedoch häufig der Fall. Deshalb verweisen verschiedene Autoren auf die kybernetische Systemanalyse, insbesondere auf die *System Dynamics-Methode*. Dieses Simulationsverfahren erlaubt durch die integrierte Betrachtung von Systemdynamik und Rückkopplungseffekten auch bei hoher Problemkomplexität eine Prognose des zukünftigen Systemverhaltens [Milling, 2004].

Legt man die Annahme zugrunde, dass die Einflussfaktoren auf Flexibilitätsstrategien stetigen Änderungen unterworfen sind, dann kann auf historische Aussagen nicht prinzipiell vertraut werden. Ansätze der Ökonometrie werden demzufolge in diesem Kapitel nicht analysiert; sie erlauben keine konkrete Antizipation des zukünftigen Systemverhaltens. Im Vordergrund stehen deshalb die Optimierungsverfahren und systemdynamischen Verfahren, die in den Kapiteln 3.1 und 3.2 erläutert werden. Nach einer Einführung in die Methoden werden die verschiedenen Schwerpunkte der Autoren herausgearbeitet. Es wird kritisch diskutiert, in

wieweit die Planungsansätze auf Montagesysteme übertragen sind. Daraus werden in Kapitel 3.3 die Defizite und der Handlungsbedarf abgeleitet.

### 3.1 Bewertungsansätze auf Basis von Optimierungsverfahren

Wird davon ausgegangen, dass die Flexibilitätsnutzung im Systembetrieb nach Kriterien der Optimalität erfolgt, so lässt sich die Antizipation der Flexibilitätsnutzung auf Basis von Optimierungsverfahren durchführen. Hierfür wird ein Optimierungsproblem formuliert, das durch Gleichungen und Ungleichungen in allgemeiner Form wie folgt dargestellt wird [Hillier et al., 2005]:

$$1) \text{ Zielfunktion:} \quad \text{Max./Min. } z = f(x)$$

$$2) \text{ Nebenbedingungen:} \quad g_i(x) \begin{pmatrix} = \\ \geq \end{pmatrix} 0 \text{ für } i = 1, \dots, m$$

$$3) \text{ Variablenvektor:} \quad x \in \mathfrak{R}_+^n \text{ oder } x \in \mathbb{Z}_+^n \text{ oder } x \in \{0,1\}^n$$

Die Zielfunktion definiert das Zielkriterium  $z$  in Abhängigkeit von den zu optimierenden Entscheidungsvariablen  $x$ . Randbedingungen werden als Nebenbedingungen dargestellt. Die Entscheidungsvariablen werden als Variablenvektor modelliert. Die Unterscheidung zwischen reellen und natürlichen Zahlen sowie zwischen Binärvariablen hat Auswirkungen auf das zu verwendende Optimierungsverfahren. Ziel des Optimierungsverfahrens ist im Rahmen der Arbeit die Optimierung der Flexibilitätsnutzung bei gegebener Zielfunktion und definierten Nebenbedingungen. Demnach muss das Aktionsvolumen als Variablenvektor so über der Zeit konfiguriert werden, dass die Zielfunktion den optimalen Wert annimmt.

#### 3.1.1 Lösungsklassen und -verfahren für Optimierungsprobleme

Zur Lösung der Optimierungsprobleme existieren verschiedene Verfahren. Sie werden auf bestimmte Problemstellungen angewandt, die abhängig von der Zielfunktion, den Nebenbedingungen und dem Variablenvektor definiert sind. Zu berücksichtigen ist, dass die Formulierung der Problemstellung bereits vom angestrebten Lösungsalgorithmus beeinflusst wird. Im Folgenden werden vier Lösungsverfahren allgemein beschrieben, bevor in Abschnitt 3.1.2 eine Übersicht der Bewertungsansätze verschiedener Autoren erfolgt. Dabei wird zwischen exakten und heuristischen Verfahren unterschieden.

## Exakte Verfahren

Lösungsverfahren werden als exakt bezeichnet, wenn sie das globale Optimum eines Optimierungsproblems ermitteln. Sie unterscheiden sich von heuristischen Verfahren, die eine gute, aber nicht notwendigerweise optimale Lösung anbieten. Die Wahl des Lösungsverfahrens ist abhängig von der Problemklasse und Komplexität des Optimierungsproblems. Das *lineare Optimierungsproblem* als erste Problemklasse lässt sich in allgemeiner Form wie folgt darstellen:

$$\min \{c^T x = \sum_{j=1}^n c_j x_j : Ax \leq b, x_1 \dots x_n \geq 0\}$$

Die Gleichungen und Ungleichungen sind linearer Natur. Zusätzlich ist der Lösungsraum stetig und lässt sich infolgedessen als kontinuierlicher Variablenvektor definieren. Mit diesen Eigenschaften sind Voraussetzungen erfüllt, die das Finden einer optimalen Lösung mit dem Simplex-Algorithmus ermöglichen [Winston, 2004]:

- Es existieren keine lokalen, sondern nur globale Optima, so dass das erste gefundene Optimum der optimalen Lösung entspricht.
- Die optimale Lösung liegt auf einem Eckpunkt des Lösungsraums. Dadurch muss nur ein reduzierter Teil des Raums untersucht werden.

Eine weitere Problemklasse entsteht, wenn Variablen des Lösungsraums nur diskrete Werte annehmen können. Sie wird als *gemischt-ganzzahlige Optimierung* bezeichnet. In der Realität häufig vorkommende Entscheidungsvariablen können mit ihr abgebildet werden. Allerdings erhöht sich die Komplexität des Problems, weil die optimale Lösung dann nicht mehr auf einem Eckpunkt des Lösungsraums liegt. Verschiedene Lösungsverfahren wie beispielsweise der Branch-and-Bound Algorithmus erlauben das Finden einer optimalen Lösung, indem sie durch zusätzliche Randbedingungen Bereiche des Lösungsraums ausschließen. Der so verkleinerte Lösungsraum kann dann effizient durchsucht werden [Winston, 2004].

Enthält die Zielfunktion oder eine der Nebenbedingungen nichtlineare Zusammenhänge, dann gehört das Optimierungsproblem in die Klasse der *nicht-linearen Optimierung*. Die effiziente Lösungssuche gestaltet sich hier schwierig. Aktuelle Entwicklungen bei Algorithmen und Rechnern haben dazu geführt, dass „kleine“ Probleme mit besonderen Eigenschaften<sup>11</sup> gut

---

<sup>11</sup> Diese Eigenschaften beziehen beispielsweise auf die Größe und Konvexität des Lösungsraums.

lösbar sind: Solver finden Lösungen in akzeptablen Rechenzeiten. Bei einer Vielzahl von nicht-linearen Optimierungsproblemen kann jedoch kaum sichergestellt werden, dass globale Optima gefunden werden [Winston, 2004].

Wenn sich das Optimierungsproblem als mehrstufiges Entscheidungsproblem formulieren lässt, dann erlaubt die *dynamische Programmierung* eine effiziente Lösung. Sie basiert auf der Bellman'schen Funktionalgleichung, nach der jede Teillösung einer optimalen Lösung wiederum eine optimale Lösung des Teilproblems repräsentiert [Bertsekas, 1987]. Das Prinzip lässt sich beispielsweise am „Kürzeste-Wege-Optimierungsproblem“ erläutern: Hier gilt, dass jede Teilstrecke auf einem kürzesten Weg wiederum einen kürzesten Weg zwischen dem Anfangs- und Endpunkt der Teilstrecke darstellt. Optimierungsprobleme dieser Art lassen sich wie folgt beschreiben [Schneeweiß, 1992a]:

- 1) Zustandsvariable:  $z_t \in Z_t (t = 0, 1, \dots, T)$
- 2) Entscheidungsvariable:  $a_t \in A_t(z_t) (t = 0, 1, \dots, T - 1)$
- 3) Zustandstransformationsgleichung:  $z_{t+1} = f_t(z_t, a_t) (t = 0, 1, \dots, T - 1)$
- 4) Nutzenfunktion:  $g_t(z_t, a_{t-1}) (t = 1, \dots, T - 1)$
- 5) Zielfunktion:  $\max \sum_{t=1}^T g_t(z_t, a_{t-1})$

Jede Stufe  $t$  des Optimierungsproblems wird durch diskrete Zustände der Menge  $Z_t$  charakterisiert (1). Die Wahl der Zustände für die nächste Stufe erfolgt jeweils auf der aktuellen Entscheidungsstufe durch Entscheidungsvariablen (2). Da ein Zustand der nächsten Stufe nicht aus allen Zuständen der aktuellen Stufe erreicht werden kann, hängt die Menge  $A_t(z_t)$  der möglichen Entscheidungen vom aktuellen Zustand  $z_t$  ab. Die Auswirkung einer Entscheidung wird durch die Transformationsfunktion ermittelt (3). Der Nutzen eines Zustands und damit die Auswirkungen der Entscheidung auf die Zielfunktion werden in der Nutzenfunktion definiert (4 und 5).

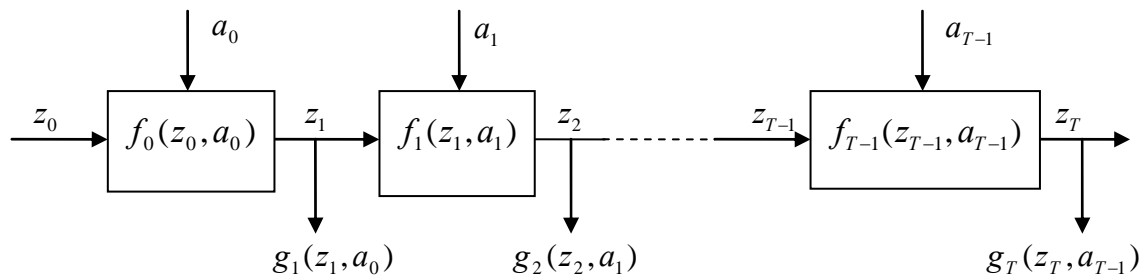


Abbildung 16: Zeitliche Stufenstruktur deterministisch-dynamischer Programme (i.A. an [Schneeweiß, 1992])

Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 16. Ausgehend von der Stufe 0 und dem Anfangszustand  $z_0$  wird bei gegebener Entscheidung  $a_0$  über die Transformationsfunktion  $f_0$  der Zustandswechsel zu  $z_1$  beschrieben. Der Zustand  $z_1$  führt zu einem Nutzen  $g_1$ . Bei weitergehender Betrachtung über mehrere Entscheidungsstufen zeigt sich der Charakter einer zeitdynamischen Planung: Auf jeder Zeitstufe werden diskrete Entscheidungen getroffen, wobei das Ziel eine Optimierung aller Entscheidungen  $a_0, \dots, a_{T-1}$  über der Zeit ist. Die Menge der Entscheidungen  $\{a_0, \dots, a_{T-1}\}$  wird als Strategie bezeichnet. Die beschriebene Nutzenmaximierung spiegelt sich in der Zielfunktion wider, die den kumulierten Nutzen über die Entscheidungsstufen repräsentiert.

Bei der Lösung des dynamischen Optimierungsproblems wird die Eigenschaft der mehrstufigen Zielfunktion und die Bellman'sche Funktionalgleichung genutzt: Durch Vorwärts- oder Rückwärtsrekursion über die Stufen lässt sich die optimale Teilstrategie in einen Zustand ermitteln. Dabei werden nur die Zustände der Vorstufe berücksichtigt, für die bereits eine optimale Strategie gefunden ist. Sind alle Stufen durchlaufen, so ist eine nutzenmaximale Gesamtstrategie sichergestellt. Abbildung 17 stellt das dynamische Optimierungsproblem als Entscheidungsbaum dar, in denen Zustände durch Knoten und Entscheidungen durch Kanten repräsentiert werden. Jeder Zustand wird durch genau eine optimale Kante erreicht. Eine genaue Darstellung des Optimierungsalgorithmus findet sich bei [Bertsekas, 1987].



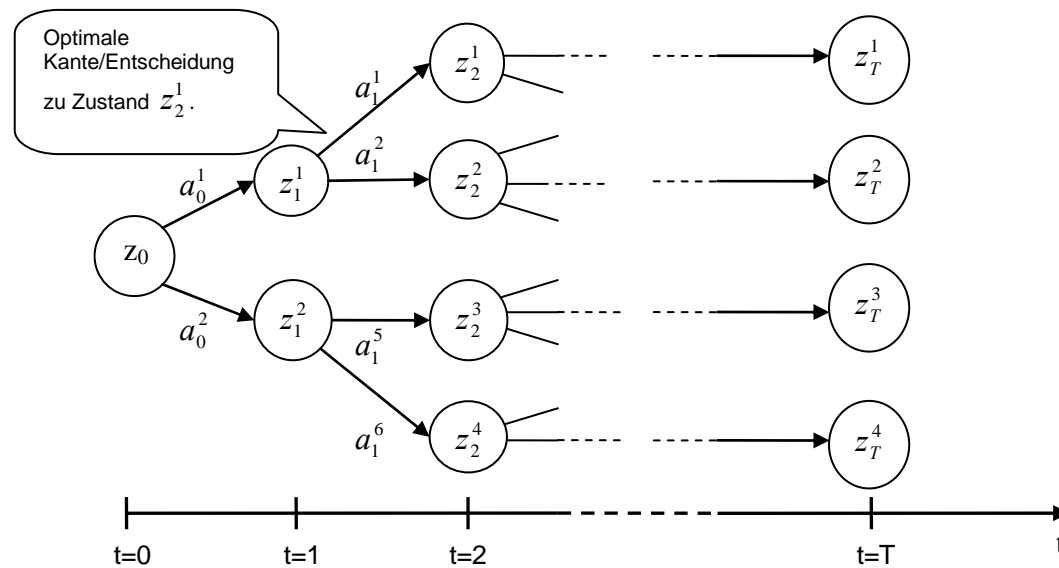


Abbildung 17: Entscheidungsbaum eines deterministischen dynamischen Programms

Aufgrund des entscheidungsorientierten Charakters der dynamischen Optimierung erscheint dieses Verfahren geeignet für die Antizipation der Flexibilitätsnutzung. Für diese Fragestellung wird sie von einigen Autoren eingesetzt (s. Abschnitt 3.1.2).

## Heuristische Verfahren

Da nicht alle in der Praxis auftretenden Fragestellungen mittels exakter Verfahren gelöst werden können, kommen *heuristische Verfahren* zum Einsatz. Sie können den zeitlichen Aufwand der Lösungssuche signifikant reduzieren, erlauben allerdings nur das Finden von annähernd optimalen Lösungen. Exemplarisch seien im Folgenden zwei Verfahren beschrieben:

- *Hill-Climbing*: Ausgehend von einer Lösung wird in deren Nachbarschaft nach einer besseren Lösung gesucht. Das Vorgehen wird so lange wiederholt, bis eine ausreichend gute Lösung gefunden ist. Es besteht das Risiko, dass nur ein lokales Optimum gefunden wird. Um das zu verhindern, kommen Lösungsverfahren des „*Tabu-Search*“ zum Einsatz, die ein Verlassen lokaler Optima ermöglichen [Hillier et al., 2005].
- *Genetische Algorithmen*: Genetische Algorithmen basieren auf dem Prinzip des „*Survival of the fittest*“, das aus der Evolutionstheorie abgeleitet ist. Eine Zwischenlösung des Optimierungsproblems wird als so genanntes „*Individuum*“ nach bestimmten Regeln mit anderen Zwischenlösungen kombiniert, so dass neue Zwischenlösungen mit „*vererbten*“ Eigenschaften entstehen. Genetische Algorithmen

eignen sich besonders für Optimierungsprobleme, die gut zu strukturieren sind. Als Beispiel seien Reihenfolgeprobleme genannt [Goldberg, 1989].

### 3.1.2 Anwendungen

Auf Ansätze der mathematischen Optimierung greifen insbesondere seit dem Vorhandensein leistungsfähiger Computer viele Autoren zurück. Im Folgenden werden deshalb theoretische und praktische Anwendungen der oben beschriebenen Verfahren dargestellt. Es erfolgt jeweils eine Kritik der Ansätze mit dem Ziel, die praktische Umsetzbarkeit der Verfahren auf die Flexibilitätsbewertung zu prüfen.

#### Ein allgemeiner Planungsansatz für flexible Systeme bei Unsicherheit

Ausgehend von der Erkenntnis, dass Entscheidungen unter deterministischen Vorgaben anders getroffen werden als unter Berücksichtigung von Unsicherheit, präsentiert *Schneeweiß* das Konzept der flexiblen Planung für dynamische Systeme [Schneeweiß, 1992a]. Er geht davon aus, dass sich Unsicherheit und dynamische Entwicklungsmöglichkeiten in Systemen durch Entscheidungsbäume darstellen lassen. Die Knoten der Bäume unterscheidet er nach Entscheidungs- und Zufallsknoten, die vom Entscheidungszeitpunkt ausgehend in die Zukunft entwickelt werden. Jeder Entscheidungsknoten repräsentiert eine Entscheidung im Sinne einer dynamischen Anpassung des Systems. Die Entscheidungsknoten der ersten Planungsstufe entsprechen verschiedenen Gestaltungsalternativen.

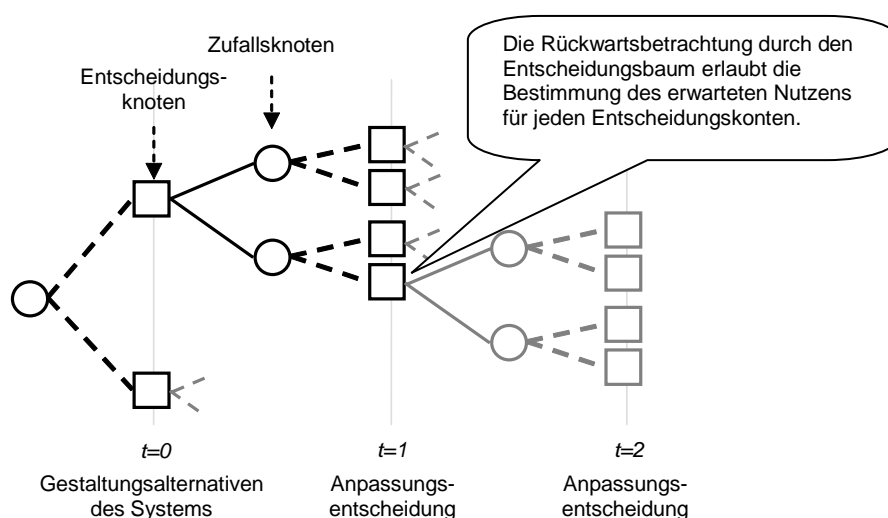


Abbildung 18: Entscheidungsbaum der flexiblen Planung

Die Vorteilhaftigkeit jeder Entscheidung ist abhängig von der unsicheren Zukunftsentwicklung. Diese wird durch Zufallsknoten der nachfolgenden Planungsstufen dargestellt, die mit ihrer Wahrscheinlichkeit gewichtet sind. Über eine Rückwärtsbetrachtung durch den Entscheidungsbaum lässt sich der Erwartungswert des Nutzens eines Entscheidungsknotens ermitteln (vgl. Abbildung 18). Als Lösungsverfahren wird auf die stochastisch-dynamische Programmierung verwiesen. Sie findet bei Rückwärtsrekursion durch die Planungsstufen eine optimale Entscheidung für die erste Planungsstufe. Das Verfahren lässt sich in einer rollierenden Planung in die Zukunft fortsetzen.

Die flexible Planung unterstützt Entscheidungen bei Dynamik und Unsicherheit und erlaubt eine antizipative Bewertung des Flexibilitätspotenzials. Der Aufbau macht prinzipiell eine Betrachtung aller Flexibilitätsdimensionen möglich, da die Gestaltungsalternativen in den Entscheidungsknoten vollständig beschrieben werden können. Auch den Forderungen nach einer kennzahlenorientierten Planung wird dieser Ansatz gerecht. Allerdings kann die Nutzenfunktion zur Wahl der Anpassungsentscheidungen nur auf einer Kennzahl oder mehreren gewichteten Kennzahlen basieren, die den Anforderungen des Bellmannsch'en Optimalitätsprinzips genügen. Schneeweiß schlägt an dieser Stelle die Nutzung des Kapitalwerts vor.

Damit sind alle wesentlichen Forderungen erfüllt. Das theoretische Konzept der flexiblen Planung lässt sich jedoch nur begrenzt auf größere Planungsprobleme anwenden, weil die Problemkomplexität überproportional mit den Anpassungsmöglichkeiten und dem Planungshorizont steigt. Diese Schwierigkeit wird verstärkt, wenn das Bellmann'sche Optimalitätsprinzip nicht gilt. In diesem Fall muss der Zustandsraum zusätzlich erweitert werden, um die dynamische Programmierung als effizientes Lösungsverfahren nutzen zu können. Eine Lösbarkeit ist aus diesem Grund mit heutigen Rechnerleistungen nicht immer gegeben. Schneeweiß schlägt deshalb Möglichkeiten der Komplexitätsreduktion vor. Er erörtert beispielsweise die Reduktion des Entscheidungsproblems um die Dynamik und die Stochastik. Während die Vernachlässigung der Dynamik zu einer statischen Planung führt, resultiert der Verzicht bzw. teilweise Verzicht auf die Zufallsknoten in eine deterministisch-dynamische Planung bzw. in eine flexible Planung mit verkürztem Zustandsraum. Die beiden letzteren sind zielführend für die Flexibilitätsbewertung, müssen allerdings für die Planungsprobleme kontextspezifisch geprüft werden. Wie im Folgenden aufgezeigt wird, hat sich für die Flexibilitätsplanung insbesondere die deterministisch-dynamische Planung durchgesetzt.

### **Ein deterministischer Ansatz zur Planung flexibler Arbeitszeiten**

Ziel des Ansatzes von *Faißt, Schneeweiß und Günther* ist die Planung der Jahresarbeitszeit, d.h. die Verteilung der tariflichen und übertariflichen Arbeitszeit über das Planungsjahr [Faißt et al., 1991]. Sie erfolgt auf der Basis mathematischer Optimierungsverfahren und wird ergänzt durch Simulations- und Sensitivitätsanalysen. Grundlage der Optimierung sind die Rahmenbedingungen der Produktion: Der Flexibilitätsbedarf wird durch Nachfrageszenarien angegeben, während das Flexibilitätsangebot durch die bestehenden Tarifvereinbarungen definiert ist. Die Auswirkungen von Entscheidungen werden über Kostenfunktionen ermittelt. Darauf aufbauend wird der Produktionsbetrieb mittels eines linearen und mehrstufigen Optimierungsmodells optimiert. Ergebnis sind erforderliche Überstunden, Lagerbestände und die Produktionsmenge pro Periode. Der Planer hat die Möglichkeit, die Ergebnisse iterativ an weitere betriebliche Rahmenbedingungen anzupassen. So können manuell Brückentage, Betriebsruhen, Frei- und Zusatzschichten integriert werden.

Der Ansatz zeigt die Möglichkeiten mathematischer Optimierungsverfahren für die Betriebsplanung auf. Durch die Simulation und die Sensitivitätsanalysen kann der Produktionsbetrieb für verschiedene dynamische Nachfrageszenarien optimiert und bewertet werden. Allerdings wird bei der Schichtplanung an vielen Stellen auf das Fachwissen der Planer zurückgegriffen. Demzufolge liegt das Ziel des Ansatzes weniger in einer ganzheitlichen Optimierung des Produktionsbetriebs als in einer Unterstützung der Betriebsplanung. Prinzipiell macht der Ansatz eine antizipative Planung des Montagebetriebs möglich. Der Fokus liegt jedoch auf organisatorischen Möglichkeiten. Infolgedessen wäre eine Anpassung der Methode auf das vollständige Aktionsvolumen der Flexibilitätsplanung erforderlich.

### **Ein statischer Ansatz zur Produktions- und Arbeitskräfteplanung**

Einen interessanten Ansatz für die strategische Automobilmontageplanung stellen *Inman und Jordan* vor [Inman et al., 1997]. Ziel ist eine arbeitskräfteminimale Produktallokation für eine gegebene Anzahl Montagelinien. In einem ersten Schritt wird über ein heuristisches Verfahren eine Produktallokation gefunden, bei der die Differenz der Montagezeiten für die unterschiedlichen Produkte auf den einzelnen Linien minimiert wird. Durch die Heuristik lässt sich eine gute zulässige Anfangslösung ermitteln. In einem zweiten Schritt verbessert ein Branch-and-Bound Verfahren diese Lösung iterativ. Sein Ziel ist die Minimierung der Arbeitskräfte-Bedarfe. Dafür werden weitere Produktallokation auf Linien untersucht, erforderliche Taktzeiten und Arbeitskräfte-Bedarfe ermittelt und mit der Zeit bessere Lösungen gefunden.

Für das gegebene theoretische Planungsproblem liefert der Ansatz schnell arbeitskräfte-minimale Lösungen. Der Branch-and-Bound Ansatz ermöglicht ein Abbrechen der Optimierung, sobald eine zufrieden stellende Lösung gefunden ist. Die Planung für das Montagesystem ist allerdings statisch-deterministisch. Für eine Flexibilitätsbewertung erforderliche dynamische Effekte werden außer Acht gelassen. Daraus ergibt sich, dass Anpassungen der Linie und daraus resultierende Kosten nicht berücksichtigt werden. Außerdem erlaubt der Ansatz keine Bewertung der Routenflexibilität, da die Produktion gleicher Fahrzeuge auf verschiedenen Montagelinien nicht modelliert wird. Der eigentliche Vorteil flexibler Produktionskonzepte, der sich erst über der Zeit und durch die Kombination der Flexibilitätsarten ausdrückt, wird nicht bewertet. Dies gilt insbesondere für eine dynamische Nachfrage und Flexibilitätsnutzung.

### **Ein Ansatz zur kapazitiven Flexibilitätsbewertung**

Einen Ansatz zur Bestimmung optimaler Kapazitäten bei gegebener Flexibilitätsstrategie im Produktionsverbund liefern *Chandra, Everson und Grabis* [Chandra et al., 2005]. Entscheidungsvariablen der Optimierung sind Kapazitäten sowohl für die Montage als auch für die Zulieferindustrie. Kapazitäten für Gleichteile werden explizit berücksichtigt. Zur Lösung des Planungsproblems entwickeln die Autoren ein zweistufig hierarchisches Optimierungsmodell. Auf strategischer Ebene wird mittels eines genetischen Algorithmus eine Entscheidung über die Kapazität der Werke und der Zulieferer getroffen. Für jede Kapazitätsstrategie antizipiert in der Folge ein lineares Optimierungsmodell den maximalen Gewinn für verschiedene gewichtete Nachfrageszenarien. Einflussvariablen auf den Produktionsbetrieb wie Marketingmaßnahmen und Umweltrichtlinien werden in die Berechnungen einbezogen.

Der von den Autoren präsentierte Ansatz ist in der Lage, Probleme realistischer Größe zu berechnen. Unsicherheiten der Nachfrage werden durch die dynamische Betrachtung berücksichtigt. Allerdings werden die Kosten des Produktionsbetriebs nur eingeschränkt betrachtet, da spätere Investitionen in Kapazitätsanpassungen, z. B. Umtaktungen, nicht berücksichtigt werden. Der Ansatz eignet sich prinzipiell für die strategische Montageplanung, muss jedoch um spezifische Charakteristika des Montagebetriebs ergänzt werden. Exemplarisch seien neben den Umtaktungen die Lerneffekte und arbeitsorganisatorische Randbedingungen wie das Arbeitszeitkonto genannt.

## **Ein Modell zur Bewertung der Lieferfähigkeit bei Produktflexibilität**

*Jordan und Graves* entwickeln ein Modell zur Bewertung von produktflexiblen einstufigen Produktionsnetzwerken [Jordan et al., 1995]. Das statische Modell ermittelt den Erwartungswert der Lieferfähigkeit bei unsicherer Nachfrage. Dieser wird als Bewertungskriterium der Flexibilitätsstrategie herangezogen. Gegeben sind jeweils die Produktflexibilitäten und Kapazitäten einzelner Elemente des Produktionssystems.

Jordan und Graves weisen in numerischen Studien nach, dass teilflexible Flexibilitätsstrategien annähernd den gleichen Nutzen haben wie vollflexible Strategien. Sie bewerten diese Strategien jedoch ausschließlich in Bezug auf die Lieferfähigkeit und für eine Planungsperiode. Eine Betrachtung der Kosten findet nicht statt. Auch sind Lerneffekte und andere Potenziale der Volumenflexibilität, die evtl. eine schnelle Kapazitätssteigerung auf Solitärlinien erlauben, nicht in die Modelle integriert. Der Ansatz ist dennoch sehr interessant, zeigt er doch auf, dass bereits durch den Aufbau eines begrenzten Flexibilitätsangebots ein hoher Nutzen erzielt werden kann. Gleichzeitig gilt, dass dieser Aufbau einem abnehmenden Grenznutzen unterliegt. Investitionen in Flexibilität müssen demzufolge richtig dimensioniert werden.

### **3.2 Systemdynamische Bewertungsansätze**

Die Entwicklung von Modellen zur Antizipation eines zukünftigen Systemverhaltens führt schnell zu der Erkenntnis, dass nicht alle in der Realität zu erwartenden Wirkzusammenhänge geschlossen funktional beschrieben werden können. Vielmehr sind durch Menschen und ihr Entscheidungsverhalten beeinflusste Ursache-Wirkzusammenhänge kausaler Natur. Sie zeichnen sich durch folgende Aspekte aus:

- *Nicht-Linearitäten*: Nicht alle Wirkzusammenhänge lassen sich mathematisch linear formulieren.
- *Rückkopplungseffekte*: Die Vernetzung der Variablen führt dazu, dass die Entscheidungen die zugrunde gelegten Prämissen verändern.
- *Dynamik*: Das zeitliche Verhalten von Systemen führt zu Verzögerungen und Instabilitäten, die sich nur schwer mathematisch fassen lassen.

Wenn diese Effekte stark ausgeprägt sind, dann lassen sich die in Kapitel 3.1 beschriebenen Optimierungsverfahren nur noch schwer anwenden. Die Komplexität der Realität soll jedoch bei Entscheidungen nicht vernachlässigt werden. An dieser Stelle setzt die „System Dynamics“ Theorie an [Nagel, 2003].

### 3.2.1 Einführung in die System Dynamics Theorie

Die von Forrester in den 60er Jahren entwickelte Methode der „System Dynamics“<sup>12</sup> versucht, die oben beschriebene Komplexität in Modelle einzubinden. Sie versteht sich als allgemeine Theorie des Verhaltens dynamischer komplexer Systeme [Wunderlich, 2002] und beruht auf drei Grundprinzipien [Nagel, 2003]:

- Erarbeitung eines Problem- und Systemverständnisses auf der Basis der allgemeinen Strukturtheorie zum Aufbau von Systemen.
- Berücksichtigung von Informations-Rückkopplungseffekten.
- Anwendung von allgemeinen Modellen und Verfahren zur computergestützten Simulation.

Die Analyse von zeitdynamischen Rückkopplungseffekten stellt einen Schwerpunkt dar. Sie werden in den System Dynamics Simulationsmodellen als kreisförmige Wirkzusammenhänge, so genannten Rückkopplungsschleifen oder „Feedback-Loops“, dargestellt. Positive Wirkzusammenhänge haben Auswirkungen in eine definierte Richtung. Negative Wirkzusammenhänge wirken dieser Richtung entgegen und begrenzen den Effekt [Hopfmann, 1988]. Als Beispiel wird die Modellierung eines Populationswachstums herangezogen. Werden die sich selbst verstärkenden Wachstumstendenzen einer Population über der Zeit definiert, so ist ein positiver Wirkzusammenhang beschrieben. Ein negativer Wirkzusammenhang ergibt sich beispielsweise durch einen aus dem Wachstum folgenden steigenden Nahrungsmittelmangel. Im Simulationslauf werden diese Wirkzusammenhänge aktiviert. Sie werden so lange durchlaufen, bis ein eingeschwungener Zustand erreicht ist. Dieser repräsentiert die Auswirkung der getroffenen Entscheidungen [Nagel, 2003]. Dabei können hochgradig vernetzte Systeme untersucht werden, die aus mehreren und verschachtelten Feedback-Loops bestehen.

Das Verhalten von Systemen ist abhängig von äußeren Einflüssen. In System Dynamics Modellen steht jedoch nicht der Einfluss exogener Variablen auf das System im Kern der Untersuchung, sondern die Analyse des systemimmanenten Verhaltens [Forrester, 1968]. Können solche Entscheidungsprobleme nicht mehr auf der Grundlage mathematischer Optimierungsmodelle gelöst werden, dann dienen System Dynamics Modelle ihrer Bewertung

---

<sup>12</sup> Aufgrund der Übertragung auf andere Fragestellungen wurden die „Industrial Dynamics“ in „System Dynamics“ umbenannt [Wunderlich, 2002].

und ihrem Verständnis. Da sie sich aufgrund der Systemdynamik prinzipiell für die Flexibilitätsbewertung eignen, folgt eine Übersicht der relevanten Arbeiten.

### 3.2.2 Anwendungen

Eine Beschreibung des Vorgehens bei der Nutzung von System Dynamics Modellen für die Montageplanung liefern *Gagsch und Herbst* [Gagsch et al., 2001]. Sie sehen insbesondere für die Montageplanung die wichtige Möglichkeit, neben harten, funktional zu modellierenden Faktoren auch weiche Faktoren wie die Kundenorientierung eines Unternehmens zu modellieren. In ihrer Arbeit wird ein Phasenkonzept zur Erstellung der Simulationsmodelle vorgeschlagen, das neben der Identifikation und Analyse des Problems, der Modellierung und Programmierung explizit die Diskussion der Ergebnisse beinhaltet. Auf Basis der Analyse verschiedener Montagekonfigurationen mit jeweils unterschiedlichen Marktanforderungen können Entscheidungsempfehlungen gegeben werden.

In der Arbeit von *Bunz und Hopfmann* wird die optimale Flexibilität von Montagesystemen untersucht [Bunz et al., 1987]. Als Flexibilitätsdifferenz<sup>13</sup> wird die Differenz zwischen dem Flexibilitätsangebot des Montagesystems und der Flexibilitätsbedarf des Marktes definiert. Die Differenz wird für die Dimensionen Preis, Qualität und Lieferzeit ermittelt. Ziel ist die Ausrichtung des Flexibilitätsangebots auf die Flexibilitätsdifferenz. Als Anpassungsbefähiger werden die Betriebsmittel, die Arbeitskräfte und die Materiallogistik einbezogen. Die Flexibilitätsdifferenz wird in einer Rückkopplungsschleife modelliert: Eine steigende Differenz führt zu Anpassungsinvestitionen. Dadurch erhöht sich die Flexibilität des Montagesystems, was wiederum eine Reduktion der Differenz zur Folge hat. Während die Investitionen negative Auswirkungen auf den Unternehmenserfolg haben, wirkt sich die Erhöhung des Flexibilitätsangebots positiv auf ihn aus.

Das aufgebaute Simulationsmodell soll eine Bewertung verschiedener Montagesysteme ermöglichen. Voraussetzung für die Anwendung ist die Kenntnis der Flexibilitätsdifferenz. Für dessen Ermittlung muss bekannt sein, wie das Montagesystem auf den konkreten Flexibilitätsbedarf reagiert. Erst hieraus lässt sich ableiten, ob weitere Anpassungen erforderlich sind. Kritisch anzumerken ist deshalb der hohe Abstraktionsgrad dieses Modells, der eine detaillierte Modellierung dieses Sachverhalts nicht ermöglicht. Außerdem werden auf der

---

<sup>13</sup> Die Autoren verwenden den Begriff Flexibilitätsbedarf. Da der Begriff im Rahmen der Arbeit anderweitig verwendet wird, wird hier der Begriff der Flexibilitätsdifferenz genutzt.



Makro-Ebene wichtige Faktoren vernachlässigt: So werden die Auswirkungen der Flexibilität auf die hier als externe Einflussgröße definierte Nachfrage außer Acht gelassen.

Einen weiteren Ansatz bietet *Hopfmann* 1988 [Hopfmann, 1988]. Er analysiert und bewertet Flexibilitätspotenziale im Produktionsbereich, indem er -ausgehend vom Nachfrageverhalten der Kunden- Ursache-Wirkzusammenhänge modelliert. Er konzentriert sich auf die Lieferzeit, von deren Ausprägung der Unternehmenserfolg abhängt. Feedback-Loops beschreiben die Wechselwirkungen der Bestandsflexibilität und der Anpassungsflexibilität. Erstere beinhalten beispielsweise Aussagen zu Wechselwirkungen zwischen Beständen und Lieferzeit oder zwischen Auftragsrate, Materialbedarf und Fehlmengen. Letztere zeigen die Zusammenhänge zwischen Kapazitätsbedarf, Kapazitätsveränderung und Rentabilität auf. Beide werden in einem Gesamtmodell zusammengeführt, das die Wechselwirkungen zwischen der Bestands- und Anpassungsflexibilität darstellt. Das Ergebnis wird in Form von Gewinn und Marktanteil beurteilt [Hopfmann, 1988].

Der System Dynamics Ansatz von *Nagel* hat zum Ziel, flexible Produktionssysteme zu analysieren. Auf der Analyse aufbauend sollen die wichtigsten Kostentreiber identifiziert werden, um eine Optimierung des Produktionssystems zu ermöglichen. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der quantitativen Analyse der entstehenden Flexibilitätskosten, die bei erhöhter Nachfrage und damit verbundenen Kapazitätsausweitungen auftreten [Nagel, 2003]. Das erarbeitete Modell bildet die reale Komplexität weitestgehend ab. Sie wäre mit funktionalen Zusammenhängen kaum zu beschreiben. Allerdings ist das von ihr entwickelte Modell sehr fallspezifisch und lässt sich kaum auf anderweitige Fragestellungen übertragen.

### **3.3 Defizite und Ableitung des Handlungsbedarfs**

Die in den Kapiteln 3.1 und 3.2 erläuterten Ansätze kommen prinzipiell für eine Antizipation der Flexibilitätsnutzung in Betracht. Die Vorteilhaftigkeit der Verfahren ist jedoch abhängig von den Merkmalen der Fragestellung. In diesem Kapitel werden die auftretenden Defizite erläutert, um daraus den Handlungsbedarf abzuleiten. In Abschnitt 3.3.3 wird dieser Handlungsbedarf konkretisiert und in einem Lösungskonzept zusammengefasst.

#### **3.3.1 Defizite der vorgestellten Ansätze**

Die Analyse der *Optimierungsverfahren* und ihrer Ansätze zur Flexibilitätsplanung bestätigt, dass sie zur Antizipation des Produktionsbetriebs geeignet sind. Sie erlauben eine dynamische und antizipative Planung. Jedoch setzt ihre Anwendung eine mathematische Formulierbarkeit

des Planungsproblems und verfügbare effiziente Optimierungsalgorithmen voraus. Existieren keine effizienten exakten Verfahren, dann kann nur auf heuristische Verfahren zurückgegriffen werden oder das Planungsproblem reduziert werden. Durch solche Maßnahmen sinkt die Qualität des Planungsergebnisses, was Fragen bezüglich ihrer Aussagekraft aufwirft. Der Montagebetrieb zeichnet sich durch einige Charakteristika aus, die den Einsatz von Optimierungsverfahren erschweren:

- *Anzahl der Entscheidungsvariablen*: Die Möglichkeiten der Flexibilitätsnutzung sind vielfältig, da die Flexibilitätsarten kombiniert eingesetzt werden.
- *Nicht-Linearitäten*: Die Zusammenhänge im Montagebetrieb sind nicht linear. Z. B. resultiert der Arbeitskräftebedarf aus logarithmischen Lernkurveneffekten.
- *Kontinuierliche und diskrete Variablen*: Die Modellierung des Montagebetriebs erfordert eine Kombination aus kontinuierlichen und diskreten Variablen. Während die Schichtlänge quasi kontinuierlich angepasst werden kann, wird die Anpassung des Schichtbetriebs mit Früh-, Spät-, Nacht- und Feiertagsschichten diskret durchgeführt.

Gelingt die Formulierung eines effizienten Optimierungsmodells bei diesen Randbedingungen, dann lassen sich alle Anforderungen an die Planungsmethodik erfüllen. Jedoch fehlen bisher Modelle, die das Flexibilitätsangebot und seine Nutzung umfassend beschreiben.

Eine allgemeine Bewertung der *System Dynamics Modelle* ist kaum möglich, da ihr Nutzen stark vom Anwendungsfeld abhängt. Sie entfalten ihr Potenzial vor allem in Bereichen, in denen ein Verständnis für komplexe dynamische Systeme erarbeitet werden soll. Der Aufbau und der „experimentelle“ Einsatz der Simulationsmodelle erlaubt eine Diskussion und Analyse der Wirkzusammenhänge. Dies führt insbesondere bei stark zeitversetzten oder funktional schwer zu beschreibenden Wirkzusammenhängen zu erweiterten Erkenntnissen und einer Vermeidung von Fehlentscheidungen [Gagsch et al., 2001].

Auf der anderen Seite kann trotz eines erheblichen Analyse- und Entwicklungsaufwands das Risiko einer hohen Diskrepanz zwischen der realen und simulierten Entwicklung nicht ausgeschlossen werden [Gagsch et al., 2001]. Je schwieriger die Auswirkungen von Wechselwirkungen quantifiziert werden können, z. B. wenn positive und negative Effekte gleichzeitig auf ein Objekt wirken, desto gewichtiger wird dieser Einwand. Eine zusätzliche Schwierigkeit entsteht dadurch, dass aus dem zukünftigen Entscheidungsverhalten resultierende diskrete Zustände des Produktionssystems nicht modelliert werden können. Entsprechend sind

Aussagen zur konkreten Reaktion des Produktionssystems auf Flexibilitätsbedarfe und darauf aufbauende monetären Auswertungen kaum möglich. Mit diesen Eigenschaften eignen sich die System Dynamics Modelle nicht als Entscheidungsgrundlage für Produktionssysteme.

### 3.3.2 Handlungsbedarf

Aus den beschriebenen Anwendungen ergibt sich, dass eine Vielzahl praktischer Probleme mit Optimierungsverfahren gelöst werden können. Sie zeigen aber auch, dass die eingesetzten Verfahren an die kontextspezifischen Anforderungen angepasst werden müssen. Ganzheitliche Ansätze, die die Flexibilitätsstrategie unter Berücksichtigung der zukünftigen Flexibilitätsnutzung optimieren, existieren derzeit noch nicht. Da die beschriebenen Verfahren im Wesentlichen aufgrund der hohen Komplexität der Entscheidungsprobleme an ihre Grenzen stoßen, ist eine Steigerung der Komplexität nicht zielführend. Eine integrierte Optimierung von Flexibilitätsangebot und Flexibilitätsnutzung erscheint damit genauso wenig möglich wie eine Stochastik im Optimierungsmodell. Vielmehr sollten die Auswirkungen von Investitionsalternativen der strategischen Montageplanung auf den operativen Montagebetrieb antizipiert werden: Auf strategischer Ebene können in einem ersten Schritt Investitionsalternativen unter voller Einbeziehung des Expertenwissens generiert werden. Der entstehende Nutzen wird dann in einem zweiten Schritt aus der Optimierung der operativen Ebene abgeleitet. Dieser Ansatz wird auch von *Faißt, Günther und Schneeweiß* als Ausweg aus der Komplexitätsfalle angesehen (vgl. Abschnitt 3.1.2). Er unterstützt außerdem die Einbeziehung der Marktunsicherheit: Sie kann über eine repräsentative Mehr-Szenarien-Betrachtung berücksichtigt werden.

Die Wahl des Optimierungsverfahrens stellt eine wesentliche Herausforderung dar. Als geeignetes Verfahren wird von *Schneeweiß und Kühn* auf die dynamische Programmierung verwiesen. Sie wird in der strategischen und taktischen Planung angewandt, um die Bewertung und Gestaltung flexibler Anlagen zu unterstützen [Schneeweiß et al., 1990]. Kann das Verfahren auf die sozio-technische Montage übertragen werden, dann können schwer zu lösende nicht-lineare Programme umgangen werden.

Aufgrund dieser Erkenntnisse soll im Folgenden ein Modell entwickelt werden, dass die strategische Montageplanung bei der Bewertung von Flexibilitätsstrategien auf Basis von Optimierungsverfahren unterstützt. Dieses muss als wesentliche Bestandteile die operative Produktions- und Arbeitszeitplanung für eine gegebene Flexibilitätsstrategie integrieren.

Dabei sind montagespezifische Randbedingungen, die eine Antizipation des zukünftigen Entscheidungsverhaltens erschweren, zu beachten.

### 3.3.3 Lösungskonzept der Planungsmethodik

Im Sinne einer Konkretisierung des Handlungsbedarfs sollen die herausgearbeiteten Defizite in einer weiterentwickelten Planungsmethodik aufgehoben werden. Der Aufbau der Methodik ist in Abbildung 19 aufgezeigt.

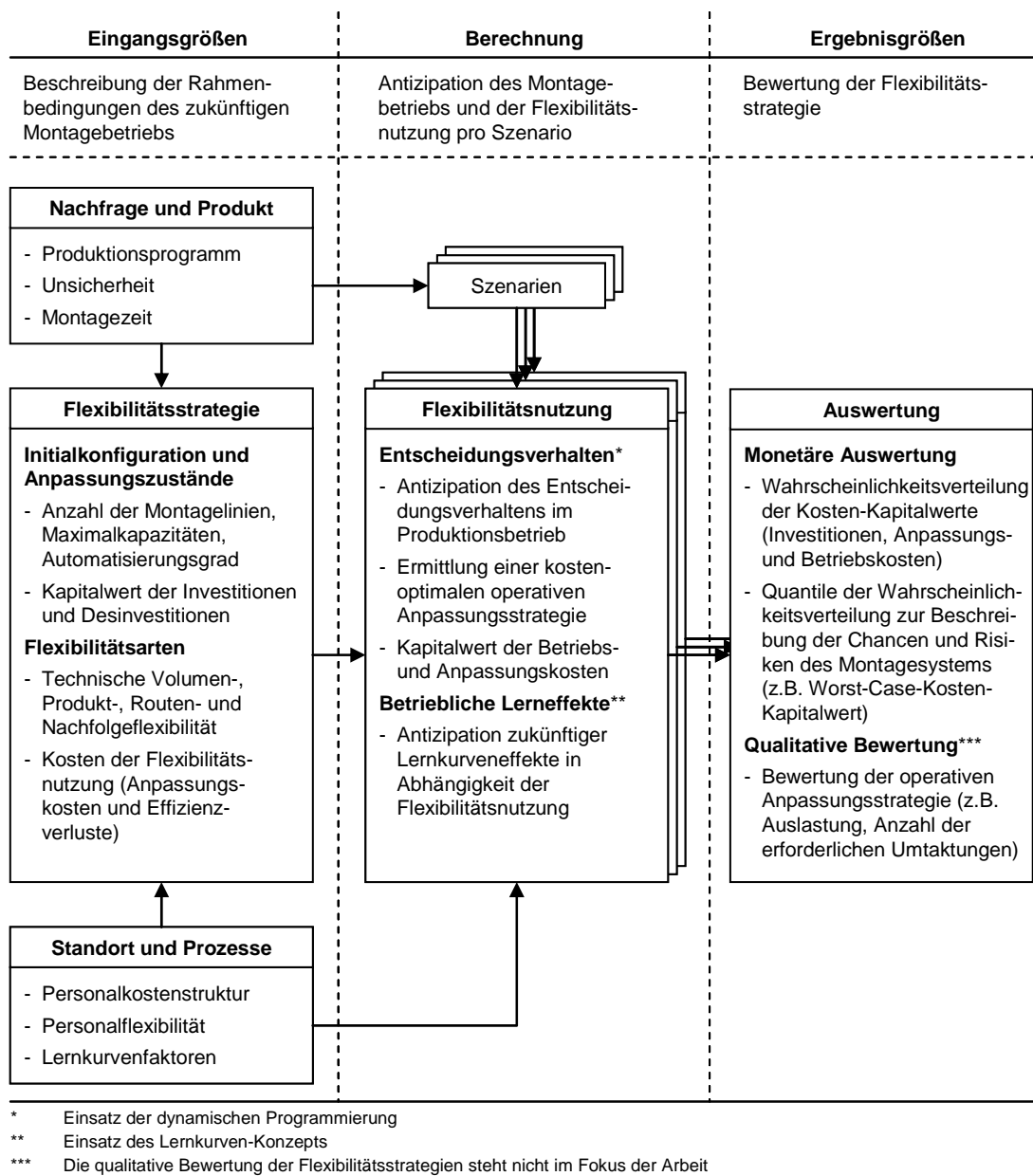


Abbildung 19: Lösungskonzept einer Planungsmethodik zur Bewertung von Flexibilitätsstrategien

Grundlage der Flexibilitätsplanung ist die vom Kunden getriebene Nachfrage nach Produkten. Sie spiegelt sich wider im erwarteten Produktionsprogramm und in der erwarteten Montage-

zeit. Aus Ressourcensicht sind die verfügbaren Prozesstechnologien und die standortspezifischen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Während Prozesse über ihren Reifegrad, beispielsweise ihre technische Verfügbarkeit und Lernkurvenfaktoren beschrieben werden, zeichnet sich der Standort durch eine spezifische Kostenstruktur und Personalflexibilität aus.

Darauf aufbauend plant die strategische Montageplanung Flexibilitätsstrategien. Sie sind definiert durch eine Initialkonfiguration des Produktionssystems und linienbezogene Investitionen und Desinvestitionen in der Zukunft. Damit sind die Anzahl und Kapazitäten der Linien, deren Automatisierungsgrad und die technische Volumen-, Produkt-, Routen- und Nachfolgeflexibilität über der Zeit festgelegt. Die implementierte Flexibilität lässt sich dabei erstens durch einmalige Kosten der operativen Flexibilitätsnutzung definieren. Sie werden als *Anpassungskosten* bezeichnet und repräsentieren beispielsweise Rüst- und Qualifizierungskosten. Zweitens sind die *Effizienzverluste* nach der operativen Flexibilitätsnutzung zu beschreiben. So sinkt die Linieneffizienz nach dem Anlauf neuer Produkte bzw. nach Umtaktungen, um nachher über betriebliche Lerneffekte wieder zu steigen.

Auf Basis der Kenntnisse über das Produktionssystem erfolgt szenariobasiert die Antizipation der zukünftigen Flexibilitätsnutzung. Als Flexibilitätsbedarf werden zukünftige Nachfrage- und Montagezeitentwicklungen vorgegeben oder über eine Monte-Carlo-Simulation generiert. Die Unsicherheit geht über die Wahrscheinlichkeit jedes Szenarios ein. In Anlehnung an Schneeweiß wird anschließend das Flexibilitätsangebot des Gewerks Montage optimal an den Flexibilitätsbedarf angepasst. Der Optimierungsalgorithmus berechnet für jedes Nachfrageszenario ein kostenoptimales Entscheidungsverhalten der operativen Planung über der Zeit. Er optimiert dabei neben einer Verteilung des Produktionsprogramms auf die Montagelinien die Taktzeiten und Schichtmodelle der Linien. Gleichzeitig wird eine optimale Personalplanung bezüglich erforderlicher Ein- und Ausstellungen bei gegebenen personalpolitischen Randbedingungen bestimmt. Grundlage des Optimierungsalgorithmus ist ein Modell der Montage, das sowohl die Personalkosten als auch die operativen Anpassungskosten errechnet. Als Zielgröße der Optimierung dient der Kosten-Kapitalwert, der einen Bezug der Betriebskosten zum Planungszeitpunkt sicherstellt.

Die kontinuierlichen Lerneffekte im Montagebetrieb können nicht im Detail durch den Optimierungsalgorithmus aufgezeigt werden. Sie sind jedoch als Flexibilitätsbedarf bzw. -angebot zu berücksichtigen. In die Methodik wird infolgedessen ein Lernkurven-Modell integriert. Es

antizipiert betriebliche Lerneffekte in Abhängigkeit der Flexibilitätsnutzung, beispielsweise nach Neuanläufen und Umtaktungen auf Solitär- oder produktflexiblen Linien.

Zur Umsetzung des Konzepts sind drei Modelle zu erarbeiten. Das *Modell der Montage-Wirkzusammenhänge* bildet die Grundlage: Es modelliert die Abhängigkeiten zwischen Flexibilitätsbedarf, -angebot und Betriebskosten. Das *Optimierungsmodell* berechnet ein kostenoptimales Entscheidungsverhalten des operativen Montagebetriebs. Lerneffekte gehen über das *Lernkurvenmodell* ein. Damit ist eine realistische Antizipation des Montagebetriebs und seiner Betriebskosten für deterministische Nachfrageszenarien möglich. Durch Addition der Kapitalwerte der Investitionen in die technischen Anlagen folgt der Gesamtkosten-Kapitalwert. Je geringer er ist, desto höher der Nutzen des geplanten Systems.

Zur Bewertung einer Flexibilitätsstrategie reicht jedoch die isolierte Betrachtung einzelner, deterministischer Szenarien nicht aus. Ein repräsentatives Bild des zukünftigen Flexibilitätsbedarfs wird geschaffen, wenn die Unsicherheit der Nachfrage über eine Vielzahl von Nachfrageszenarien aggregiert wird. Dafür wird der mittlere Kosten-Kapitalwert berechnet. Er beschreibt den mittleren Nutzen der Flexibilitätsstrategie. Chancen und Risiken der Strategie werden über Quantile der Kapitalwert-Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt. Ein Quantil repräsentiert ein definiertes Risiko oder eine definierte Chance. So kann der Planer ableiten, wie vorteilhaft eine technische Investition ist, und weitere Optimierungsmaßnahmen vornehmen. Neben der monetären Bewertung, die im Fokus der Arbeit steht, lassen sich weitere quantitative Aussagen aus der Antizipation des Montagebetriebs ableiten. Exemplarisch genannt sei die Auslastung der Linien, die Anzahl der Umtaktungen, die Häufigkeit der Schichtgruppen-Wechsel etc. Auch für diese Kenngrößen existieren Wahrscheinlichkeitsverteilungen, deren Mittelwerte den mittleren Nutzen darlegen, während die Quantile Chancen und Risiken repräsentieren.

## 4 Modell der Montage-Wirkzusammenhänge

Als Grundlage der Antizipation des Montagebetriebs wird in diesem Kapitel das Modell der Montage-Wirkzusammenhänge erarbeitet. Es erlaubt eine monetäre Bewertung des Flexibilitätsnutzens. Das Modell ist allgemein formuliert und lässt sich in seiner Struktur auf alle im Rahmen der Arbeit untersuchten Montagen anwenden<sup>14</sup>.

Grundlage des Modells sind markt- und standortspezifische Eingangsgrößen und die Flexibilitätsstrategie, die u.a. durch die Produkt- und Volumenflexibilität der Montagelinien beschrieben wird. Die Konfiguration des Montagebetriebs erfolgt dann über Entscheidungsvariablen wie beispielsweise Taktzeit und Schichtmodell, die den Randbedingungen des verfügbaren Flexibilitätsangebots genügen müssen. Aus definierten Wirkzusammenhängen ergeben sich schließlich Bewertungs- und Ergebnisgröße wie der Kosten-Kapitalwert der operativen Montage-Betriebskosten.

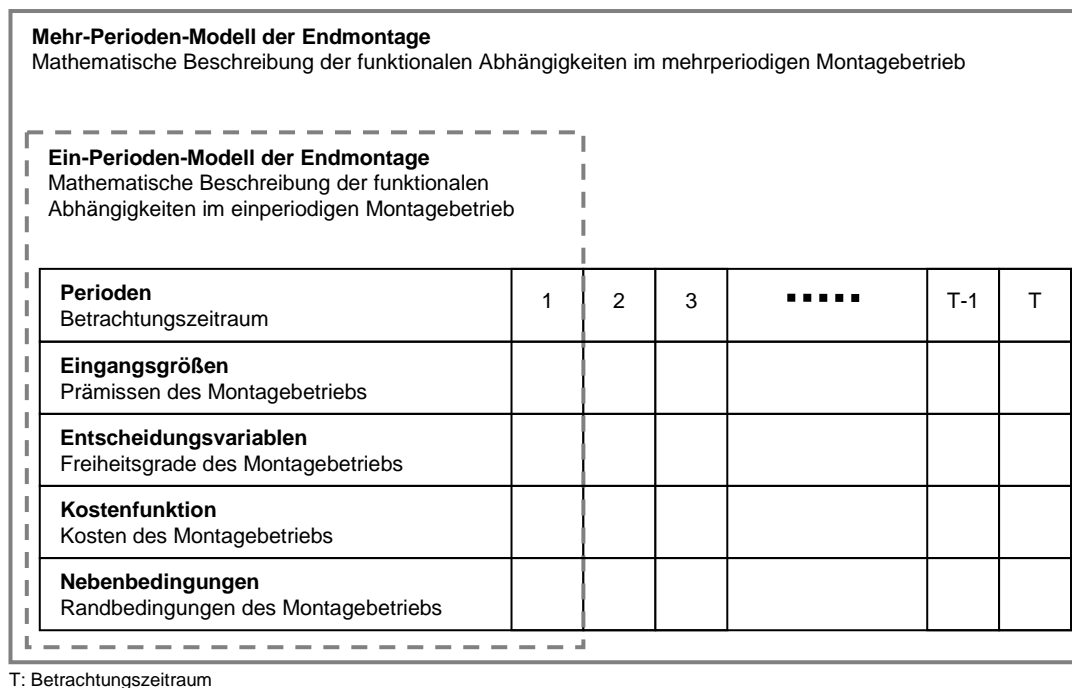


Abbildung 20: Aufbau des Montagemodells für den Ein- und Mehr-Perioden Fall

Das Modell wird in zwei Schritten formuliert (vgl. Abbildung 20). Zuerst wird ein statisches Modell für den Ein-Perioden-Fall definiert. Dieses wird in einem zweiten Schritt zu einem

<sup>14</sup> Sich aus standortspezifischen Betriebsvereinbarungen ergebende Unterschiede lassen sich jeweils über angepasste Funktionen mit geringem Aufwand integrieren. Dies gilt für die untersuchten Standorte in Deutschland, Frankreich, den Niederlanden und den USA.

Mehr-Perioden-Modell erweitert, das als Basis für den in Kapitel 5 vorgestellten Optimierungsansatz dient. Beide Modelle sind unterteilt in eine Beschreibung der Eingangsgrößen, der Entscheidungsvariablen, der Kostenfunktion und der Nebenbedingungen.

#### **4.1 Ein-Perioden-Modell der Montage**

Für die Betrachtung werden Eingangsgrößen und Entscheidungsvariablen des Montagebetriebs mit ihren Auswirkungen auf die Periodenkosten modelliert. Zeitdynamische Effekte werden vernachlässigt. Die Randbedingungen des Montagebetriebs finden sich wieder in mathematischen Nebenbedingungen. Diese prüfen beispielsweise, ob das verfügbare Flexibilitätsangebot ausreicht, um die Entscheidungsvariablen so zu konfigurieren, dass ein dem Flexibilitätsbedarf angepasster Montagebetrieb möglich ist. Zum Aufbau des Modells werden die Menge der Produkte  $P$  mit Index  $p$ , die Menge der Linien  $L$  mit Index  $l$  und die Menge der möglichen Schichtbetriebe  $S$  mit Index  $s$  definiert.

##### **4.1.1 Eingangsgrößen des Ein-Perioden-Modells**

Die Eingangsgrößen stellen die Grundlage zur Ermittlung der Kosten dar. Sie beschreiben das Produktionsprogramm, den Standort und die Investition und werden in diesem Abschnitt erläutert. Die ersten beiden Eingangsgrößen werden durch das Produktionsprogramm festgelegt. Sie sind unabhängig von der Flexibilitätsstrategie. Die restlichen Eingangsgrößen sind abhängig von der zu treffenden Investitionsentscheidung und ermöglichen eine Beschreibung des Produktionssystems.

- Bedarf  $bed_p$  : Marktnachfrage nach Produkt  $p$  [1]
- Linienunabhängige theoretische Montagezeit  $MZT_p$  [Min]
- Linienabhängige Montagezeit  $MZ_{p,l}$  [Min]
- Minimal mögliche Taktzeit  $\min TZ_l$  [Min]
- Verfügbarkeit der Linien  $verf_l$  [%]
- Zusätzlich für Umbauten etc. benötigte Zeit  $zuszeit_{s,l}$  [Min]
- Bandvorlauf der Linie  $bvl_l$  [%]
- Taktausgleichsverlust der Linie  $tag_l$  [%]
- Anzahl montage- und taktzeitunabhängiger Arbeitskräfte  $AKunab_l$  [1]
- Anteil montage- und taktzeitabhängiger Arbeitskräfte  $antMZ_l$  [1]



- Anteil indirekter Tätigkeiten  $ait_l$  [%]

Die beschriebenen Größen determinieren entscheidend die Effizienz, die Volumen- und die Produktflexibilität der Linie. Ferner sind standortspezifische Eingangsgrößen zu nennen:

- Anzahl der verfügbaren Kalender-Arbeitstagen  $arbtage_{s,l}$  [1]
- Periodenkosten für unbefristete direkte Arbeitskräfte  $kAK_{ud}$  [€]
- Periodenkosten für befristete direkte Arbeitskräfte  $kAK_{bd}$  [€]
- Periodenkosten für unbefristete indirekte Arbeitskräfte  $kAK_{ui}$  [€]
- Stundenlohn als Basis der Schichtzuschläge  $sl$  [€]
- Schichtzuschläge  $zs_s$  [%]
- Überstundenzuschläge  $z\ddot{u}_s$  [%]
- Anfahrtspauschale  $ap$  [€]
- Bezahlte Pausenzeit  $psb_{s,l}$  [Min]
- Krankenfehlstand bei tariflicher Arbeitszeit  $fsk$  [%]
- Anzahl individueller Urlaubstage  $mbr$  [1]
- Individueller zu ersetzender Urlaubsfehlstand  $fsu$  [%]
- Maximal möglicher Anteil befristeter Arbeitskräfte  $MaxBefr$  [1]

#### 4.1.2 Entscheidungsvariablen des Ein-Perioden-Modells

Im Folgenden werden die Entscheidungsvariablen des Montagebetriebs aufgeführt. Aus ihnen ergibt sich das Aktionsvolumen der zukünftigen Flexibilitätsnutzung, d. h. die Anpassungsmöglichkeiten des Montagebetriebs bei gegebener Flexibilität.

- Taktzeit  $EV_{TZ_l}$  [Min]
- Plattformbelegung  $EV_{PFB_l}$  [%]<sup>15</sup>
- Schichtbetrieb  $EV_{SB_l}$  [1]: Maximale Schichtanzahl pro Arbeitstag
- Schichtanzahl  $EV_{ANZS_{s,l}}$  [1]: Anzahl der genutzten Schichten

---

<sup>15</sup> Insbesondere im Anlauf erlaubt eine reduzierte Belegung der Fördertechnik-Plattformen eine Reduktion der benötigten Arbeitskräfte.

- Betriebsnutzungszeit pro Schicht  $EV\_BNZV_{s,l}$  [Min]
- Durchgefahrene Pausenzeit pro Schicht  $EV\_PADGF_{s,l}$  [Min]
- Anzahl der Urlaubsbetriebsruhen  $EV\_BETRUR_{s,l}$  [1]
- Anzahl unbefristet eingestellter Arbeitskräfte  $EV\_AKU_l$  [1]
- Anzahl befristeter Arbeitskräfte  $EV\_AKB_l$  [1]
- Programmverteilung bei Routenflexibilität  $EV\_PV_{l,p}$  [%]

Ihre Konfiguration der Variablen erfolgt nicht frei, sondern muss an die Randbedingungen der Nachfrage, der Flexibilitätsstrategie und des Standorts angepasst werden.

### 4.1.3 Kostenfunktion des Ein-Perioden-Modells

Die Entscheidungsvariablen sind für den theoretischen Ein-Perioden-Fall so zu konfigurieren, dass die Kosten des Montagebetriebs bei gegebenen Randbedingungen minimiert werden. Um das abzubilden und die Bewertung des Flexibilitätsnutzens im Montagebetrieb zu ermöglichen, ist eine Kostenfunktion erforderlich. In Anlehnung an die entscheidungsorientierte Kostenrechnung werden in ihr nur entscheidungsrelevante Ein- und Auszahlungen berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.4.2). Das Kostenmodell beinhaltet im Ein-Perioden-Fall aus diesem Grund die Personalkosten des Montagebetriebs. Sie sind neben den Personalkostensätzen abhängig von der Personalflexibilität des Standorts, die den Arbeitskräftebedarf festlegt.

#### Ermittlung des Arbeitskräfte-Bedarfs

Ausgangsbasis des Arbeitskräftebedarfs ist die linienspezifische Montagezeit  $MZ_l$ . Diese ist im Ein-Perioden-Modell von der Linienausstattung, den Weglängen und dem Automatisierungsgrad der Linien abhängig und wird im Mehr-Perioden-Modell um Lernkurveneffekte erweitert. Die Montagezeit wird durch die Taktzeit  $EV\_TZ_l$  dividiert, um die Anzahl der montagezeitabhängigen Arbeitskräfte zu erhalten. Die Plattformbelegung  $EV\_PFB_l$  vermindert den Bedarf an Arbeitskräften, da an Leerplattformen keine Arbeiten anfallen. Außerdem wird die Montagezeit mit dem Faktor  $antMZ_l$  multipliziert, der den montagezeitunabhängigen Anteil der Arbeitskräfte repräsentiert, die erst in einem zweiten Schritt berücksichtigt werden. Es folgt für den Grundbedarf der von der Takt- und Montagezeit abhängigen Arbeitskräfte  $AKABH$ :

$$AKABH_{s,l} = \frac{MZ_l \cdot antMZ_l \cdot EV\_PFB_l}{EV\_TZ_l} \quad F 1$$

Der theoretische Grundbedarf für die Montage des Produkts wird über die Variable  $AKPROD$  definiert. Er ergibt sich aus der Summe der von Takt- und Montagezeit abhängigen ( $AKABH_{s,l}$ ) und unabhängigen Arbeitskräfte ( $AKunab_{s,l}$ ):

$$AKPROD_{s,l} = AKunab_{s,l} + AKABH_{s,l} \quad F 2$$

Die Auswirkungen des Bandvorlaufs zum Ausgleich von Verfügbarkeitsschwankungen wird in Formel 3 beschrieben. Der Bandvorlauf induziert prozentual einen erhöhten Arbeitskräfte-Bedarf  $AKBVL$ , der sich in der Variable  $bvl$  ausdrückt. Reale Bezugsgröße des Mehrbedarfs ist der Arbeitskräfte Grundbedarf „Arbeitskräfte Linie“ (s.u.), in die zusätzlich Arbeitskräfte für den Taktausgleichsverlust eingehen. Die Variable  $bvl$  muss aus diesem Grund an die Bezugsgröße  $AKPROD$  angepasst werden. Daraus folgt:

$$AKBVL_{s,l} = AKPROD_{s,l} \cdot \frac{bvl_l}{1 - bvl_l - tag_l} \quad F 3$$

Der Berechnung des Grundbedarfs der von Takt- und Montagezeit abhängigen Arbeitskräfte  $AKABH$  liegt die Annahme zugrunde, dass die Mitarbeiter an ihren Stationen maximal ausgelastet sind. Im Regelfall ist jedoch bei Produkt- und Variantenmix auch bei optimaler Sequenzbildung und Austaktung keine hundertprozentige Auslastung möglich. Zur Integration dieser Effizienzverluste in die Arbeitskräftebedarfsrechnung wird der Taktausgleichsverlust  $tag$  genutzt<sup>16</sup>. Die Berechnung erfolgt analog zum für den Bandvorlauf erforderlichen Arbeitskräfte-Bedarf (Formel 3). Ergebnisgröße ist die Anzahl der für den Taktausgleichsverlust zusätzlich benötigten Arbeitskräfte  $AKTAG$ :

$$AKTAG_{s,l} = AKPROD_{s,l} \cdot \frac{tag_l}{1 - tag_l - bvl_l} \quad F 4$$

<sup>16</sup> Die Trennung von der Montagezeit ist erforderlich, weil der Taktausgleichsverlust nach Umtaktungen besonderen betrieblichen Lerneffekten unterliegt (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Die bereits angesprochene Variable Arbeitskräfte Linie *AKLIN* ergibt sich aus der Summe der errechneten Bedarfe. Sie gibt an, wie viele Arbeitskräfte für direkte Tätigkeiten in der Linie benötigt sind, um bei gegebener Taktzeit und Effizienz zu produzieren:

$$AKLIN_{s,l} = AKPROD_{s,l} + AKBVL_{s,l} + AKTAG_{s,l} \quad F 5$$

Die Berechnung der direkten Arbeitskräfte in der Linie ist damit abgeschlossen. In einem zweiten Schritt wird der Bedarf an indirekten Arbeitskräften ermittelt. Hierzu gehören qualitätssichernde und unterstützende Tätigkeiten. Um von der direkten Arbeitskräfte-Anzahl abhängige indirekte Arbeitskräfte einzubinden, wird die Bezugsgröße *AKLIN* verwendet. Der Prozentsatz der über direkte Montagezeit hinausgehenden Tätigkeiten wird über die Variable *ait* beschreiben. Es folgt der indirekte Arbeitskräftebedarf *AKIND*:

$$AKIND_{s,l} = AKLIN_{s,l} \cdot \frac{ait_l}{1 - ait_l} \quad F 6$$

Ein zusätzlicher indirekter Arbeitskräfte-Bedarf ergibt sich, wenn die Betriebsnutzungszeit durch eine Produktion während der Pausen bei ansonsten gleicher Schichtlänge verlängert wird. Dies kann beispielsweise erforderlich sein, um Kapazitätsengpässe abzudecken. Die zusätzlichen Arbeitskräfte, die die regulären *AKLIN* während der Pausen ablösen, werden als Pausenablöser bezeichnet. Je länger die durchgefahrene Pausenzeit, desto höher ist der Bedarf an Pausenablösern. Im Modell wird dieser Zusammenhang linear beschrieben. Der Parameter  $a_0$  beschreibt in Prozent der Arbeitskräfte Linie *AKLIN* die Erhöhung der erforderlichen Pausenablöser für jede zusätzliche Minute Produktionszeit während der Pausen:

$$AKABL_{s,l} = AKLIN_{s,l} \cdot a_0 \cdot EV\_PADGF_{s,l} \quad F 7$$

Die Nettosumme der benötigten direkten und indirekten Arbeitskräfte *AKNET* errechnet sich schließlich durch Addition der einzelnen Arbeitskräftebedarfe:

$$AKNET_{s,l} = AKLIN_{s,l} + AKIND_{s,l} + AKABL_{s,l} \quad F 8$$

Als letzter Arbeitskräftebedarfsfaktor wird der Fehlstand der Mitarbeiter integriert. Da ein Prozentsatz *FSG* der eingestellten Arbeitskräfte im Urlaubs- oder Krankenfall ersetzt werden

muss, wird die Variable  $AKFEHL$  eingeführt. Sie definiert die zusätzlich erforderlichen Arbeitskräfte:

$$AKFEHL_{s,l} = AKNET_{s,l} \cdot \frac{FSG_{s,l}}{1 - FSG_{s,l}} \quad \text{F 9}$$

Die Summe aller benötigten Arbeitskräfte für den Betrieb aller Linien und Schichtgruppen ergibt sich aus der Nettosumme der benötigten Arbeitskräfte und den zum Fehlstands-ausgleich eingestellten  $AKFEHL$  wie folgt zur Bruttosumme benötigter Arbeitskräfte  $AKB$  :

$$AKB_l = \sum_{s=1}^{SB_l} (AKNET_{s,l} + AKFEHL_{s,l}) \quad \text{F 10}$$

Die Antizipation des Fehlstands  $FSG$  ist keineswegs trivial. Weil sich im Mehr-Perioden-Modell zusätzliche Wirkzusammenhänge ergeben, erfolgt deren ausführliche Darstellung in Kapitel 4.2. Da sich allerdings bereits im Ein-Perioden-Modell aus Sicht der Arbeitszeitflexibilität ein signifikanter Einfluss der Schichtlänge auf den Krankenfehlstand  $fsk$  zeigt, wird dieser hier beschrieben. Wird der Zusammenhang zwischen Schichtlänge und Krankenfehlstand als linear angenommen, und gilt der als Prämisse eingegebne Krankenfehlstand für die tarifliche Arbeitszeit, so führt die Variation der Schichtlänge zu einem um  $a_1$  Prozent korrigierten Fehlstand  $FSKR$  .

$$FSKR_{s,l} = fsk + a_1 \cdot EV - BNZV_{s,l} \quad \text{F 11}$$

Für den Gesamtfehlstand  $FSG$  , der sich aus Kranken- und Urlaubsfehlstand zusammensetzt, gilt mithin:

$$FSG_{s,l} = fsu_{s,l} + FSKR_{s,l} \quad \text{F 12}$$

## Arbeitszeit und Überstunden

Während im Mehr-Perioden-Modell auf die Verteilung der Arbeitszeit über der Zeit eingegangen wird, ist im Ein-Perioden-Modell ausschließlich eine statische Betrachtung der Arbeitszeit und der Überstunden möglich. Es wird davon ausgegangen, dass Überstunden am Ende der Periode ausgezahlt werden. Die Berechnung der Arbeits- und Überstundenzeit erfolgt auf Basis einer Differenzbetrachtung zwischen der tariflichen Arbeitszeit und der real

gearbeiteten Arbeitszeit. Es wird angenommen, dass im Falle einer Überkapazität an Arbeitskräften die jeweils nicht benötigten Arbeitskräfte individuelle Freischichten nehmen. So reduziert sich die durchschnittliche Arbeitszeit pro Mitarbeiter.

Die Arbeitszeit pro Arbeitskraft und pro Schicht  $AZV$  berechnet sich aus der Summe der verfügbaren Betriebsnutzungszeit zuzüglich der bezahlten Pausen pro Schicht, reduziert um die durchgefahrene Pausenzeit:

$$AZV_{s,l} = EV_{-}BNZV_{s,l} - EV_{-}PADGF_{s,l} + psb_{s,l} \quad \text{F 13}$$

Diese Arbeitszeit wird nicht von allen, sondern nur von den in den Linien eingesetzten Arbeitskräften  $AKNET$  geleistet. Demzufolge gilt für die reale Arbeitszeit pro Schichtgruppe bei Durchschnittsbetrachtung über alle Schichten folgender Zusammenhang:

$$AZRE_l = \frac{\sum_{s=1}^S (AZV_{s,l} \cdot ANZS_{s,l}) \cdot AKNET_{s,l}}{SB_l} \quad \text{F 14}$$

Dieser real geleisteten durchschnittlichen Arbeitszeit steht die tariflich verfügbare Arbeitszeit gegenüber. Sie wird errechnet über die Anzahl eingestellter Arbeitskräfte  $AKV$  multipliziert mit der tariflichen Arbeitszeit  $azt_l$ . Dabei muss der Fehlstand  $FSG^{AZK}$  der Arbeitskräfte berücksichtigt werden, da Arbeitskräfte in Urlaub- oder Krankenstand die durchschnittliche Arbeitszeit nicht durch individuelle Freischichten reduzieren: Sie müssen von den verfügbaren Arbeitskräften abgezogen werden. Für die tariflich verfügbare Arbeitszeit  $AZTARVER$  gilt:

$$AZTARVER_{t,l} = azt_l \cdot AKV_{t,l} \cdot (1 - FSG_l^{AZK}) \quad \text{F 15}$$

Es folgt die durchschnittliche Entwicklung der Über- und Unterstunden  $AZKE$  pro Periode. Sie kann in ein Arbeitszeitkonto übertragen bzw. durch Überstundzuschläge explizit vergütet werden.

$$AZKE_{t,l} = \frac{AZRE_{t,l} - AZTARVER_{t,l}}{AKV_{t,l}} \quad \text{F 16}$$

## Personalkosten

Mit den dargestellten funktionalen Zusammenhängen lässt sich der wichtigste Kostenfaktor des Montagebetriebs, die Personalkosten, ermitteln. Sie setzen sich in erster Linie zusammen aus den tariflich vereinbarten Löhnen und Gehältern:

$$TARIFL_t = (EV\_AKU \cdot kAK\_ud + EV\_AKB \cdot kAK\_bd + AKIND \cdot kAK\_ui) \quad F 17$$

Zudem beeinflussen Schichtzuschläge die Wirtschaftlichkeit des Montagesystems. Sie ergeben sich aus der bezahlten Arbeitszeit  $AZV$  pro Schicht, dem Basis-Stundenlohn  $sl$ , den Zuschlagssätzen  $zs$  und der Anfahrtspauschale  $ap$ . Die Größen beziehen sich auf die Brutto- bzw. Nettosumme der Arbeitskräfte  $AKGB$  bzw.  $AKNET$ :

$$ZUS_t = \sum_{s=1}^S ANZS_{s,t} \cdot (AZV_{s,t} \cdot sl \cdot AKGB_t \cdot zs_s + EV\_ANZS_{s,t} \cdot AKNET_t \cdot ap) \quad F 18$$

Die Berechnung der Überstundenzuschläge  $ZUS\ddot{U}$  wird analog auf Basis der Überstunden  $Max[AZK;0]$  durchgeführt, die dann eventuell nicht mehr in das Arbeitszeitkonto eingehen. Aus dem tariflichen Lohn und den Schicht- und Überstundenzuschlägen ergeben sich die gesamten Betriebskosten:

$$BK_t = TARIFL_t + ZUS_t + ZUS\ddot{U}_t \quad F 19$$

### 4.1.4 Nebenbedingungen des Ein-Perioden-Modells

Die Eingangsgrößen und Entscheidungsvariablen stehen untereinander in funktionaler Abhängigkeit und verursachen je nach Konfiguration unterschiedliche Kosten. Bei der Konfiguration der Entscheidungsvariablen sind verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen, die in diesem Abschnitt als mathematische Nebenbedingungen formuliert sind. Sie bauen auf dem Grundsatz auf, dass dem Ressourcenbedarf ein technisches und organisatorisches Ressourcenangebot gegenüberstehen muss. Dieses Angebot kann durch die Investition und durch die Entscheidungen im Montagebetrieb geschaffen werden. Eine ganzheitliche Betrachtung der Flexibilitätsnutzung im Sinne von Entscheidungen über der Zeit wird im Mehr-Perioden-Modell durchgeführt. Im Ein-Perioden-Modell lassen sich nur Teilaspekte dieses Angebots abbilden. Daher werden vorerst nur folgende Nebenbedingungen bearbeitet:

- Kapazität und Auslastung
- Produktallokation
- Arbeitskräftebedarf und -angebot

### **Kapazität und Auslastung**

Grundlage der Kapazität ist die Anzahl der zur Verfügung stehenden Betriebstage pro Schichtbetrieb  $BETRAG_{s,l}$ . Sie errechnet sich aus den zur Verfügung stehenden Kalender-Arbeitstagen minus den Betriebsruhen:

$$BETRAG_{s,l} = arbttag_{s,l} - EV\_BETRUR_{s,l} \quad \text{F 20}$$

Die in der Periode verfügbare Betriebsnutzungszeit  $VerfBNZ$  ergibt sich aus den Entscheidungsvariablen Schichtbetrieb, der Betriebsnutzungszeit pro Schicht sowie der Anzahl verfügbarer Betriebsarbeitstage. Abgezogen werden zusätzliche zeitliche Aufwendungen, beispielsweise für Produktionstests oder Umbauten für Neufahrzeugen, die ebenfalls im Rahmen der Flexibilitätsnutzung zu berücksichtigen sind.

$$VerfBNZ_l = \sum_{s=1}^S EV\_BNZV_{s,l} \cdot BETRAG_{s,l} - \sum_{s=1}^S zuszeit_{s,l} \quad \text{F 21}$$

Neben der verfügbaren Betriebsnutzungszeit bedingt die effektive Taktzeit der Linien die Kapazität. Sie wird durch die Verfügbarkeit und die Plattformbelegung beeinflusst. Wird die Kapazität als Ausbringungsmenge bei fester Konfiguration der Entscheidungsvariablen definiert, so ergibt sich folgender Wert:

$$KAPA_l = VerfBNZ_l \cdot \frac{verf_l \cdot EV\_PFB_l}{EV\_TZ_l} \quad \text{F 22}$$

Zur Bestimmung der Linienauslastung wird wiederum eine Differenzbetrachtung durchgeführt, wobei die Diskrepanz zwischen Produktionsvolumen und Produktionskapazität herangezogen wird. Hierfür wird das Produktionsvolumen in Abhängigkeit vom Bedarf pro Produkt sowie der Programmverteilung der Produkte auf die Linien errechnet:

$$PRODVOL_l = \sum_{p=1}^P bed_p \cdot EV\_PV_{l,p} \quad \text{F 23}$$



Die operative Auslastung pro Linie ergibt sich schließlich aus dem Quotienten des Produktionsvolumens und der Produktionskapazität. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Kapazität muss folgende Nebenbedingung erfüllt sein:

$$AUSL_l = \frac{PRODVOL_l}{KAPA_l} \leq 1 \quad \text{F 24}$$

Gleichzeitig sind einige technisch-organisatorische Nebenbedingungen zu berücksichtigen. Zum Beispiel können die Schichtmodelle nur im Rahmen der verfügbaren Arbeitszeitmodelle gewählt werden, und die Taktzeit darf die minimale Taktzeit der technischen Anlagen nicht unterschreiten. Die erforderlichen Minimum- und Maximumsrestriktionen für Schichtlängen, Überstunden und Taktzeiten sind trivial und werden beispielhaft für die Taktzeit ausgeführt:

$$EV\_TZ_l \geq \min TZ_l \quad \text{F 25}$$

### Produktallokation

Bei routenflexiblen Systemen mit Programmverteilung eines Produkts auf mehrere Linien muss beachtet werden, dass in der Summe 100 Prozent des Bedarfs pro Produkt produziert werden:

$$\sum_{l=1}^L EV\_PV_{l,p} = 1 \quad \text{F 26}$$

Für produktflexible Systeme muss sichergestellt sein, dass nur die den Linien zugeordneten Produkte gefertigt werden. Kann ein Produkt  $p$  nicht auf der Linie  $l$  gefertigt werden, so gilt folgende Gleichung:

$$EV\_PV_{l,p} = 0 \quad \text{F 27}$$

### Arbeitskräftebedarf und -angebot

Die befristeten und unbefristeten Arbeitskräfte müssen in ausreichender Anzahl für die Produktion eingestellt sein. Folglich müssen die eingestellten Mitarbeiter abzüglich der

Mitarbeiter in Abordnung mindestens gleich der erforderlichen Bruttosumme der Arbeitskräfte sein:

$$EV\_AKU_l + EV\_AKB_l - EV\_AB_l \geq AKGBIL_l \quad \text{F 28}$$

Die Arbeitskräfte-Flexibilität wird im Ein-Perioden-Modell durch einen maximalen Anteil einzustellender befristeter Arbeitskräfte repräsentiert. Der Anteil *MaxBefr* ist vom Standort und von der getroffenen Betriebsvereinbarung abhängig. Es gilt:

$$\frac{\sum_{l=1}^L EV\_AKB_l}{\sum_{l=1}^L (EV\_AKB_l + EV\_AKU_l)} \leq MaxBefr \quad \text{F 29}$$

Weitere allgemeine Randbedingungen werden in diesem Abschnitt nicht mathematisch beschrieben. Sie stellen im Wesentlichen sicher, dass bestimmte Maximal- und Minimalwerte nicht überschritten werden. So können beispielsweise pro Schichtgruppe nicht mehr Schichten verplant werden, als Betriebsarbeitstage zur Verfügung stehen. Die Formulierung des Ein-Perioden-Modells ist damit abgeschlossen. Zur Analyse der Flexibilitätsnutzung dient es jedoch nur eingeschränkt. Insbesondere die zeitdynamische Flexibilitätsnutzung kann in ihren Auswirkungen auf die Kosten nicht analysiert werden.

## 4.2 Mehr-Perioden-Modell der Montage

Um Wirkzusammenhänge über der Zeit beschreiben zu können, eine Voraussetzung für eine realitätsnahe Antizipation der Flexibilitätsnutzung, werden die statischen Ein-Perioden-Modelle zu einem Mehr-Perioden-Modell verbunden. Mit dieser Erweiterung wird eine Abbildung der folgenden Wirkzusammenhänge und damit eine ganzheitliche Darstellung der Flexibilitätsnutzung möglich:

- *Dynamische Eingangsgrößen*: Der Flexibilitätsbedarf wird durch die Dynamik und Unsicherheit des Produktionsprogramms und andere dynamische Einflussgrößen, wie z. B. eine sich verändernde Montagezeit, charakterisiert.
- *Dynamische Entscheidungsvariablen*: Entscheidungen werden über der Zeit getroffen und haben Einfluss auf nachfolgende Perioden. Gleichzeitig werden zusätzliche Entscheidungen, wie eine Glättung des Produktionsprogramms, möglich.
- *Dynamische Nebenbedingungen*: Die Variationsmöglichkeiten der Entscheidungsvariablen sind über der Zeit eingeschränkt. Exemplarisch kann die Mitarbeiter-

fluktuation als wichtige Möglichkeit der Personalreduktion ausschließlich über der Zeit realistisch dargestellt werden.

- *Dynamische Kostenfunktion*: Die reale Kostenentwicklung über der Zeit setzt sich zusammen aus den Perioden- und den Anpassungskosten, die bei Variation der Entscheidungsvariablen zwischen zwei Perioden anfallen.

Die Ausschöpfung des Potenzials des Mehr-Perioden-Modells erfordert die Einführung weiterer Eingangsgrößen und Entscheidungsvariablen. Sie werden im nächsten Abschnitt genannt.

#### 4.2.1 Eingangsgrößen des Mehr-Perioden-Modells

Zur Darstellung der erweiterten Flexibilitätsnutzung und der sie beschränkenden Nebenbedingungen sowie zur Analyse der Kostenentwicklung sind weitere Größen erforderlich. Folgende Eingangsgrößen definieren die standortspezifischen Randbedingungen der Produktion:

- Anzahl festgelegter Betriebsruhetage pro Jahr  $bet_{s,t}$  [1]
- Nachfrage nach Arbeitskräften seitens anderer Standorte  $MaxAbord$  [1]
- Einnahmen durch Arbeitskräfte in Abordnung an andere Standorte  $gewAbord$  [€]
- Kostenneutrale Arbeitskräfte-Fluktuation pro Jahr in Prozent der unbefristeten Arbeitskräfte  $flukt$  [%]
- Schranken des Arbeitszeitkontos  $korrAZK$  [h]
- Maximale Produktionsprogrammverschiebung pro Periode  $maxPVS$  [%]
- Anzahl der in  $t=0$  eingestellten unbefristeten Arbeitskräfte  $startAKU$  [1]
- Urlaubsanspruch der Arbeitskräfte in Tagen  $mbr_p$  [1]

Die Nutzung des Flexibilitätsangebots wird durch eine Variation der Entscheidungsvariablen abgebildet. Die dabei entstehenden Anpassungskosten spiegeln die Flexibilität des Systems wider und sind zur monetären Bewertung der Flexibilitätsstrategie in die Kostenfunktion des Modells zu integrieren. Zu diesem Zweck werden die folgenden Kostensätze definiert:

- Kosten bei Einstellung einer unbefristeten Arbeitskraft  $wkeinSt$  [€]
- Kosten bei Ausstellung einer unbefristeter Arbeitskraft (Abfindung)  $wkausSt$  [€]
- Kosten bei Einstellung einer befristeten Arbeitskraft  $wkeinFlex$  [€]

- Fixe Kosten bei Wechsel der Taktzeit  $wktFix$  [€]
- Arbeitskräftevariable Kosten bei Wechsel der Taktzeit  $wktVar$  [€]
- Fixe Kosten bei Wechsel des Schichtbetriebs  $wksbFix$  [€]
- Arbeitskräftevariable Kosten bei Wechsel des Schichtbetriebs  $wksbVar$  [€]
- Fixe Kosten bei Wechsel der Betriebsnutzungszeit  $wkbFix$  [€]
- Arbeitskräftevariable Kosten bei Wechsel der Betriebsnutzungszeit  $wkbVar$  [€]
- Kosten bei Verschiebung von Arbeitskräften zwischen Montagelinien  $wkversVar$  [€]

#### 4.2.2 Entscheidungsvariablen des Mehr-Perioden-Modells

Die Entscheidungsvariablen des Ein-Perioden-Modells sollen für das Mehr-Perioden-Modell um ihre zeitliche Dynamik erweitert werden. Hierfür wird der Index  $t$  des Betrachtungszeitraums  $T$  eingeführt, der die Anzahl der betrachteten Perioden repräsentiert. Zusätzlich müssen neue Entscheidungsvariablen definiert werden. Sie erlauben eine Darstellung des über der Zeit existierenden Flexibilitätsangebots:

- Produktionsprogrammverschiebung aus Periode  $t+1$  in Periode  $t$   $EV\_PVS_{t,p}$  [1]
- Arbeitskräfte-Anzahl in Abordnung an andere Standorten  $EV\_AKAB_t$  [1]
- Von Linie  $l$  nach Linie  $m$  verschoben Arbeitskräfte  $EV\_AKVERS_{l,m}$  [1]

#### 4.2.3 Kostenfunktion des Mehr-Perioden-Modells

Im Mehr-Perioden-Modell lassen sich die Ein- und Auszahlungen durch zwei Kostenarten ermitteln: Die Periodenkosten  $PK$  sind gleich den Betriebskosten des Ein-Perioden-Modells, während die Anpassungskosten  $WK$  bei Veränderung der Entscheidungsvariablen „zwischen“ zwei Perioden auftreten. Wie bereits in Abschnitt 3.3 erläutert, bietet die Kapitalwertmethode ein adäquates Bewertungsinstrument für die zeitdynamische Flexibilitätsnutzung. Die folgende Kostenfunktion baut auf ihr auf. Sie stellt den Barwert der Montagekosten  $BWKMO$  im Betrachtungszeitraum  $T$  dar. Der kalkulatorische Zinssatz  $kalkz$  in Prozent pro Jahr orientiert sich jeweils an den Vorgaben des Unternehmens oder der Branche. Es gilt:

$$BWKMO_{t=0} = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{l=1}^L (PK_{t,l} + WK_{t,l} - gewAbord \cdot EV\_AKAB_{t,l}) \cdot \frac{1}{(1+kalkz)^t} \right] \quad \text{F 30}$$

#### 4.2.4 Nebenbedingungen des Mehr-Perioden-Modells

Wie bereits im Ein-Perioden-Modell sind bei der Konfiguration der Entscheidungsvariablen Nebenbedingungen einzuhalten. Sie modellieren die Grenzen des Montage-Flexibilitätsangebots. Ihre Aufzählung gliedert sich in vier Bereiche:

- Programmverschiebung
- Arbeitszeit
- Arbeitskräftebedarf
- Abordnungen

##### Programmverschiebung

Das Produktionsprogramm wird vom Vertrieb vorgegeben und muss in der Regel von der Montage erfüllt werden. Es besteht allerdings die Möglichkeit, einen Teil der Aufträge zeitlich zu verschieben, um teure Anpassungen der Endmontage zu vermeiden. Diese Verschiebungen reduzieren die erforderliche Volumenflexibilität der Linien und müssen in das Modell integriert werden. Ausgedrückt wird die Programmverschiebung durch die Entscheidungsvariable Programmverschiebung  $EV\_PVS_{t,p}$ , die in die Berechnung des neuen Periodenbedarfs  $ABED_{t,p}$  eingeht<sup>17</sup>:

$$ABED_{t,p} = bed_{t,p} + EV\_PVS_{t,p} - EV\_PVS_{t-1,p} \quad \text{F 31}$$

Die Programmverschiebung kann sowohl über Anpassungskosten als auch über Randbedingungen beschränkt werden. Letztere geben vor, welche Fahrzeugmenge maximal in vor- oder nachgelagerte Perioden verschoben werden kann.

$$|EV\_PVS_{t,p}| \leq maxPVS \quad \text{F 32}$$

##### Arbeitszeit

Um bei einer Variation der Betriebsnutzungszeit die standortspezifischen Betriebsvereinbarungen einzuhalten, muss häufig die Betriebsnutzungszeit von der Arbeitszeit entkoppelt werden. So wird verhindert, dass die Differenz aus realer und tariflicher Arbeitszeit zu groß wird (vgl. Abschnitt 2.3.1). Nebenbedingungen zur Einschränkung bei der Wahl der Schicht-

<sup>17</sup> Im Modell werden keine Kapitalbindungskosten für in die Vorperiode verschobene Produkte eingerechnet. Sie lassen sich jedoch einfach in die Kostenfunktionen in Abhängigkeit von Verschiebungsmenge und -zeitraum integrieren.

modelle und -betriebe sowie die maximale Anzahl von Überstunden pro Mitarbeiter wurden bereits im Ein-Perioden-Fall erläutert. Ergänzend ergibt sich der Stand des Arbeitszeitkontos über der Zeit aus der kumulierten Differenz der realen und der tariflichen Arbeitszeit:

$$AZK_{t,l} = AZK_{t-1,l} + AZKE_{t,l} \quad \text{F 33}$$

Zur Darstellung der sich aus dem Arbeitszeitkonto ergebenden Volumenflexibilität werden mathematische Nebenbedingungen formuliert. Die minimale und maximale Stundenzahl des Arbeitszeitkontos ist durch den Arbeitszeitkonto-Korridor festgelegt, der durch die Schranke  $korrAZK$  nach oben und nach unten definiert wird. Es gilt:

$$|AZK_{t,l}| \leq korrAZK \quad \text{F 34}$$

Durch die Konfiguration der Entscheidungsvariable  $EV\_AKU_t$  und  $EV\_AKB_t$  besteht die Möglichkeit, zusätzliche Arbeitskräfte einzustellen, um die individuelle Arbeitszeit zu reduzieren.

### Arbeitskräftebedarf

Bei der Berechnung der Arbeitskräftebedarfe und der Arbeitszeitkonten spielt der Fehlstand der Mitarbeiter eine gewichtige Rolle. Er wird im Ein-Perioden-Modell als gegeben angenommen, ist jedoch im Mehr-Perioden-Fall abhängig von den eingeplanten Betriebsruhen. Dieses für die Volumenflexibilität relevante Flexibilitätsinstrument beeinflusst den über das Jahr anfallenden individuellen Urlaubsfehlstand, da die Mitarbeiter während der Betriebsruhen Urlaub nehmen. Dadurch wird der individuelle Urlaubsfehlstand der einzelnen Perioden über das Jahr reduziert; im Modell muss er um die Anzahl der Betriebsruhen pro Jahr  $jbr$  korrigiert werden. Geht man davon aus, dass die Reduktion linear pro Periode erfolgt, so gilt für den Urlaubsstand nach Berücksichtigung der Betriebsruhen  $FSUR$ <sup>18</sup>:

$$FSUR_{s,l,t} = fsu_{s,l,t} \cdot \frac{mbr_{l,t} - jbr}{mbr_{l,t}} \quad \text{F 35}$$

<sup>18</sup> Unter der Annahme, dass die Periodenlänge einem Monat entspricht und der Urlaubsanspruch pro Jahr angegeben wird.

Ferner löst der individuelle Urlaubsfehlstand und der Krankenfehlstand nur an Betriebstagen einen Arbeitskräfte-Mehrbedarf aus. Hierauf muss der Gesamtfehlstand der Periode  $FSG$  angepasst werden:

$$FSG_{s,l,t} = (FSUR_{s,l,t} + FSKR_{s,l,t}) \cdot \frac{BETRAG_{s,l,t}}{arbttag_{s,l,t}} \quad \text{F 36}$$

Im Ein-Perioden-Modell wird bereits unterschieden zwischen dem in den Arbeitskräfte-Bedarf eingehenden Gesamtfehlstand  $FSG$  und dem Gesamtfehlstand für die Berechnung des Arbeitszeitkontos  $FSG^{AZK}$ . Bei der Berechnung des arbeitszeitkontenrelevanten Fehlstands  $FSG^{AZK}$  muss beachtet werden, dass die tarifliche Arbeitszeit an Urlaubstagen nicht zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wird der eingerechnete Urlaubsfehlstand um den Anteil der Urlaubstage in der Periode erhöht<sup>19</sup>:

$$FSURRE_{t,s,l} = FSUR_{t,s,l} + \frac{EV\_BETR_{t,s,l}}{ARBTAG_{t,s,l}} \quad \text{F 37}$$

Damit gilt für den arbeitszeitkontenrelevanten Kranken- und Urlaubsfehlstand:

$$FSG_{t,l}^{AZK} = \frac{\sum_{s=1}^S (FSURRE_{t,s,l} + FSKR_{t,s,l})}{SB_{t,l}} \quad \text{F 38}$$

## Abordnungen

Im Rahmen des Ein-Perioden-Modells wurde bereits eine Randbedingung für einen maximalen Anteil befristeter Arbeitskräfte genannt. Die Entscheidungsvariable *Arbeitskräfte in Abordnung* macht im Mehr-Perioden-Modell eine zusätzliche Nebenbedingung erforderlich: Die Anzahl der abgeordneten Arbeitskräfte  $EV\_AKAB$  darf die maximale Nachfrage nach Arbeitskräften seitens der Zielstandorte pro Periode  $MaxAbord$  nicht überschreiten:

$$\sum_{l=1}^L EV\_AKAB_{t,l} \leq MaxAbord_t \quad \text{F 39}$$

<sup>19</sup> Es wird in dieser Rechnung davon ausgegangen, dass zu einer Urlaubsbetriebsruhe alle Mitarbeiter Urlaub einreichen.

Die Formulierung des Mehr-Perioden-Modells ist damit abgeschlossen. Die definierten Eingangsgrößen, Entscheidungsvariablen, Kostenfunktionen und Nebenbedingungen erlauben die Berechnung der Montagebetriebskosten bei gegebener Flexibilitätsnutzung. Die für die Antizipation der Flexibilitätsnutzung erforderlichen Modelle werden in den nächsten beiden Kapiteln erarbeitet.



## 5 Antizipation von Montagebetrieb und Flexibilitätsnutzung

Das in Kapitel 4 erarbeitete Modell der Montage-Wirkzusammenhänge erlaubt die Ableitung der Betriebskosten bei gegebenen Eingangsgrößen und Entscheidungsvariablen. Für eine realistische Bewertung des Flexibilitätsnutzens steht die strategische Montageplanung allerdings vor der Herausforderung, diese Größen zu antizipieren. Dabei werden zwei Aspekte beachtet:

- *Betriebliche Lerneffekte* beeinflussen Personalbedarfe und Kapazitäten. Es lassen sich Trends und Gesetzmäßigkeit analysieren und in das Modell integrieren. Dies geschieht in Kapitel 5.1, in dem auf das Lernkurvenkonzept zur Antizipation bestimmter Betriebsvariablen zurückgegriffen wird.
- Das *Entscheidungsverhalten* im operativen Montagebetrieb ist bei einer Vielzahl möglicher Umweltentwicklungen und Handlungsalternativen kaum mehr manuell zu antizipieren. Ein dem Realbetrieb angenähertes Entscheidungsverhalten kann durch Optimierungsalgorithmen simuliert werden. Ihre Umsetzung erfolgt in Kapitel 5.2.

Die erarbeiteten Modelle und Methoden wurden zur praktischen Entscheidungsunterstützung in einem Planungswerkzeug implementiert. Der „Lifecycle Adaptation Planner“ (LAP) wird in Kapitel 5.3 vorgestellt.

### 5.1 Antizipation betrieblicher Lerneffekte mittels Lernkurven

Lerneffekte stellen als ein aktiv umzusetzendes Kostensenkungspotenzial sowohl einen Flexibilitätsbedarf als auch ein Flexibilitätsangebot für den Montagebetrieb dar ([Hieber, 1991], [Niemann et al., 2004]). Zum einen erfordert die Gewinnung technischer oder personeller Kapazitäten die Umsetzung in Kosten senkende Maßnahmen, zum anderen eröffnet sie den Planern die Möglichkeit, frei gewordene Ressourcen für neue Aufgaben zu nutzen. So können neue Arbeitsvorgänge oder höhere Stückzahlen in die Linie integriert werden. Die strategische Montageplanung, deren Aufgabe die Konzeption des optimalen Flexibilitätsangebots ist, sollte Lerneffekte demzufolge einbeziehen [Baloff, 1971]. Nach einer Einführung in die Thematik wird in diesem Kapitel die Analyse von Lernkurven für Produktionssysteme beschrieben. Anschließend werden in Fallstudien Lernkurven für die Automobilmontage bestimmt. Darauf aufbauend wird ein Lernkurven-Konzept für die flexible Montage entworfen und in das Montagemodell integriert.

### 5.1.1 Lernkurven-Konzept und sein wissenschaftlicher Nachweis

Die *Lernkurventheorie* analysiert den Stückkostendegressionseffekt, der auf Lerneffekte von Individuen und Gruppen zurückzuführen ist. Hierzu gehört eine Reduktion der Fertigungszeiten, der Produktionsmitteleinsätze oder anderer Kostenfaktoren [Henderson, 1974]. Die *Erfahrungskurventheorie* ergänzt die Lernkurventheorie um die Auswirkungen des technischen Fortschritts und berücksichtigt folglich alle Kostenfaktoren. Die Ermittlung der Erfahrungskurve ist jedoch im Gegensatz zur Lernkurve nicht produktions-, sondern preisorientiert. Aus der realen Preisentwicklung wird die Entwicklung der Kostenfaktoren abgeleitet. Lern- und Erfahrungskurveneffekte sind mittlerweile für die meisten Industriezweige und Anwendungsgebiete empirisch bestätigt [Hieber, 1991]. Im Rahmen dieser Arbeit stehen die von der Flexibilitätsstrategie abhängigen Produktionskosten im Vordergrund. Den adäquaten Ansatz liefert aus diesem Grund die Lernkurven-Theorie. Die klassische Formulierung der Lernkurve beschreibt die vom Steigungsparameter  $s$  der Lernkurve abhängige prozentuale Reduktion der Kosten  $k$  bei jeder Verdopplung der kumulierten Stückzahl  $x$  (Linearhypothese):

$$k_x = k_o x^{-s} \quad \text{F 40}$$

Der Lernkurvenfaktor  $LKF$  beschreibt das Maß der Kostenreduktion. Ein  $LKF$  von 0,8 führt zu einer Kostenreduktion von 20% mit jeder Verdoppelung der kumulierten Stückzahl. Es gilt dann gemäß Formel 41 der Wert 0,3219 für den Steigungsparameter  $s$  der Lernkurve.

$$s = -\frac{\ln LKF}{\ln 2} \quad \text{F 41}$$

Da Lernkurven nicht immer dem klassischen Verlauf unterliegen, wurden weitere Lernkurven-Modelle entwickelt. Sie modifizieren die Linearhypothese und sind in ihren jeweiligen Anwendungsgebieten von verschiedenen Autoren statistisch verifiziert. Beispielsweise wird beschrieben, dass Lerneffekte ab einem bestimmten Punkt abnehmen [Schieferer, 1957] oder nach Eintritt in eine „Steady-State-Phase“ nicht mehr nachvollziehbar sind [Baloff, 1966]. Im Rahmen dieser Arbeit sind vor allem Modelle bedeutsam, die einer Übertragung bereits erlernter Tätigkeiten auf neue Produkte Rechnung tragen. Sie werden dem Charakter flexibler Produktionssysteme gerecht. Hier setzt die *Stanford-Formel* an [Cherrington et al., 1985]. Sie integriert vergangene Lerneffekte der Vorgänger-Produkte, indem sie die kumulierte Stückzahl um einen Startwert erhöht und damit die Lernkurve nach links zum Ursprung

verschiebt. Dies spiegelt sich vor allem in der Anfangsphase der Lernkurve wider. Je größer die kumulierte Stückzahl, desto stärker schmiegt sich die Lernkurve der klassischen Lernkurve an. Die *Lernkurven nach Boeing* basieren auf diesem Konzept. Jedoch wird eine Modellmodifikation vorgenommen, die erlaubt, Designänderungen für unterschiedliche Flugzeugtypen aufzunehmen und in die Kapazitäts- und Zeitplanung zu integrieren. Sie basiert auf mengentheoretischen Überlegungen und ermöglicht eine genauere Schätzung der künftigen Produktionskosten [Garg et al., 1961]. Allerdings geht sie davon aus, dass Lerneffekte trotz dem Aussetzen bestimmter Arbeitsvorgänge bei unterschiedlichen Produkten beibehalten werden. Dies konnte aber durch Bailey widerlegt werden, der einen Prozess des „Entlernens“ im Sinne eines Vergessens beschreibt [Bailey, 1989].

### 5.1.2 Vorgehen bei der Analyse von Lernkurveneffekten in Produktionssysteme

Lernkurven hängen stark von den Parameterkonstellationen im Umfeld ab [Hieber, 1991]. Aus diesem Grund gestaltet sich ihre Messung und Prognose schwierig. Dies gilt vor allem, wenn keine optimalen Randbedingungen für die Analyse von Lerneffekte vorherrschen, z. B. wenn eine Übertragung des auf direkte manuelle Montagetätigkeiten bezogenen und produktorientierten Lernkurvenmodells auf die flexible und automatisierte Produktion erfolgt. In diesem Abschnitt wird zuerst der einfachere Fall, die Analyse von Lernkurven für solitäre Produktionssysteme, beschrieben. In einem zweiten Schritt werden die gewonnenen Erkenntnisse auf flexible Produktionssysteme übertragen.

#### Lernkurven für solitäre Produktionssysteme

Die Messung der Lernkurven-Effekte wird auf Basis so genannter *Maßgrößen* durchgeführt. Diese beschreiben die Entwicklung der Produktionsmitteleinsätze über der Zeit. Beispielfhaft seien Zeit- und Mengengrößen wie die Montagezeit oder Anlagenausfälle genannt. Abhängig vom gewünschten Detaillierungsgrad der Analyse werden Maßgrößen aggregiert betrachtet. Zum einen können sie zu übergeordneten Maßgrößen zusammengefasst werden. So ergibt sich aus technischen und organisatorischen Ausfällen das Gesamtausfallverhalten des Produktionssystems. Zum anderen können Maßgrößen über mehrere Prozesse zusammengefasst werden. In diesem Zusammenhang wird zwischen einer *vertikalen und einer horizontalen Aggregation* unterschieden [Henfling, 1987]:

- Als vertikale Aggregation von Einzelkurven wird die Addition verschiedener Lernkurven über verschiedene Produktionsstufen bezeichnet.

- Die horizontale Aggregation fasst Lernkurven der gleichen Produktionsstufe zusammen, beispielsweise bei parallelen Arbeitsstationen.
- Die zweidimensionale Aggregation kombiniert die vertikale und die horizontale Aggregation.

Je höher das gewünschte Aggregationsniveau der Betrachtung, desto besser eignen sich aufgrund der vielfältigen Überlagerungen unterschiedlicher Lerneffekte die Produktionskosten als Maßgröße. Die gewonnenen Aussagen lassen sich dann allerdings schwer auf zukünftige Lernprozesse übertragen. Da dies aber in der Regel für die innerbetriebliche Anwendung erforderlich ist, schlägt Hieber vor, dass sinnvoll aggregierte Lernkurven prognostiziert und ihre Auswirkung auf die Kostenfunktion bestimmt werden. Bei der Analyse und Prognose der Lerneffekte sind dann folgende *Kontextfaktoren* zu berücksichtigen (vgl. [Hieber, 1991], [Prochno, 2004]):

- Ein hoher Automatisierungsgrad reduziert den Anteil der direkten manuellen Tätigkeiten im Vergleich zu den unterstützenden Tätigkeiten. Da beide Tätigkeiten verschiedenen Lerneffekten unterliegen, können sie kaum aggregiert werden.
- Die Komplexität der Tätigkeit legt den Lerneffekt wesentlich fest. Tendenziell gilt, dass bei steigender Komplexität ein höheres Lernpotenzial existiert.
- Eine geringe Wiederholffrequenz der Tätigkeit hat ein langsames Lernen zur Folge, da ein Entlernen zwischen den Arbeitsvorgängen stattfindet. Die Montagezeit wird maximal bis zum Startwert der Lernkurve erhöht.
- Eine Vorqualifizierung der Mitarbeiter ist vorhanden, wenn die Mitarbeiter in der Vergangenheit ähnliche Tätigkeiten ausgeführt haben. Der Effekt tritt vor allem bei Nachfolgeprodukten auf.
- In neuen Fabriken spielt neben der individuellen Qualifikation auch die organisatorische Qualifikation eine Rolle. Erst mit der Zeit entwickeln sich definierte Rollen und Schnittstellen zwischen den Planungsbereichen. Die Qualifikation der Organisation hängt dabei entscheidend von der Qualität der Vorplanung und dem Reifegrad der Produkte ab.

Eine genaue Analyse der Lernkurvenparameter ist aufwändig. Sie ist allerdings zur Vorhersage zukünftiger Lerneffekte unabdingbar. Wird zum Beispiel bei einem Nachfolgeprodukt der Automatisierungsgrad erhöht, dann lassen sich historische Lerneffekte nicht unmittelbar übertragen. Aus diesem Grund wird für die Schätzung der Lernkurvenparameter vorge-

schlagen, „Normalwerte“ für eingeschwungene Zustände des Produktionssystems zu schätzen. Hierfür eignen sich beispielsweise für die Montage MTM-Vorgabezeiten<sup>20</sup>. Lerneffekte für die Anlaufphasen können dann auf Basis empirischer Untersuchungen näherungsweise prognostiziert werden [Hieber, 1991].

### **Lernkurven für flexible Produktionssystemen**

Unter Beachtung der erläuterten Aspekte ist der Lernkurven-Verlauf für solitär gefertigte Produkte zu bestimmen: Die auftretenden Lernereffekte sind im Wesentlichen einzelnen Produkten zuzuordnen. Bei produkt-, routen- und nachfolgefexiblen Systemen stellt sich das Bild anders dar. Hier treten *Überlagerungseffekte* zwischen verschiedenen Produkten und Linien auf, die eine zugeordnete Identifikation der Lerneffekte erschweren und die einen erhöhten Analyseaufwand verursachen. Die Lerneffekte werden dabei von der Flexibilitätsstrategie mitbestimmt. Hieber schreibt hierzu [Hieber, 1991]: *„Die Wahl des Lernkurven-Modells ist abhängig von Kontextfaktoren: Produkt, Herstellungsverfahren, Seriengröße, Maschinerisierungsgrad und neuerdings Automatisierungsgrad und Flexibilität.“*

Wildemann fordert für flexibel automatisierte Produktionssysteme eine Lernkurve über der kumulierten Stückzahl aller Produkte auf einer Anlage bzw. der gleichen Prozesstechnologie [Wildemann, 1984]. Hieber ergänzt, dass dabei der Produkt-Mix der Anlage zu berücksichtigen ist, damit Verschiebungen der durchschnittlichen Kosten bei Mix-Schwankungen nicht auf Lerneffekte zurückgeführt werden. Bei hoher Flexibilität und Automatisierung und damit meist höherer Nutzungsdauer der Anlagen sieht er Größendegressionseffekte an Bedeutung gewinnen. Die Verteilung des Investitionsaufwands auf eine höhere Stückzahl erkennt er als das „dominante Kostensenkungspotenzial“. In seinem Lernkurven-Konzept für die flexibel automatisierte Produktion wechselt er von der Bezugsgröße Produkt, das bei Flexibilität der Produktion nicht normiert ist, auf eine neue Bezugsgröße: die Nutzungsdauer des Produktionssystems [Hieber, 1991].

#### **5.1.3 Analyse von Lernkurveneffekten in Automobilmontagelinien**

Die Existenz von individuellen und organisatorischen Lernkurven in der Automobilmontage ist nachgewiesen [Baloff, 1971]. Ihre Berücksichtigung bei der Bewertung von Flexibilitätsstrategien ist aus den beschriebenen Gründen erforderlich. In diesem Abschnitt werden deshalb öffentliche und interne Fallbeispiele analysiert, die als Grundlagen für die Integration

---

<sup>20</sup> Aus dem Englischen: Methods Time Measurement.

eines Lernkurven-Modells in die Flexibilitätsbewertung dienen. Die bereits angesprochenen Herausforderungen bei der Bestimmung der Maßgrößen und der Lernkurvenparameter sind zu beachten, um zielgerichtete Aussagen machen zu können. Explizit zu nennen sind die Kontextfaktoren der Produktion und der Aggregationsgrad der Lernkurven. Aufgrund der Vertraulichkeit der Daten sind öffentliche Studien im Bereich der Automobilindustrie kaum zugänglich bzw. nicht ausreichend detailliert dargestellt. Es findet sich lediglich eine geringe Anzahl quantitativer Aussagen.

### **Öffentliche Studien**

Hieber untersucht in Fallstudien flexible und automatisierte Montagesysteme und weist Lernkurveneffekte über der Zeit nach. Seine Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen [Hieber, 1991]: Es werden Lernkurvenfaktoren von 72 bis 82 Prozent für direkte Tätigkeiten ermittelt. Ihre Relevanz nimmt bei zunehmender Automatisierung und Flexibilisierung ab. Als Grund sieht Hieber den geringeren Anteil direkter Tätigkeiten in automatisierten Systemen sowie Übertragungseffekte in flexiblen Anlagen, bei denen früher Gelerntes auf die aktuelle Produktion und neue Produkte übertragen wird. Des Weiteren beschreibt Hieber eine „Steady-State-Phase“, für die zwei Gründe verantwortlich sind: Zum einen Vorgabewerte der Planung, zum anderen das Ende der natürlichen Lernprozesse. Während die Steady-State-Phase im neuen Montagesystem erst nach 8 Monaten eintritt, wird sie bei den flexiblen bzw. automatisierten Produktionssystemen aufgrund ausgeprägter Überlagerungseffekten bereits nach vier bzw. drei Monaten erreicht. Für Tätigkeiten im indirekten Bereich ermittelt Hieber bei Wartung und Instandhaltung geringere Lernkurveneffekte. Die Lernkurvenfaktoren liegen bei 83,8 Prozent für Wartungsarbeiten und bei 88,4 Prozent für das Rüsten der Anlagen. Hieber führt den geringeren Lerneffekt auf die geringere Wiederholfrequenz zurück. Die auftretende Steady-State-Phase tritt bei den untersuchten Systemen nach 7 bzw. 9 Monaten ein.

Baloff untersucht Anlaufkurven für einen Automobilhersteller [Baloff, 1971]. Er betrachtet die Summe der Vor- und Endmontagen an einem Standort und ermittelt Lernkurven für die direkte Montagezeit. Diese wird arbeitskräftebasiert errechnet. Der Aggregationsgrad, die nicht im Detail beschriebene Datenerfassung sowie die nicht publizierten genauen Daten lassen sich nur schwer zum Vergleich verschiedener Flexibilitätsstrategien nutzen. Trotzdem haben die Ergebnisse Relevanz für die Arbeit: Es werden Lernkurvenfaktoren zwischen 80 und 90 Prozent in den Anlaufphasen nachweisen und es existiert eine Steady-State-Phase.

Jedoch lässt sich ihr Eintreten schwer prognostizieren, da der Effekt nach keiner konstanten kumulierten Stückzahl auftritt.

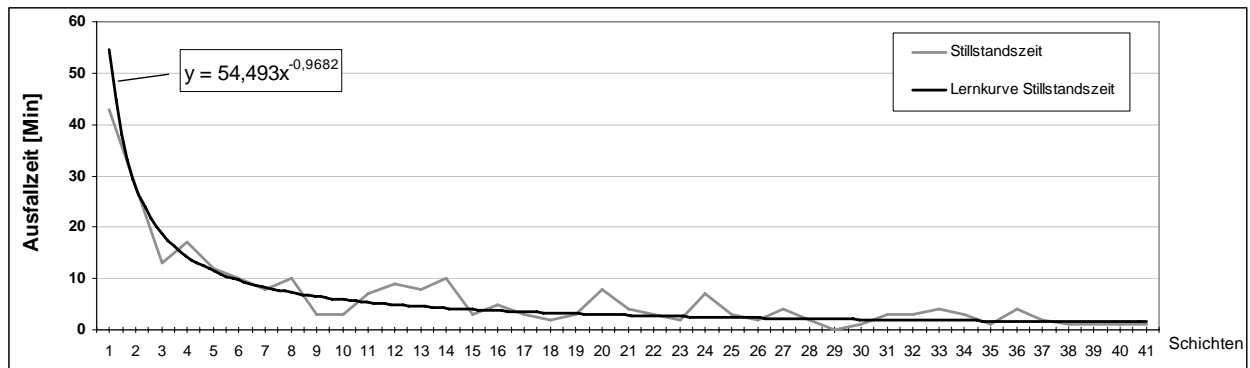


Abbildung 21: Lernkurve der Ausfallzeit über der Betriebsnutzungszeit [Mishima, 1997]

Mishima zeigt die Verfügbarkeit für eine automatisierte Automobilmontage eines Mitsubishi-Werks über der Schichtanzahl auf [Mishima, 1997]. Bei zehn automatisierten Arbeitsvorgängen wird die Verfügbarkeit im Rahmen von Wartungsarbeiten und dem kontinuierlichen Verbesserungsprozess gesteigert. Diesen Effekt stellt Abbildung 21 dar. Die durchgeführte Regressionsanalyse für die potenzielle Lernkurve ergibt einen Lernkurvenfaktor von 51 Prozent, der allerdings nach 38 Schichten in einer Steady-State-Phase stagniert.

Niimi und Matsudaira betrachten Effizienzsteigerungsprozesse während der Hochlaufphase eines japanischen Toyota-Werkes [Niimi et al., 1997]. Die Starteffizienz von ca. 98,5 nähert sich 100 Prozent innerhalb der ersten 5 Monate an. Der Anteil an Mitarbeitern, die vorher nicht in der Automobilindustrie gearbeitet hatten, liegt mit 70 Prozent verhältnismäßig hoch. Zwei Aussagen sind im Rahmen der Arbeit relevant. Die hohe Verfügbarkeit zum Zeitpunkt des Anlaufs sowie die nach fünf Monaten früh eintretende Steady-State-Phase. Neben dem Einfluss der geringen Mitarbeiterqualifikation werden keine Kontextfaktoren genannt.

## Interne Studien

Nachdem allein auf Basis der öffentlich zugänglichen Studien keine Aussagen zu Lernkurveneffekten in Abhängigkeit der Flexibilitätsstrategie sowie der Flexibilitätsnutzung gemacht werden können, werden Experteninterviews durchgeführt und interne Datenreihen eines Automobilherstellers untersucht. Dafür werden Daten aus Automobilmontagen für Kompaktklassefahrzeuge herangezogen. Da sie einen Einblick in die Produktions- und Kostenstruktur des Automobilherstellers geben, ist ein vertraulicher Umgang mit ihnen selbstverständlich. Deshalb werden die Eingangsdaten verfälscht. Sie haben jedoch repräsentativen Charakter in

Bezug auf die verhältnismäßigen Auswirkungen der Kontextfaktoren. In Anlehnung an Hieber werden sinnvoll aggregierte Maßgrößen betrachtet, die über das Modell der Endmontage eine Ableitung der Kosteneffekte erlauben (vgl. Abschnitt 5.1.2). Sie beeinflussen die Wahl der Flexibilitätsstrategien und können unabhängig voneinander betrachtet werden:

- Kapazitätsentwicklung nach Anläufen
- Montagezeitentwicklung nach Anläufen
- Taktausgleichsverlust-Entwicklung nach Umtaktungen

### **Kapazitätsentwicklung nach Anläufen**

Experteninterviews zur Kapazitätsentwicklung nach Anläufen bestätigen, dass nach der Inbetriebnahme des Montagesystems Lernkurveneffekte mit Auswirkung auf die Kapazität auftreten. Sie stagnieren im ersten untersuchten Unternehmen nach einem Zeitraum von ca. fünf Monaten. Die Lerneffekte basieren auf einer verbesserten Wartung- und Instandhaltung sowie auf Lerneffekten in der Arbeitsorganisation. Der Hersteller versucht, durch „Anlaufstrategien“ einen schnellen und kostengünstigen Anlauf zu realisieren. Zum Beispiel wird bewusst der Ausbringungstakt reduziert, um eine geringere Anzahl von Anlauf-Arbeitskräften bei anfänglich hoher Montagezeit einstellen zu müssen. Die Stärke der Kapazitätsreduktion wird nach Aussage der Planer weniger von der Produktflexibilität der Linien als vom Reifegrad der Prozesse bestimmt. Jedoch sind Lerneffekte bei produktflexiblen Systemen geringfügig stärker ausgeprägt als bei nicht-flexiblen Systemen.

Diese Aussagen werden gestützt durch analysierte Anlaufstrategien eines zweiten Automobilherstellers. Hier werden für produktflexible Anlagen leicht stärkere Lernkurveneffekte als für Solitärlinien eingeplant. Werden neue Fahrzeuge in vorhandene Linien integriert, so führt dies zu keinem relevanten Absinken der technischen Verfügbarkeit, jedoch wird über eine reduzierte Plattformbelegung oder über organisatorisch bedingte Bandstillstände die Kapazität leicht gesenkt. Die Zielkapazitäten werden nach Neuanläufen in Abhängigkeit der Produkt- und Linienkomplexität nach 2 bis 4 Monaten erreicht. Der Integrationsprozess neuer Fahrzeuge in produktflexible Anlagen ist nach 1 bis 2 Monaten abgeschlossen.

### **Montagezeit nach Anläufen**

Mit dem Anlauf beginnt die Montage eines neuen Produktes und damit arbeitsorganisatorische und individuelle Lerneffekte. Sie lassen sich auf zwei Ursachen zurückführen. Zum



einen werden individuelle Lernprozesse bei einer sich wiederholenden Ausführung der Arbeitsvorgänge beobachtet. Sie bewirken eine reduzierte Tätigkeitszeit und müssen durch Neuaustaktungen in kostenwirksame Effizienzsteigerungen umgesetzt werden. Zum anderen führt der „kontinuierliche Verbesserungsprozess“ zu optimierten Montageabläufen. Dies beinhaltet eine Reduktion des Taktausgleichsverlusts durch Neuordnungen von Arbeitsvorgängen auf Stationen sowie eine verbesserte Materialbereitstellung.

Im Rahmen der Arbeit wurden in zwei Studien Datenreihen eines Automobilherstellers untersucht. Es wurde zwischen Lerneffekten auf solitären, nachfolge- und produktflexiblen Linien unterschieden: In Studie 1 wurde die Entwicklung der Montagezeit für ein innovatives Kompaktklassefahrzeug und seinen Nachfolger auf einer Solitärlinie analysiert. Studie 2 befasste sich mit der durchschnittlichen Montagezeit einer produktflexiblen Montagelinie vor und nach Integration eines Neuprodukts. Die Vergleichbarkeit der Kontextfaktoren ermöglicht dabei den Vergleich der Lernkurveneffekte in Abhängigkeit der Flexibilitätsstrategien:

- In beiden Studien wurde die Entwicklung der Montagezeit über den historischen direkten Arbeitskräftebedarf ermittelt<sup>21</sup>. Indirekten Tätigkeitsbereiche wurden nicht berücksichtigt. Die Messung wurde demzufolge kaum durch den Automatisierungsgrad oder den Reifegrad der Produkte verfälscht.
- Beide Studien wurden an Kompaktklassefahrzeugen des gleichen Herstellers mit jeweils überschaubarer Variantenvielfalt durchgeführt. Die Taktzeiten lagen zwischen einer und 1,8 Minuten. Demnach war eine ähnlicher Komplexitätsgrad und eine ausreichende Wiederholfrequenz der Arbeitsvorgänge gegeben.
- Die untersuchten Werke sind gewachsene mitteleuropäische Standorte mit ähnlicher Mitarbeiterqualifikation.

Veränderungen der Produkte bzw. der durchschnittlichen Ausstattungsmerkmale wirken sich auf die Montagezeit aus und dürfen nicht Lerneffekten zugeordnet werden. In Studie 1 traten maßgebliche Änderungen beim Anlauf des Nachfolgers auf. In Studie 2 wurden starke Schwankungen der Montagezeit durch konstruktionsseitig vorgegebene Ausstattungspakete vermieden.

---

<sup>21</sup> Somit wird berücksichtigt, in wieweit theoretisches Kostensenkungspotenzial real umgesetzt wurde.

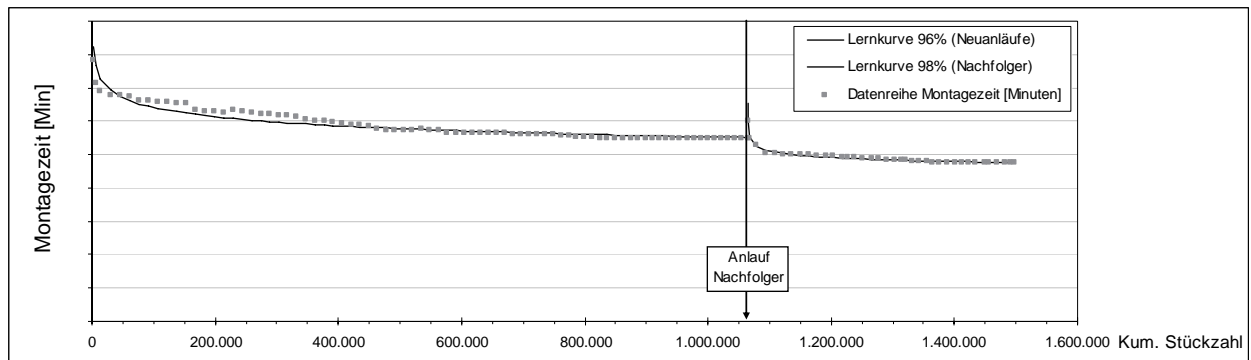


Abbildung 22: Lernkurven der Montagezeit für ein Kompaktklassefahrzeug und seinen Nachfolger

Die Ergebnisse der Studien sind im Folgenden zusammengefasst. In Studie 1 zeigte sich ein klassischer Lernkurvenverlauf nach dem Neuanlauf des Kompaktklassefahrzeugs auf einer neuen Solitärline (vgl. Abbildung 22). Die sich aus der Regressionsanalyse ergebenden Lernkurvenfaktoren lagen bei 96 Prozent. Die Datenreihe basierte auf Monatswerten, wodurch die Anlaufeffekte nur abgeflacht erkenntlich waren. Es ließ sich eine Steady-State-Phase ab einer Stückzahl von 900.000 Einheiten nachweisen. Sie lag begründet in der Entscheidung, den kontinuierlichen Verbesserungsprozess im letzten Produktionsjahr nicht umzusetzen. Mit dem Anlauf des Nachfolgeprodukts auf der angepassten Solitärline begann ein zweiter Lernprozess mit einer 98-Prozent-Lernkurve. Nachdem sich die theoretische Montagezeit aufgrund einer veränderten Produktstruktur beim Nachfolger nicht mehr direkt mit dem Vorgänger vergleichen ließ, mussten die Lernkurvenfaktoren bereinigt werden. Die gesamte Montagezeit wurde um 15 Prozent reduziert, und der Anteil ähnlicher bis gleicher Arbeitsvorgänge zwischen den Produkten lag bei ca. 20 Prozent. Ausgehend von einer Steady-State-Phase für Gleichteile ließ sich für die übrige Montagezeit eine 97-Prozent-Lernkurve nachweisen.

In Studie 2 wurde der Anlauf eines dreitürigen Produktderivats auf einer produktflexiblen Montagelinie untersucht. Der Dreitürer wurde nach drei Betriebsjahren auf der Linie eines Fünftürers integriert. Die Fahrzeuge unterschieden sich bei gleichem Vorranggraphen nur geringfügig. Die existierende Varianz wurde im Wesentlichen über Module abgefangen. Obwohl die Ziel-Montagezeit des zu integrierenden Dreitürers bei nur 94 Prozent der Montagezeit des bereits laufenden Fünftürers lag, stieg die durchschnittliche Montagezeit im Anlauf. Aus diesem Grund wurden Anlauf-Arbeitskräfte in die Linie integriert. Ihr Anteil von zwei Prozent wurde über drei Monate abgebaut. Nach dieser Zeit stagnierten die Lernkurveneffekte, obwohl bei einer geringeren theoretischen Montagezeit des Dreitürers ein weiteres Absinken der Montagezeit zu erwarten gewesen wäre. Die Effizienz der Linie im Mix-Betrieb

war demzufolge geringer als im Solitärbetrieb. Zurückführen ließ sich das auf einen im Schnitt höheren Taktausgleichsverlust, der durch die wenn auch geringe Varianz der Arbeitsvorgänge entstand. Die Auswirkungen zeigten sich im Taktausgleichsverlust, der dauerhaft um ca. 50 Prozent stieg und im Mittel zu einem zusätzlichen Arbeitskräftebedarf von 3,8 Prozent führt. Für neue Arbeitsvorgänge wurde unter Annahme einer Steady-State-Phase beim Fünftürer ein Lernkurvenfaktor von 96 Prozent auf Monatsbasis berechnet.

	<b>Lernkurvenfaktor Montagezeit<sup>22</sup></b>	<b>Stückzahl Steady-State-Phase</b>	<b>Zusätzlicher Taktausgleichsverlust</b>
Solitärline Studie 1	96%	900.000 Einheiten	k.A.
Nachfolgeflexible Linie Studie 1	98% gesamt, 97% für neue Arbeitsvorgänge	k.A.	k.A.
Produktflexible Line Studie 2	96% für neue Arbeitsvorgänge	k.A.	+ 50%

Tabelle 3: Nachgewiesene Lernkurveneffekte in den Studien 1 und 2

Neue Arbeitsvorgänge unterliegen damit in den Studien ähnlichen Lernkurvenfaktoren von 96 bis 97 Prozent auf Monatsbasis. Er gilt für Solitärlinien, für produkt- und für nachfolgeflexible Linien. Die Lernkurveneffekte für die gesamte Montagezeit des Produkts fallen deutlich geringer aus, wenn bereits bekannte Arbeitsvorgänge zu einer Vorqualifizierung der Individuen und der Organisation führen. Dieser Effekt wurde auf der nachfolgeflexiblen Solitärline nachgewiesen. Es kann davon ausgegangen werden, dass er auch in routenflexiblen Systemen auftritt, da organisatorische Lerneffekte einer Linie auf die anderen Linien übertragen werden. Die erhöhte Komplexität bei Mix-Produktion scheint keinen Einfluss auf die Lernkurvenfaktoren der Arbeitsvorgänge zu haben; es wird in produktflexiblen Linien nicht signifikant „mehr“ gelernt als in Solitärlinien. Jedoch steigt die durchschnittliche Montagezeit bei Mix-Produktion an. In Studie 2 wurde ein Anstieg des Taktausgleichsverlusts um 50 Prozent nachgewiesen.

In beiden Studien werden Steady-State-Phasen beobachtet. Zu ihrem Eintrittszeitpunkt lässt sich an dieser Stelle keine klare Aussage machen, weil sie unternehmenspolitisch beeinflusst waren. Bei kurzer Restlaufzeit oder einer Überkapazität an Arbeitskräften wird teilweise auf die Umsetzung von Lerneffekten verzichtet.

<sup>22</sup> Die Ermittlung der Daten auf Basis gemittelter Monatswerte führt zu einer Abflachung der Lernkurven.

Es ist davon auszugehen, dass sich die Ergebnisse bei Veränderung der Kontextfaktoren in ihrer Größenordnung unterscheiden. Beispielsweise ist anzunehmen, dass sich die Lernkurvenfaktoren mit der Taktzeit verändern. Einerseits steigt die Prozesskomplexität mit der Taktzeit, was tendenziell zu höheren Lerneffekten führt. Andererseits sinkt der durch Lerneffekte beeinflussbare Anteil bei erhöhter Taktzeit, da die Wegezeitanteile typischerweise steigen. Beide Effekte überlagern sich, so dass auf Basis der vorhandenen Datenreihen keine Aussagen über die Veränderung der Lernkurvenfaktoren mit der Taktzeit getroffen werden können.

### **Taktausgleichsverlust nach Umtaktungen**

Eine ausschließliche Betrachtung der langfristigen Effekte auf die Montagezeit reicht für eine Bewertung der Flexibilitätsstrategien nicht aus. Insbesondere in Solitärlinien sind die Montagekosten abhängig von der Anzahl der erforderlichen Umtaktungen zur Anpassung an Volumenschwankungen. Sie destabilisieren das Produktionssystem, weil Arbeitsvorgänge neu auf Arbeitsstationen verteilt werden. In der Folge steigt der Taktausgleichsverlust<sup>23</sup>, um über Lernkurveneffekte wieder reduziert zu werden. Diese kurz- bis mittelfristigen Effizienzverluste nach Umtaktungen überlagern die oben untersuchten langfristigen Lernkurveneffekten.

Es wurden zwei Studien zu diesem Thema durchgeführt. Studie 1 analysiert die Umtaktung einer variantenreichen produktflexiblen Montagelinie, auf der ein Drei- und ein Fünftürer montiert werden. Für Studie 2 wurde eine einfache produktflexible Linie untersucht, auf der zwei montierte Produkte eine geringe Varianz der Arbeitsvorgänge aufweisen. Um in den Analysen starke Überlagerungseffekte zwischen den langfristigen und kurzfristigen Lerneffekten zu vermeiden, werden Datenreihen analysiert, bei der sich die langfristigen Montagezeit-Lernkurven in einer Steady-State-Phase befanden.

---

<sup>23</sup> In einer durch Gruppenarbeit und „job rotation“ geprägten Automobilmontage sind den Mitarbeiter die auszuführenden Arbeitsinhalte bereits bekannt. Die Tätigkeitszeit bleibt demzufolge annähernd unverändert.

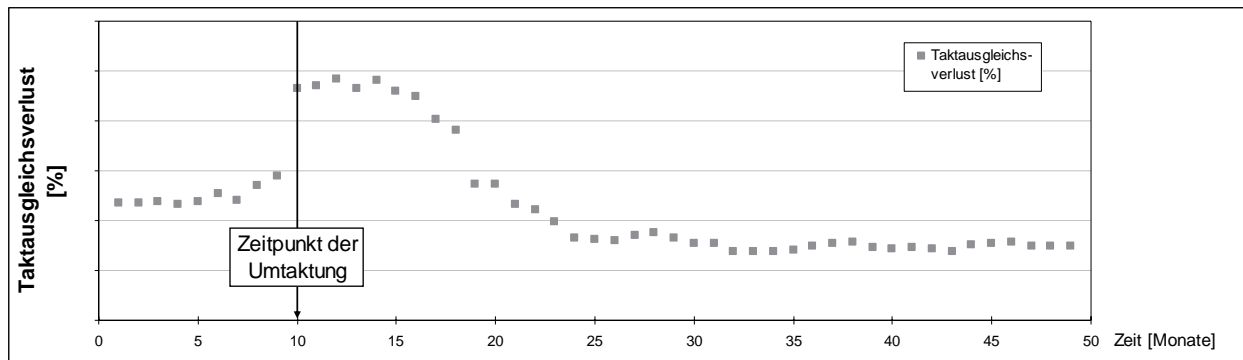


Abbildung 23: Veränderung des Taktausgleichsverlusts nach Umtaktung der Montagelinie

Die Auswirkungen einer Umtaktung von 1,4 auf 1,1 Minuten in Studie 1 ist in Abbildung 23 gezeigt. Der Taktausgleichsverlust wird über einen Zeitraum von 10 Monaten um bis zu 50 Prozent erhöht und nur langsam durch die Umsetzung von KVP-Maßnahmen wieder reduziert. Am Niveauunterschied des Taktausgleichsverlusts vor und nach der Umtaktung lässt sich eine Abhängigkeit des Taktausgleichsverlusts von der Taktzeit erkennen. Sie lässt sich erklären zum einen durch takt- und montagezeitunabhängigen Arbeitskräften an automatisierten und teilautomatisierten Stationen. Bei ihnen sinkt im untersuchten Fall bei reduzierter Taktzeit der Anteil an Wartezeiten in der Linie (vgl. Abschnitt 4.1.1). Zum anderen reduzieren sich die Wegezeiten in der Linie. Auch die Ergebnisse aus Studie 2 zeigen bei geringerer Komplexität der Arbeitsvorgänge einen Anstieg des Taktausgleichsverlusts von 30 Prozent nach der Umtaktung. Der Zeitraum des Lerneffekts lag allerdings nur bei ca. 4 Monaten.

Aus den Untersuchungen folgt, dass Umtaktungen einen mittelfristigen Einfluss auf die Effizienz der Montagelinie haben. Die Stärke des Effizienzverlusts steigt mit der Varianz der Arbeitsvorgänge in der Montagelinie. Produktflexible Linien sind somit stärker betroffen als Solitärlinien. Es bleibt jedoch anzumerken, dass Umtaktungen in produktflexiblen Linien aufgrund der Stückzahlen-Ausgleichseffekte zwischen verschiedenen Produkten tendenziell seltener durchgeführt werden. Häufige Umtaktungen von Solitärlinien können dazu führen, dass die mittlere Effizienz schlechtere Werte erreicht als bei einer selten umgetakteten produktflexiblen Linie.

#### 5.1.4 Konzeption eines Lernkurven Modells für Montagezeit und Taktausgleichsverlust

In Kapitel 5.1.3 wurde aufgezeigt, dass Flexibilitätsstrategien Lerneffekte beeinflussen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Abschnitt in das Montagemodell aus Kapitel 4

integriert. Dabei müssen für die Lernkurve der Montagezeit Ähnlichkeiten zwischen den Produkten berücksichtigt werden. Die funktionalen Zusammenhänge des Montagemodells werden dafür in Anlehnung an das Stanford- und Boing-Modell (vgl. Abschnitt 5.1.1) erweitert. Die Variablen des Taktausgleichsverlusts müssen in Abhängigkeit des Zeitpunkts der letzten Umtaktung berechnet werden. Die Lernkurven der Kapazitätsentwicklung können ohne Anpassung des Montagemodells abgebildet werden. Sie werden weiterhin über die Eingangsgrößen Plattformbelegung und Verfügbarkeit in Abhängigkeit der Flexibilitätsstrategie beschrieben und sind im Anschluss unabhängig von Entscheidungen im Montagebetrieb.

### Lernkurvenkonzept für die Montagezeit

Im einfachen Fall treten keine Überlagerungseffekte zwischen Produkten auf. Die Montagezeit pro Fahrzeug und Linie ist dann abhängig von der kumulierten produzierten Stückzahl und den Koeffizienten der logarithmisch-linearen Lernkurve. Definiert man den Parameter  $LKF$  als Lernkurvenfaktor und  $mz$  als Montagezeit der ersten produzierten Einheit, so gilt für die Montagezeit des Montagemodells in Abhängigkeit der kumulierten Stückzahl  $KUMVOL$ :

$$MZ_{t,l,p} = mz_{t,l,p} \cdot KUMVOL_{t,l,p}^{\frac{\log LKF}{\log 2}} \quad \text{F 42}$$

Zur Berechnung der kumulierten Stückzahl wird der aktualisierte Bedarf  $ABED$  und die Entscheidungsvariable Programmverteilung  $EV\_PV$  herangezogen:

$$KUMVOL_{t,l,p} = KUMVOL_{t-1,l,p} + \sum_{p=1}^p ABED_{t,p} \cdot EV\_PV_{t,l,p} \quad \text{F 43}$$

Bei routen-, produkt- und nachfolgeflembilen Montagelinien sind bestimmte Arbeitsvorgänge bereits bekannt: Es treten Überlagerungseffekte auf. Die Lernkurveneffekte lassen sich nur über der Anzahl der durchgeführten ähnlichen Arbeitsvorgänge auftragen, und die analytische Ermittlung der Lernkurve wird komplexer. Es sind zwei grundlegende Überlagerungseffekte zu unterscheiden:

- *Linieninterne Überlagerungseffekte:* Wurden Produkte mit gleichen oder ähnlichen Arbeitsvorgängen auf der gleichen Montagelinie produziert, so kommt es zu einem Transfer der Lerneffekte zwischen den Produkten. Dieser Fall tritt bei Produkt- oder Nachfolgeflembilität auf.

- *Linienübergreifende Überlagerungseffekte:* Wurden Produkte mit gleichen oder ähnlichen Arbeitsvorgängen auf anderen Montagelinien produziert, so kommt es zu einem Transfer von Lerneffekten zwischen den Produkten. Insbesondere in routenflexiblen Systemen kommt es zu diesem Effekt.

Ein vollständiger Transfer von Lerneffekten ist nur bei gleichen Arbeitsvorgängen auf der gleichen Linie möglich. In den weiteren Fällen werden die Lerneffekte anteilig übernommen. Z. B. können individuelle Lerneffekte kaum auf Mitarbeiter anderer Linien übertragen werden, während organisatorische Lerneffekte durchaus zu transferieren sind. Um eine Unterscheidung zwischen zu transferierenden und nicht zu transferierenden Arbeitsvorgängen zu erleichtern, wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine vereinfachende Definition zurückgegriffen: Zwei Arbeitsvorgänge werden als ähnlich bezeichnet, wenn Lerneffekte voll oder in hohem Maß transferiert werden können.

In einem ersten Schritt werden auf Basis dieser Definition die linieninternen Überlagerungseffekte betrachtet. Haben zwei Produkte auf einer Montagelinie ähnliche Arbeitsvorgänge, so fallen die Lerneffekte nicht getrennt über der kumulierten Stückzahl der einzelnen Produkte an, sondern über der kumulierten Stückzahl beider Produkte. Es gilt demnach für zwei Produkte A und B in Anlehnung an die Mengentheorie für nicht ähnliche ( $A \wedge \neg B$  bzw.  $B \wedge \neg A$ ) und ähnliche Arbeitsvorgänge ( $A \wedge B$ ):

$$MZ_{t,l,A \wedge B} = mz_{t,l,A \wedge B} \cdot KUMVOL_{t,l,A \wedge B}^{\frac{\log LKF_{A \wedge B}}{\log 2}} \quad \text{F 44}$$

$$MZ_{t,l,A \wedge \neg B} = mz_{t,l,A \wedge \neg B} \cdot KUMVOL_{t,l,A \wedge \neg B}^{\frac{\log LKF_{A \wedge \neg B}}{\log 2}} \quad \text{F 45}$$

$$MZ_{t,l,B \wedge \neg A} = mz_{t,l,B \wedge \neg A} \cdot KUMVOL_{t,l,B \wedge \neg A}^{\frac{\log LKF_{B \wedge \neg A}}{\log 2}} \quad \text{F 46}$$

Die verschiedenen Lernkurven sollen im Folgenden über die Menge A der Lernkurven mit Index a referenziert werden. Bei der Generierung dieser Menge muss in Bezug auf die Aggregation der Arbeitsvorgänge beachtet werden, dass die Anzahl der Lernkurven die Kombinatorik der aggregierten ähnlichen Arbeitsvorgänge widerspiegelt und damit exponentiell über der Anzahl der Produkte steigt. Der Datenerhebungsaufwand kann auf diese Weise erheblich sein, so dass die Zusammenfassung von Produktfamilien sinnvoll ist.

Die erforderliche durchschnittliche Montagezeit  $DMZ$  pro Periode und Linie kann über die gewichtete Summe der Montagezeiten  $MZ$  der verschiedenen Lernkurven  $a$  ermittelt

werden. Die Gewichtung  $\alpha$  orientiert sich am Produkt-Mix der betrachteten Periode. Dies gilt auch für Produkte, die auf den gleichen Linien in der Vergangenheit produziert wurden und zum Zeitpunkt der Betrachtung bereits ausgelaufen sind. Für die durchschnittliche Montagezeit der Linie pro Periode gilt:

$$DMZ_{t,l} = \sum_{a=1}^A \alpha_a \cdot MZ_{t,l,a} \quad \text{F 47}$$

Bei linienübergreifenden Überlagerungseffekten werden ähnliche Arbeitsvorgänge auf verschiedenen Linien ausgeführt. Beispielsweise wird ein Produkt auf zwei Linien produziert. Arbeitsorganisatorische Lerneffekte einer Montagelinie können dann teilweise auf die andere Linie übertragen werden. Formal führt dieser Überlagerungseffekt zu einer Linksverschiebung der Lernkurve über der kumulierten Stückzahl<sup>24</sup>. Die Stärke der Linksverschiebung kann über einen Anteil  $ant$  der auf anderen Linien durchgeführten ähnlichen Arbeitsvorgänge  $KUMVOL^{\forall L \neq l}$  angegeben werden.

$$MZ_{t,l,a} = mz_{t,a} \cdot (KUMVOL_{t,l,a} + ant \cdot KUMVOL_{t,a}^{\forall L \neq l})^{\frac{\log LKF_a}{\log 2}} \quad \text{F 48}$$

Das Lernkurvenkonzept für die Montagezeitentwicklung in Abhängigkeit der linieninternen und linienübergreifenden Überlagerungseffekte für die Automobilmontage ist damit beschrieben. Die Formeln sind über die Variable  $MZ$  in das Modell der Endmontage integriert. Bei produktflexiblen Linien ist die Montagezeit  $MZ$  durch die gewichtete Variable durchschnittliche Montagezeit  $DMZ$  zu ersetzen.

### Lernkurvenkonzept für den Taktausgleichsverlust nach Umtaktungen

Die Änderung der Taktzeit führt zu einer Destabilisierung der Prozesse in der Montage und zieht eine Erhöhung des Taktausgleichsverlusts nach sich. Dieser drückt sich in einem gesteigerten Arbeitskräftebedarf aus. Es wird angenommen, dass die Umsetzung der Lerneffekte über der Zeit, und nicht über der kumulierten Stückzahl, beschrieben werden kann<sup>25</sup>. Infolgedessen legt der Zeitpunkt der letzten Umtaktung die Höhe des aktuellen Taktausgleichsverlusts fest. Des Weiteren hat die Komplexität der Arbeitsvorgänge einen Einfluss. Diese ist

<sup>24</sup> Im Gegensatz dazu führen Prozesse des Entlernens zu einer Rechtsverschiebung der Lernkurve.

<sup>25</sup> Diese Annahme erlaubt eine einfachere Implementierung im Optimierungsmodell (vgl. Abschnitt 5.2.1)



im Wesentlichen von der Taktzeit und der Varianz der Arbeitsvorgänge, also vom Solitär- oder Mixbetrieb der Montagelinie abhängig.

Um die Lernkurve im Montagemodell abzubilden, muss der Parameter  $tag_l$  des Taktausgleichsverlusts ersetzt werden durch eine vom letzten Taktzeitwechsel und vom Solitär- oder Mixbetrieb abhängige Funktion. Diese kann in Abhängigkeit der Umsetzung der Verbesserungsmaßnahmen sowohl linear, logarithmisch-linear oder als Stufenfunktion definiert werden. Im Folgenden wird die logarithmisch-lineare Lernkurve beschrieben. Der Parameter  $tag_l^{Ziel}$  legt für Mix- oder Solitärbetrieb den Ziel-Taktausgleichsverlust fest. Die zeitliche Rechtsverschiebung der Lernkurve in der Periode der Umtaktung wird durch den Parameter  $\Delta t\_LKVersch_l$  angegeben.  $\Delta t\_leUm_{t,l}$  beschreibt den seit der letzten Umtaktung vergangenen Zeitraums. Der Lernkurvenfaktor  $LKF_l$  bezieht sich auf die durch die Umtaktung entstehenden zusätzlichen Austaktungsverluste:

$$tag_{t,l} = tag_l^{Ziel} + (\Delta t\_leUm_{t,l} + \Delta t\_LKVersch_l) \frac{\log LKF}{\log 2} \quad \text{F 49}$$

Mit jeder Verdopplung des Zeitraums sinkt der durch die Umtaktung entstandene Taktausgleichsverlust um einen durch  $1 - LKF_l$  definierten Prozentsatz. Er nähert sich über der Zeit dem Ziel-Taktausgleichsverlust an.

## **5.2 Entwicklung eines Optimierungsmodells zur Antizipation der Flexibilitätsnutzung**

Nachdem in Kapitel 5.1 die Antizipation des Montagebetriebs mittels Lernkurven beschrieben wurde, beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Antizipation des zukünftigen Entscheidungsverhaltens. Dafür wird ein Optimierungsalgorithmus erarbeitet.

### **5.2.1 Aufbau des Optimierungsmodells**

Es wird angenommen, dass zukünftige Entscheidungen zur Flexibilitätsnutzung in der Automobilmontage mit dem Ziel einer Kostenminimierung getroffen werden (vgl. Kapitel 2.4). Es soll deshalb ein Optimierungsmodell formuliert werden, das eine kostenoptimale Konfiguration der Entscheidungsvariablen für eine prognostizierte Nachfrage liefert. Aufgrund der in Kapitel 3.1 durchgeführten Analyse der Optimierungsverfahren wird auf die dynamische Programmierung zurückgegriffen. Diese spiegelt das zeitdynamische Entscheidungsverhalten

bei der Flexibilitätsnutzung wider und erlaubt den effizienten Umgang mit den in Kapitel 4 aufgezeigten Nicht-Linearitäten und der hohen Problemkomplexität. Grundlage für die Implementierung sind die Definitionen der möglichen Anpassungszustände, der Transformationsfunktionen und der Zielfunktion.

### Anpassungszustände

In Abhängigkeit der durch die Investition festgelegten Auslegung des Montagesystems können mögliche Anpassungszustände über der Zeit definiert werden. Jeder Anpassungszustand ist über eine konkrete Ausprägung aller in Kapitel 4 definierten Entscheidungsvariablen bestimmt und kann im Produktionsbetrieb unter Berücksichtigung der vorgegebenen Nebenbedingungen angenommen werden. Der Aufbau einer endlichen Anzahl von Anpassungszuständen für die dynamische Programmierung erfordert eine Transformation der Entscheidungsvariablen in *diskrete Zustandsvariablen*. Diese sind in Tabelle 4 dargestellt.

Zustandsvariable	Beschreibung	Entscheidungsvariable
$b_{t,s,l}$	Betriebsnutzungszeit	$EV\_BNZV_{t,s,l}$
$p_{t,s,l}$	Betriebsnutzungszeit während der Pausen	$EV\_PADGF_{t,s,l}$
$r_{t,s,l}$	Anzahl von Betriebsruhen	$EV\_BETRUR_{t,s,l}$
$n_{t,s,l}$	Anzahl eingeplanter Schichten	$EV\_ANZS_{t,s,l}$
$tz_{t,l}$	Taktzeit	$EV\_TZ_{t,l}$
$s_{t,l}$	Schichtbetrieb	$EV\_SB_{t,l}$
$as_{t,l}$	Anzahl unbefristeter Arbeitskräfte	$EV\_AKU_{t,l}$
$af_{t,l}$	Anzahl befristeter Arbeitskräfte	$EV\_AKB_{t,l}$
$ab_{t,l}$	Anzahl der Arbeitskräfte in Abordnung	$EV\_AKAB_{t,l}$
$av_{t,l,k}$	Anzahl der zwischen Linien verschobenen Arbeitskräfte	$EV\_AKVERS_{t,l,m}$
$v_{t,l,p}$	Programmverteilungsfaktor (Anteil pro Produkt und Linie)	$EV\_PV_{t,l,p}$
$d_{t,p}$	Nachfrage <sup>26</sup>	$EV\_PVS_{t,p}$

Tabelle 4: Zustandsvariablen in Anlehnung an die Entscheidungsvariablen des Montagemodells

Ein Anpassungszustand  $z$  ist über die Ausprägung seiner Zustandsvariablen definiert. Die Kombinatorik über alle möglichen Ausprägungen führt zu einer Vielzahl von Anpassungs-

<sup>26</sup> Die Zustandsvariable  $d$  stellt aus Transparenzgründen die absolute Nachfrage pro Periode dar, während der Freiheitsgrad  $EV\_PVS$  die Programmverschiebung zwischen den Perioden repräsentiert. Beide Größen lassen sich ineinander umwandeln.

zuständen, die in ihrer Summe den Lösungsraum des Optimierungsproblems aufspannen. Die dynamische Programmierung findet einen kostenoptimalen Anpassungspfad durch diesen Lösungsraum. Hierfür müssen die Wechsel zwischen verschiedenen Anpassungszuständen beschrieben werden. Diese Aufgabe übernehmen die Transformationsfunktionen.

### Transformationsfunktionen

Die Transformationsfunktion beschreibt den Zusammenhang zwischen einem Anpassungszustand, einer Anpassungsentscheidung und einem Folge-Anpassungszustand. Sie legt fest, wie sich im Rahmen einer Anpassungsentscheidung die Zustandsvariablen verändern. Demzufolge ist ihre Definition für jede Zustandsvariable notwendig.

Anpassungszustand (Periode t)	Anpassungsentscheidung (Periode t)	Anpassungszustand (Periode t+1)
Taktzeit: $tz_{t,l}$	Ziel-Taktzeit: $\hat{t}z_{t,l}$	$t_{t+1,l} = \hat{t}z_{t,l}$
Schichtbetrieb: $s_{t,l}$	Ziel-Schichtbetrieb: $\hat{s}_{t,l}$	$s_{t+1,l} = \hat{s}_{t,l}$
Unbefristete Arbeitskräfte: $a_{t,l}$	Ziel-Arbeitskräfte: $\hat{a}_{t,l}$ Arbeitskräfte-Verschiebung von Linie l nach k: $\hat{a}_{t,l,k}^v$	$a_{t+1,l} = \hat{a}_{t,l} + \sum_{k=1}^L (\hat{a}_{t,k,l}^v - \hat{a}_{t,l,k}^v)$

Tabelle 5: Zusammenhang zwischen Anpassungszuständen und Anpassungsentscheidungen über der Zeit.

In Tabelle 5 sind Zustandsvariablen der Anpassungszustände in Abhängigkeit der Anpassungsentscheidungen exemplarisch dargestellt. Im einfachen Fall wird die Zustandsvariable auf den Wert der Anpassungsentscheidung gesetzt. Ist jedoch die Zustandsvariable abhängig von mehreren Entscheidungsvariablen, so können die Transformationsfunktionen komplexere Form annehmen. Beispielsweise errechnet sich die Anzahl unbefristeter Arbeitskräfte pro Linie aus den Arbeitskräfte-Verschiebungen und den Ziel-Arbeitskräfte.

### Zielfunktion

Zur Beschreibung des Zielsystems und der monetären Auswirkungen der Flexibilitätsnutzung wird die Kostenfunktion des Montagemodells aus Kapitel 4.2 herangezogen. Sie integriert die Betriebs- und Anpassungskosten  $BK_{t,l}$  und  $WK_{t,l}$  sowie die Gewinne aus Abordnungen  $gewabord \cdot EV - AB_{t,l}$ . Die Abzinsung der Kosten in der Kapitalwertbetrachtung stellt sicher, dass die Kostenfunktion die aus heutiger Sicht zu minimierenden Kosten darstellt. Die Funktionalgleichung der dynamischen Programmierung stellt sich wie folgt dar:

$$F^*(z_t) = \min_{z_{t-1} \in Z_{t-1}} \left\{ \sum_{l=1}^L (BK_{t,l} + WK_{t,l} - gewabord \cdot EV - AB_{t,l}) \cdot \frac{1}{(1 + kalkz)^t} + F^*(z_{t-1}) \right\} \quad \text{F 50}$$

Der kostenoptimale Anpassungspfad in eine Periode  $t$  ergibt sich aus der minimalen Summe der geschweiften Klammer. In ihr sind neben der Kostenfunktion des Montagemodells die minimalen Kosten bis in die Vorperiode enthalten. Sie spiegeln den rekursiven Charakter der Funktionalgleichung wider (vgl. Abschnitt 3.1.1): Für jeden Anpassungszustand der Periode  $t$  werden die Kosten ermittelt. Zur Errechnung der Kosten bis in Periode  $t-1$  wird die Funktionalgleichung solange erneut aufgerufen, bis Periode 1 erreicht ist und die minimalen Gesamtkosten bestimmt sind.

### Statusvariablen

Der rekursive Aufbau der Funktionalgleichung setzt voraus, dass der kostenoptimale Anpassungspfad alleine auf Basis der minimalen Kosten der Vorgängerperioden ermittelt werden kann. Ist dies nicht der Fall, so ist das Bellmann'sche Optimalitätsprinzip verletzt und die dynamische Programmierung führt nicht zur optimalen Lösung (vgl. Abschnitt 3.1.1). In der Realität hat jedoch ein weitaus größerer Zeitraum vor und nach der aktuellen Periode Einfluss auf die kostenoptimale Strategie: Entscheidungen, die vorerst zu höheren Kosten führen, können beispielsweise aufgrund der zeitversetzten Lerneffekte zur kostenoptimalen Gesamtstrategie gehören. Um über die Funktionalgleichung kostenoptimale Lösungen zu finden, müssen alle Entscheidungen, die zwar kurzfristig zusätzliche Kosten verursachen, jedoch in der Zukunft zu Kosteneinsparungen führen, explizit in Zuständen abgebildet werden. Der Zustandsraum wird aus diesem Grund um Statusvariablen erweitert. Sie speichern die über der Zeit relevanten Informationen und stellen sicher, dass teure Teilstrategien mit positivem Effekt auf die Gesamtstrategie nicht durch die Funktionalgleichung übergangen werden [Bertsekas, 1995]. Folgende Statusvariablen werden definiert:

- Zeitpunkt der letzten Umtaktung  $s\_takt_{t,l}$ : Die Variable ermöglicht die Beachtung früher Umtaktungen, die zwar vorerst höheren Kosten verursacht, jedoch aufgrund der Lerneffekte zu späteren Zeitpunkten kostenoptimal sind.
- Füllstand eines theoretischen Puffers zur Entkopplung von Produktionsprogramm und Nachfrage  $s\_puffer_{t,p,l}$ : Eine Überproduktion in Vorperioden verursacht früher anfallende Kosten, sie entlastet jedoch evtl. Engpässe in Folgeperioden und ist deshalb aus Sicht der Gesamtstrategie kostenoptimal.

- Anzahl bisher eingeplanter Betriebsruhen  $s_{br_{s,t,l}}$  und Samstage  $s_{sas_{s,t,l}}$ : Es steht eine begrenzte Anzahl von Betriebsruhen (bzw. Samstagsschichten) pro Jahr zur Verfügung. Ein Verzicht in frühen Perioden ist zweckmäßig, wenn dadurch in Zukunft Kosten eingespart oder Engpässe umgangen werden können.
- Stand des Arbeitszeitkontos  $s_{azk_{t,l}}$ : Eine frühzeitige Korrektur des Arbeitszeitkontos durch die Einstellung zusätzlicher Arbeitskräfte führt zwar kurzfristig zu erhöhten Kosten, ist jedoch möglicherweise im Sinne einer kostenoptimalen Nutzung des Arbeitszeitkontos in der Gesamtstrategie zweckmäßig.

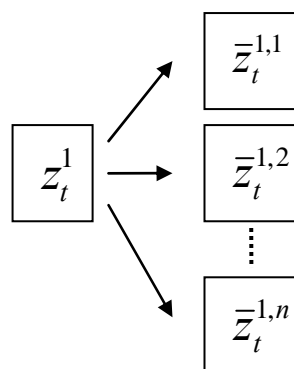


Abbildung 24: Zustandsraumvergrößerung bei Einführung von Statusvariablen

Abbildung 24 zeigt die Vergrößerung des Lösungsraums durch die Statusvariablen. Aus einem Anpassungszustand  $z_t$  werden mehrere Zustände  $\bar{z}_t$ . Aufgrund der Vervielfältigung existieren nach Einführung der Statusvariablen für jeden Anpassungszustand  $z_t$  mehrere optimale Pfade durch den Entscheidungsbaum, die in diesen Anpassungszustand führen. Die Anzahl der möglichen Entscheidungen steigt jedoch nicht. Eine Statusvariable stellt deshalb keine Entscheidungsmöglichkeiten dar.

### 5.2.2 Ansätze der Komplexitätsreduktion

Die Nutzung der dynamischen Programmierung setzt voraus, dass der Lösungsraum eine kritische Größe nicht überschreitet. Sei durch  $|x|$  die Anzahl möglicher Variablen- bzw. Mengenbelegungen gegeben, so lassen sich die Anzahl möglicher Zustände ohne bzw. mit Statusvariablen  $|Z_t|$  bzw.  $|\bar{Z}_t|$  pro Periode wie folgt berechnen:

$$|Z_t| = \left( |tz_t| \cdot |s_t| \cdot |as_t| \cdot |af_t| \cdot |ab_t| \right)^{|L|} \cdot \left( |b_t| \cdot |p_t| \cdot |r_t| \cdot |n_t| \right)^{|L||S|} \cdot |av_t|^{2|L|} \cdot |v_t|^{|P||L|} \cdot |d_t|^{|P|} \quad \text{F 51}$$

$$|\bar{Z}_t| = |Z_t| \cdot \left( |st_t| \cdot |ps_t| \cdot |az_t| \right)^{|L|} \cdot \left( |gb_t| \cdot |gs_t| \cdot |zb_t| \right)^{|L||S|} \quad \text{F 52}$$

Die Problemkomplexität steigt demnach exponentiell mit der Anzahl der Linien, der Schichtbetriebe und der Produkte. Mit heutigen Rechnern können aus Gründen der Rechenzeit nur eine beschränkte Anzahl von Anpassungszustände pro Periode betrachtet werden, wobei die Rechenzeit linear mit der Anzahl der Perioden steigt (vgl. Abschnitt 5.3.3). Im Folgenden werden deshalb Ansätze zur Komplexitätsreduktion beschrieben. Diese schränken den Lösungsraum auf Basis bekannter technischer und arbeitsorganisatorischer Randbedingungen ein.

### Komplexitätsreduktion durch Zustandsreduktion

In diesem ersten Ansatz zur Komplexitätsreduktion wird die Anzahl der Zustände reduziert, indem die Wahl der kombinierten Zustands- und Statusvariablen eingeschränkt wird. Zwar sind im allgemeinen Optimierungsmodell aus Gründen der Allgemeingültigkeit alle wesentlichen Freiheitsgrade der Planer als Zustandsvariablen hinterlegt. In der Praxis sind diese jedoch stark voneinander abhängig. Daher können bestimmte Zustandsvariablen in *abgeleitete Größen* umgewandelt werden. Sie müssen dann nicht mehr durch die dynamische Programmierung optimiert werden, sondern werden formell ermittelt. Kontextspezifische Regelwerke können ergänzend in Nebenbedingungen erfasst werden.

Gilt beispielsweise, dass ein Standort befristete und unbefristete Arbeitskräfte zu ähnlichen Gehaltskonditionen einstellt, so wird er das Potenzial befristeter Arbeitskräfte ausnutzen, um dadurch das personelle Fixkostenrisiko zu minimieren. Dieses Potenzial drückt sich in einem maximalen Anteil an befristeten Arbeitskräften aus, der sich aus tariflichen, gesetzlichen oder qualitativen Anforderungen ergibt. Der Anteil lässt sich als Parameter definieren, so dass die „Anzahl befristeter Arbeitskräfte“ aus der Differenz des Arbeitskräftebedarfs und der unbefristeten Arbeitskräften abgeleitet werden kann. Unbefristete Arbeitskräfte werden ausschließlich dann eingestellt, wenn der maximale Anteil befristeter Arbeitskräfte überschritten ist.

In Bezug auf eine Komplexitätsreduktion für das Arbeitszeitkonto kann ausgenutzt werden, dass eine optimale Lösung das Arbeitszeitkonto maximal nach oben ausgereizt, um den Arbeitskräftebedarf zu minimieren. Ein Absenken des Kontos kann lediglich zur Einhaltung des oberen Arbeitszeitkonten-Korridors dienen. Es ist möglich, das Arbeitszeitkonto in einem

ersten Schritt nicht zu beachten, um die kostengünstigste Lösung zu ermitteln. In einem zweiten Schritt kann dann eine kostenminimale Anzahl von Arbeitskräften ermittelt werden, um die Korridor-Grenzen einzuhalten. Allerdings kann bei diesen Voraussetzungen kein globales Optimum gefunden werden, weil die für das Arbeitszeitkonto eingestellt Arbeitskräfte dem Algorithmus eventuell weitere Anpassungen ermöglichen würden.

Bei unterschiedlichen Produktionskosten auf Montagelinien kann davon ausgegangen werden, dass die Produkte pro Periode so auf die Linien verteilt werden, dass die Summe der Produktionskosten minimiert wird. Es kann eine Heuristik oder Extremwertbetrachtung in das Optimierungsmodell integriert werden, um die Programmverteilung in jedem Anpassungszustand zu optimieren. Zwar werden durch dieses Vorgehen linieninterne Lerneffekte der Montagezeit nicht in vollem Maße berücksichtigt, sie haben jedoch im stabilen Montagebetrieb kaum mehr Einfluss auf die operative Verteilung des Produktionsprogramms auf die Montagelinien. Über die partielle Ableitung der folgenden Zielfunktion nach der Programmverteilung  $v_{t,l,p}$  wird eine kostenoptimale Verteilung pro Zustand auf analytischem Weg gefunden:

$$\min \sum_{l=0}^L \left[ \frac{\sum_{p=0}^P bed_{t,p} \cdot mz_{t,l,p} \cdot pfb_{t,l} \cdot v_{t,l,p}}{\sum_{p=0}^P bed_{t,p} \cdot v_{t,l,p}} \right] \cdot \frac{sb_{t,l}}{tz_{t,l}} \quad \text{F 53}$$

Da der Wechsel zwischen Mix- und Solitärproduktion auch auf produktflexiblen Linien zusätzlichen Anpassungskosten verursacht, wird eine Statusvariable eingeführt. Sie gibt an, ob in der Vorperiode im Mix- oder Solitärbetrieb gefertigt wurde. Bei Wechsel der Statusvariable entstehen Anpassungskosten, die den Planungs- und Rüstaufwand beinhalten.

Gelten für Anpassungszustände Randbedingungen, die die Kombinationsmöglichkeiten der Zustandsvariablen betreffen, so können diese für die Zustandsreduktion genutzt werden. Beispielsweise sollen die Schichten für alle Linien des Standorts zum gleichen Zeitpunkt beginnen und enden, um Fahrgemeinschaften zu ermöglichen. Die freie Wahl der Schicht- und Pausenmodelle ist dann nicht mehr möglich. Diese und ähnliche Nebenbedingungen erlauben den Verzicht auf linien-, schicht- oder produktspezifische Indizes, wodurch die Anzahl der Zustandsvariablen eingeschränkt wird. Der Zustandsraum kann stark verkleinert werden, da die Anzahl der Linien und Produkte exponentiell in die Zustandsanzahl eingeht.

Weitere Randbedingungen können sein, dass im Vorfeld kombinierte Schicht-Pausen-Modelle mit dem Betriebsrat verhandelt wurden. In diesem Fall reicht die Betrachtung nur einer Zustandsvariablen „Schichtmodell“ aus, und es muss nicht über die Kombinatorik der Zustandsvariablen „Pausenproduktion“ und „Betriebsnutzungszeit“ iteriert werden.

Des Weiteren können Zustände auf Basis von Erfahrungswerten ausgeschlossen werden. Beispielsweise können alle Zustände mit einer zu geringen kapazitiven Auslastung ausgeschlossen werden. Ein Drei-Schicht-Betrieb mit einem Freischichtanteil von über 67 Prozent und damit einer Auslastung von 33 Prozent wäre z. B. nicht mehr möglich, wenn ein Ein-Schicht-Betrieb genutzt werden könnte. Je geringer der Wert der minimalen Auslastung, desto weniger Zustände werden betrachtet.

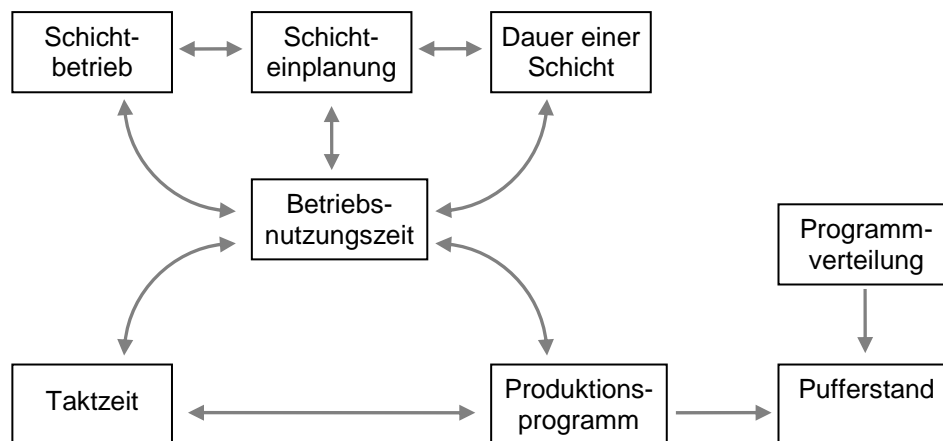


Abbildung 25: Bei der Komplexitätsreduktion zu berücksichtigende Abhängigkeiten der Zustandsvariablen

Abbildung 25 zeigt weitere Abhängigkeiten zwischen den auslastungsrelevanten Zustandsvariablen. Beispielsweise ist mit den Zustandsvariablen Betriebsnutzungszeit und Taktzeit bei gegebener Verfügbarkeit die Kapazität der Linie festgelegt. Aus der Differenz zwischen Bedarf, Produktionsprogramm und Programmverteilung lässt sich der Pufferstand und damit die Programmverschiebung in vor- und nachgelagerte Perioden ableiten. Eine weitere Zustandsreduktion kann unter der Annahme durchgeführt werden, dass einzelne Schichten voll auszulasten sind. In diesem Fall lässt sich die Anzahl der Schichten aus der geforderten Betriebsnutzungszeit und der durch die Schichtmodelle gegebenen Dauer einer Schicht herleiten.

Als weitere Möglichkeit soll die Diskretisierung der Zustands- und Statusvariablen angesprochen werden. Sie ist als Grundprinzip der dynamischen Programmierung anzusehen, sollte



jedoch zielgerichtet auf die Automobilmontage angewandt werden. Beispielsweise werden Betriebsruhen tendenziell wochenweise in den Sommermonaten stattfinden. Eine Konzentration auf diesen Zeitraum und eine Diskretisierung auf Wochenebene reicht demzufolge aus.

### **Komplexitätsreduktion durch Entscheidungsreduktion**

In ihrer Reinform untersucht die dynamische Programmierung alle möglichen Anpassungspfade durch den Lösungsraum. Dies beinhaltet die volle Kombinatorik der Anpassungszustände zwischen zwei Perioden. Hier setzt die Entscheidungsreduktion an. Im Gegensatz zur Zustandsreduktion reduziert sie die Anzahl möglicher Entscheidungen zwischen zwei Perioden, indem bestimmte Zustandswechsel per Definition ausgeschlossen werden: Das Entscheidungsverhalten der Planer zwischen Perioden wird durch Nebenbedingungen integriert. Hieraus ergeben sich unter anderem die folgenden Möglichkeiten der Komplexitätsreduktion:

- Maximale Qualifizierungskapazitäten für Arbeitskräfte erlauben nur eine maximale Anzahl von Einstellungen pro Periode. Zustandswechsel, die eine höhere Arbeitskräfte-Differenz aufweisen, werden nicht betrachtet.
- Ist aus politischer Sicht in bestimmten Perioden keine Mitarbeiterreduktion möglich, so können Zustandswechsel mit negativer Arbeitskräfte-Differenz ausgeschlossen werden.
- Im Anlauf kann davon ausgegangen werden, dass die Taktzeit nicht erhöht wird. Dies liegt darin begründet, dass mit steigender Mitarbeiterqualifikation die Kapazität gesteigert werden muss. Zustandswechsel, die zu einer Taktzeiterhöhung führen, können demzufolge vernachlässigt werden.
- Das Überspringen einer Schichtgruppe beim Schichtgruppenwechsel, beispielsweise der Wechsel vom Ein- in den Drei-Schicht-Betrieb, wird in der Praxis kaum vorkommen. Alle Zustandswechsel, deren Schichtgruppendifferenz größer eins ist, haben demzufolge keine Relevanz.

### **Komplexitätsreduktion durch Dekomposition**

Eine weitere Komplexitätsreduktion kann erreicht werden, wenn das Problem in mehrere Teilprobleme zerlegt wird. Dieses Vorgehen baut darauf auf, dass die Problemkomplexität bei einer steigenden Anzahl von Entscheidungsvariablen in einem Modell exponentiell zunimmt, während sie sich bei der Einzelbetrachtung von Entscheidungsvariablen lediglich aufsummiert. Die Lösung der Teilprobleme kann parallel oder iterativ nach bestimmten Regelwerken erfolgen.

Beispielsweise ist es möglich, Montagelinien in einem ersten Schritt einzeln zu optimieren. In einem zweiten Schritt können die Ergebnisse in Abhängigkeit der Einzelergebnisse aufeinander abgestimmt werden. Um annähernd kostenoptimale Lösungen für das gesamte Montagesystem zu erhalten, müssen die Zusammenhänge zwischen den Linien betrachtet werden. Neben der Möglichkeit der Programmverteilung bei Produktflexibilität ist die Verschiebung von Arbeitskräften zwischen Linien zu nennen. Eine Optimierung mehrerer Szenarien mit verschiedenen Programmverteilungen und AK-Verschiebungen ist unter Umständen wesentlich schneller durchzuführen als eine integrierte Betrachtung mehrerer Linien. Ein Ansatzpunkt ist beispielsweise die Optimierung der Einzellinien unter der Annahme, dass die Arbeitskräfte vollständig flexibel sind. Anschließend können die Arbeitskräfte-Bedarfe der Linien addiert werden. Arbeitskräfte-Spitzen werden somit transparent. Sie können nun über die Programmverschiebung, -verteilung oder eine Verschiebungen der Arbeitskräfte zwischen den Linien annähernd kostenoptimal gesenkt werden.

Mit den dargelegten drei Ansätzen ist eine zielgerichtete Reduktion der Problemkomplexität auf ein akzeptables Niveau zu erreichen. Ihre Anwendung ist jeweils für die einzelnen Problemstellungen zu untersuchen. Wesentliche Entscheidungskriterien für die richtige Wahl der Komplexitätsreduktion stellen die Kostenstruktur und die Flexibilitätsstrategie selbst dar. Die Untersuchung einer Solitärstrategie mit  $m$  Produkten und  $m$  Linien erlaubt beispielsweise eine einfache Zerlegung des Problems in  $m$  1-Linien-Modelle. In einem zweiten Schritt können dann die Arbeitskräfte-Verschiebungen zwischen den Linien betrachtet werden.

### **5.3 Umsetzung eines Planungswerkzeugs**

Aufbauend auf dem identifizierten Handlungsbedarf in Kapitel 3.3 wurden die für eine hierarchische Planung erforderlichen Modelle und Methoden theoretisch erarbeitet. In diesem Kapitel werden darauf aufbauende und im Rahmen der Dissertation umgesetzte Planungswerkzeuge vorgestellt. Nach einer Übersicht über die Planungsmodule und ihre Nutzung wird die Architektur des „Lifecycle Adaptation Planners“ (LAP) und des darin implementierten Optimierungsalgorithmus beschrieben. Anschließend wird eine Analyse der Rechenzeiten durchgeführt.

#### **5.3.1 Übersicht über die Planungsmodule und ihre Nutzung**

Die softwaretechnische Umsetzung der Methoden ist in drei Module untergliedert: Das *Szenariomodul* zur Generierung der Flexibilitätsbedarfs-Szenarien, der *Lifecycle Adaptation*

*Planner* (LAP) zur Beschreibung des Flexibilitätsangebots und zur Antizipation der Flexibilitätsnutzung sowie das *Auswertungsmodul* zur Bewertung der alternativen Flexibilitätsstrategien. Die drei Module sind in Abbildung 26 abgebildet.

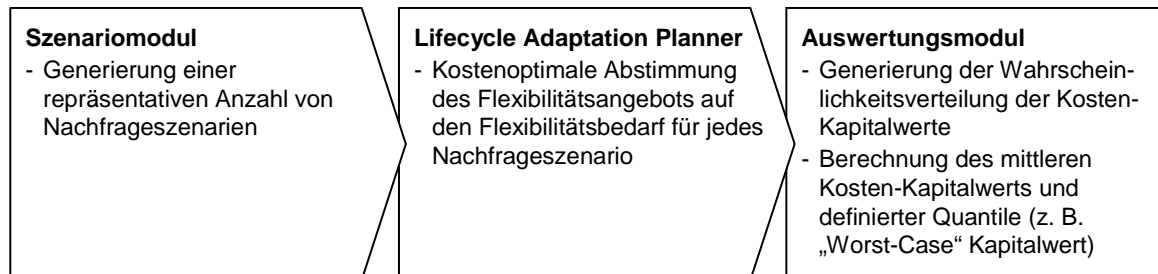


Abbildung 26: Übersicht über die Planungsmodule

### Szenariomodul

Im Szenariomodul wird zur Modellierung des Flexibilitätsbedarfs auf eine existierende Planungssoftware der DaimlerChrysler Produktionsforschung zurückgegriffen. Diese generiert auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation eine festzulegende Anzahl deterministischer Nachfrageszenarien. Grundlage der Monte-Carlo-Simulation ist ein Wahrscheinlichkeitsbaum, dessen Knoten Ereignisse und daraus resultierende Nachfrageentwicklungen über der Zeit repräsentieren. Die Kanten des Baums sind hierfür mit Wahrscheinlichkeiten hinterlegt, die die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ereignisse festlegen. Eine ausreichende Anzahl von über die Monte-Carlo-Simulation erstellten Nachfrageszenarien hat bezüglich der Unsicherheit zukünftiger Nachfrageschwankungen einen repräsentativen Charakter.

Der Fokus des Szenariomoduls liegt auf der Modellierung von Stückzahlschwankungen. Diese sind zum einen mit einer hohen Unsicherheit belegt, zum anderen bestimmen sie wesentlich die Auslastung der Montagekapazitäten. Auch sich verändernde Produkte können als Flexibilitätsbedarf modelliert werden. Beispielsweise haben verstärkt nachgefragte Ausstattungspakete Einfluss auf die Montagezeit und damit auf den Arbeitskräftebedarf. Durch die Möglichkeit, Produktänderungen und Stückzahlverläufe zu hinterlegen, können beide Faktoren in Abhängigkeit voneinander dargestellt werden. Z. B. führt eine Erweiterung der Serienausstattung zu einer höheren Nachfrage.

### Lifecycle Adaptation Planner (LAP)

Das zentrale im Rahmen der Arbeit entwickelte Planungswerkzeug ist der LAP. Er integriert das Montage-, das Lernkurven- und das Optimierungsmodell. Für jeweils ein Nachfrageszenario des Szenariomoduls ermöglicht er die dynamische Antizipation der Flexibilitäts-

nutzung. Als Ergebnis werden die zu erwartenden Montage-Betriebskosten und der daraus resultierende Kosten-Kapitalwert ausgegeben.

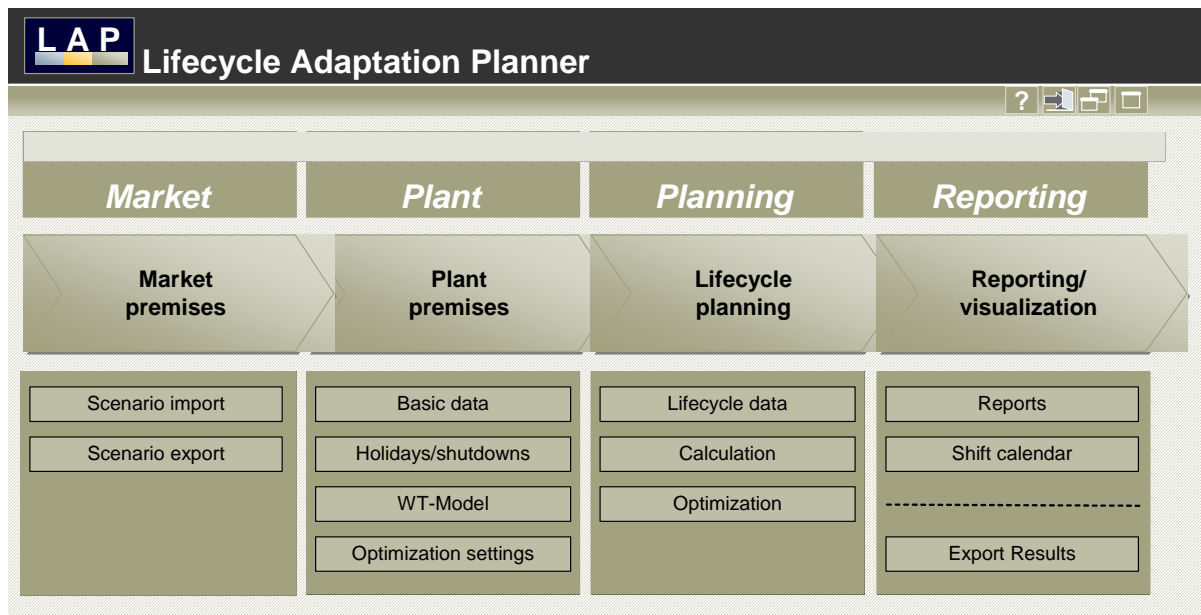


Abbildung 27: Stufenweise Navigation im LAP

Der Planer steuert die Funktionalitäten des LAP über eine Excel-Benutzeroberfläche. Diese führen ihn in vier Schritten durch die Planung. Für jeden Schritt sind Tabellenblätter hinterlegt. Der Planer kann zwischen den einzelnen Bereichen navigieren, indem er die vorgesehenen Navigationsleisten nutzt (vgl. Abbildung 27). In einem ersten Schritt wird ein Nachfrageszenario aus dem Szenariomodul eingeladen. Dieser Vorgang wird vom LAP unterstützt, indem die Zeitskalen der Szenarien aufeinander abgestimmt werden. Im zweiten Schritt werden die Stammdaten hinterlegt. Sie beschreiben die standort- und montage-spezifischen Prämissen und beinhalten die im Montagemodell in Kapitel 4 vorgestellten Eingangsgrößen. Ausschnitte aus den Tabellenblättern für ihre Eingabe zeigt Abbildung 28. Exemplarisch seien genannt:

- Anpassungskosten, die bei Wechsel der Entscheidungsvariablen anfallen
- Löhne, Schicht- und Überstundenzuschlagssätze für das Personal
- Technisch und organisatorisch vorgegebene Taktzeitgrenzen pro Linie
- Rahmenbedingungen des Arbeitszeitkontos und der Überstundenauszahlung
- Lernkurven der Montagezeit, der Verfügbarkeit und des Taktausgleichsverlusts
- Variablen Kosten, z. B. zur Hinterlegung von Kilometerzuschlägen pro Mitarbeiter und Schicht oder von Energiekosten pro Schicht

LAP Lifecycle Adaptation Planner		Basic data	Optimization data	WT-Models	Calendar/Holidays	Lifecycle data	Annual data	Reporting
<b>Notice: Do not change cell formats in this sheet!</b>								
<b>LAP</b>	<b>Version</b>							
Release	R.1							
Site	XX							
Version	V.12							
Date	06.07.2005							
<b>Costs</b>								
<b>Change costs</b>								
Cycle time change costs		Info Calculation						
Fix costs cycle-time change [Euro]		XX						
Var. costs cycle-time change [Euro/WK]		XX						
Minimum cycle-change when costs apply [min/Unit]		XX						
Shift model change costs (change)								
Fix costs shift model [Euro]		XX						
Var costs shift model [Euro/WK]		XX						
<b>Shift group change costs</b>								
Additional shift group (Fix costs when changing from 1 to 2 or 2 to 3 s)		XX						
Additional shift group (Var. costs when changing from 1 to 2 or 2 to 3 s)		XX						
Reduction of shift groups (Fix costs when changing from 3 to 2 or 2 to 1)		XX						
Reduction of shift groups (Var. costs when changing from 3 to 2 or 2 to 1)		XX						
<b>Working-time model change costs</b>								
Fix change costs working time model [€]		XX						
<b>Change costs amount of WK</b>								
Hiring a fix worker [€]		XX						
Hiring a flexible worker [€]		XX						
Dismissing a fix worker [€]		XX						
Dismissing a flexible worker [€]		XX						
<b>Other variable costs</b>								
per fix worker [Euro/period]		XX						
per flexible worker [Euro/period]		XX						
per planned shift [Euro/period]		XX						
per produced unit [Euro/period]		XX						
per worker per planned shift [Euro/period]		XX						
<b>Labour costs</b>								
<b>Annual wages</b>								
Tariff for a fixed worker in line [€/a]		XX						
Tariff for a fixed worker out line [€/a]		XX						
Tariff for a flexible worker in line [€/a]		XX						
<b>Hourly wages</b>								
Tariff for a fixed worker in line [€/h]		XX						
Tariff for a fixed worker out line [€/h]		XX						
Tariff for a flexible worker in line [€/h]		XX						
Shift and social allowances								

LAP Lifecycle Adaptation Planner		Basic data	Optimization data	WT-Models	Calendar/Holidays	Lifecycle data	Annual data	Reporting												
WTModel_050705																				
<b>1-Shift model</b>																				
Change	Operating time			Replacement worker for pause			Replacement worker for ind. fr			Working time										
	ES	AS	NS	ES	AS	NS	ES	AS	NS	WT ES	WT AS	WT NS	WT SaS	WT	Number of shifts	ATT ES	ATT AS	ATT NS	Nr SaS	Information
1	XX			0,00 h	0 min	0 min	0 min				XX				0	1				
2	XX			0,00 h	0 min	0 min	0 min				XX				0	1				
3	XX			0,00 h	0 min	0 min	0 min				XX				0	0				
4															0	0				
5															0	0				
6															0	0				
7															0	0				
8															0	0				
9															0	0				
10															0	0				
<b>2-shift model</b>																				
Gang	Operating time			Replacement worker for pause			Replacement worker for ind. fr			Working time										
	ES	AS	NS	ES	AS	NS	ES	AS	NS	WT ES	WT AS	WT NS	WT SaS	WT	Number of shifts	ATT ES	ATT AS	ATT NS	Nr SaS	Information
1	XX	XX		300	0,00 h	0 min	0 min	0 min	XX	XX					0	2				
2	XX	XX		300	0,00 h	0 min	0 min	0 min	XX	XX					0	2				
3	XX	XX		300	0,00 h	0 min	0 min	0 min	XX	XX					0	2				
4	XX	XX		300	0,00 h	0 min	0 min	0 min	XX	XX					0	2				
5															0	0				
6															0	0				
7															0	0				
8															0	0				
9															0	0				
10															0	0				
<b>3-shift model</b>																				
Gang	Operating time			Replacement worker for pause			Replacement worker for ind. fr			Working time										
	ES	AS	NS	ES	AS	NS	ES	AS	NS	WT ES	WT AS	WT NS	WT SaS	WT	Number of shifts	ATT ES	ATT AS	ATT NS	Nr SaS	Information
1	XX	XX	XX	300	0,00 h	0 min	0 min	0 min	XX	XX	XX				0	3				
2	XX	XX	XX	300	0,00 h	0 min	0 min	0 min	XX	XX	XX				0	3				
3	XX	XX	XX	300	0,00 h	0 min	0 min	0 min	XX	XX	XX				0	3				
4															0	0				
5															0	0				
6															0	0				
7															0	0				
8															0	0				
9															0	0				
10															0	0				

Abbildung 28: Ausschnitte aus den Eingabemasken für Kostensätze (oben) und Arbeitszeitmodelle (unten)

Um eine vereinfachte Eingabe der Arbeitszeitmodelle zu ermöglichen, stehen weitere Tabellenblätter zur Verfügung. In ihnen können die verschiedenen Schichtmodelle mit ihrer Betriebsnutzungszeit und Arbeitszeit zeilenweise angelegt werden. Die Eingaben werden jeweils schichtspezifisch durchgeführt und beinhalten die für durchgeführte Pausen und individuelle Freischichten benötigten zusätzlichen Arbeitskräfte.

**Funktions- und Navigationsleiste**

**Perioden (Betrachtungszeitraum)**

	1	2	3	....	T-1	T
Produkt	0	0	0	0	0	0
Produkt	0	0	0	0	0	0
Produkt	0	0	0	0	0	0
Produkt	0	0	0	0	0	0
= Sum	0	0	0	0	0	0

**Eingangsgrößen (Prämissen des Montagebetriebs)**

**Entscheidungsvariablen (Freiheitsgrade des Montagebetriebs)**

**Optimierungseinstellungen (Komplexitätsreduktion)**

**Abgeleitete Größen (Randbedingungen, Kosten)**

Plan saturday as workingday (yes = 1, no = 0) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0  
 Working-time model VTMo-d-L\_050705 VTMo-d-L\_050705 VTMo-d-L\_050705 VTMo-d-L\_050705 VTMo-d-L\_050705 VTMo-d-L\_050705 VTMo-d-L\_050705 VTMo-d-L\_050705 VTMo-d-L\_050705 VTMo-d-L\_050705 VTMo-d-L\_050705

**Scenario data: Calendar (loaded from sheet 'calendar')**

General data											
Sum of available regular working days (Mo-Fr)	20	20	21	21	19	22	21	23	22	20	
Number of holiday shutdowns on regular working days	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Number of shutdowns on regular working days	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Sum of available real working days (Mo-Fr)	16	20	21	21	19	22	21	23	22	19	
<b>Working- and saturdays (Considering shutdowns and holidays) ES + AS</b>											
Number of available Mo	4	4	3	4	4	4	4	5	4	3	
Number of available Tu	3	4	5	4	5	4	4	5	4	4	
Number of available Wed	3	4	5	4	4	5	4	5	4	4	

Struktur   
  Zu optimierende Variablen   
 T Betrachtungszeitraum

Abbildung 29: Aufbau des zentralen Tabellenblatts zur Lebenszyklusplanung

Im dritten Schritt erfolgt die Planung und Antizipation des zukünftigen Montagebetriebs. Dem Planer steht dafür das zentrale Planungs-Tabellenblatt zur Verfügung (vgl. Abbildung 29). Von links nach rechts finden sich pro Spalte die Planungsperioden. Die Zeilen gliedern sich in verschiedene Bereiche: Im ersten Bereich werden die zeitdynamischen Eingangsgrößen aufgetragen. Im zweiten Bereich befinden sich die Entscheidungsvariablen des Montagebetriebs. Deren Möglichkeiten der Ausprägung und Diskretisierung werden im dritten Bereich, den Optimierungseinstellungen, vorgegeben. Darunter, im vierten Bereich, werden die aus Eingangsgrößen und Entscheidungsvariablen abgeleiteten Größen angegeben. Sie werden durch das Montagemodell berechnet und nach Excel exportiert. In ihm finden sich alle für die Bewertung eines gefundenen Anpassungspfads relevanten Daten: Dazu gehören u.a. das aktualisierte Produktionsprogramm, die Auslastung der Linie sowie die Schicht- und Arbeitskräftebedarfsplanung. Die letzten Zeilen des vierten Bereichs geben eine Übersicht über die anfallenden Anpassungs- und Periodenkosten.

Die Planung wird entweder automatisiert, teilautomatisiert oder manuell durchgeführt. Im Falle eines *automatisierten Planens* über die Funktion „Optimierung“ ermittelt der Optimierungsalgorithmus eine kostenoptimale Konfiguration der Entscheidungsvariablen über der Zeit. Vor Beginn der automatisierten Planung muss die Diskretisierung der Entscheidungs-

variablen in den Optimierungseinstellungen vorgegeben werden. Sollen schnell Ergebnisse erzielt werden, so kommt es auf eine restriktive Einschränkung der Entscheidungsvariablen zur Komplexitätsreduktion an. Andererseits dürfen keine sinnvollen Lösungen ausgeschlossen werden. Bei einer *teilautomatisierten Planung* kann der Nutzer über die Optimierungseinstellungen zusätzliche Randbedingungen vorgeben, die der Optimierungsalgorithmus berücksichtigt. Beispielsweise soll die Taktzeit über mehrere Jahre vorgegeben werden. Diese Vorgabe führt dazu, dass der Algorithmus nur die verbleibenden Entscheidungsvariablen optimiert. Im Falle der *manuelle Planung* werden die Auswirkungen der vom Planer über der Zeit vorgegebenen Entscheidungsvariablen berechnet. Der Prozess wird angestoßen über die Funktion „Berechnung“, und es findet keine Optimierung statt. Die hohe Komplexität der Planungsaufgabe führt für jede Art der Planung dazu, dass Expertenwissen zur Nutzung des LAP zwingend erforderlich ist. Qualitativ hochwertige Ergebnisse können mit geringem Zeitaufwand erzielt werden, wenn eine iterative Steigerung des Detaillierungsgrads der Entscheidungsvariablen durchgeführt wird.

Der vierte Schritt erlaubt schließlich die Validierung der Ergebnisse. Dafür werden die vom LAP errechneten Betriebsstrategien grafisch aufbereitet. Sie beschreiben den jeweils kostenoptimalen Produktionsbetrieb für jedes Nachfrageszenario über der Zeit (vgl. Abschnitt 6.2).

### **Auswertungsmodul**

Das Auswertungsmodul erlaubt einen monetären Vergleich der Flexibilitätsstrategien, indem relevante Ergebnisgrößen dargestellt werden. Hierfür wird für jede Flexibilitätsstrategie der mittlere und ein definierter „Worst-Case“-Kosten-Kapitalwert in einer Matrix aufgetragen (vgl. Abbildung 30). Zur Berechnung der Werte wird für jedes Nachfrageszenario der Kosten-Kapitalwert mit seiner Eintrittswahrscheinlichkeit aus dem LAP importiert. Auf dieser Basis wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kosten-Kapitalwerte erzeugt. Sie erlaubt die Ermittlung des mittleren gewichteten Kosten-Kapitalwerts und definierter Quantile. Dabei repräsentieren die Quantile monetäre Chancen und Risiken der Flexibilitätsstrategien und ermöglichen ein Risikomanagement für das Montagesystems.

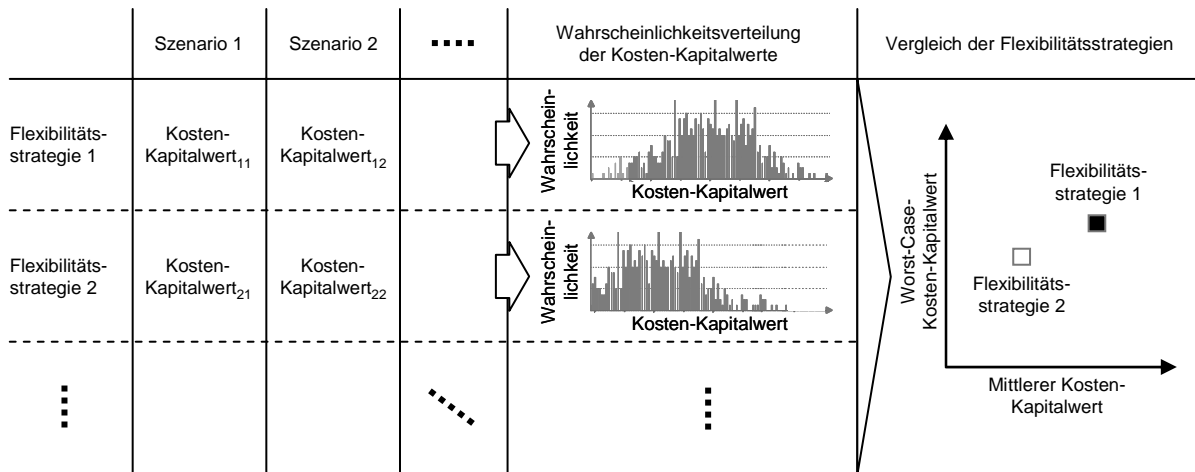


Abbildung 30: Bewertung der Flexibilitätsstrategien über den mittleren und über den „Worst-Case“-Kosten-Kapitalwert

### 5.3.2 Architektur des Lifecycle Adaptation Planners

Für die Umsetzung des LAP wurde ein modularer Aufbau gewählt. Dieser garantiert neben einer hohen Transparenz der Programmierung eine schnelle Anpassung an veränderte Gegebenheiten: Einzelmodule lassen sich einfacher austauschen und an neue Fragestellungen anpassen. Des Weiteren ist für eine Praxisnutzung die Anbindung an Datenbanken hilfreich. Sie wird durch die Umsetzung unterstützt.

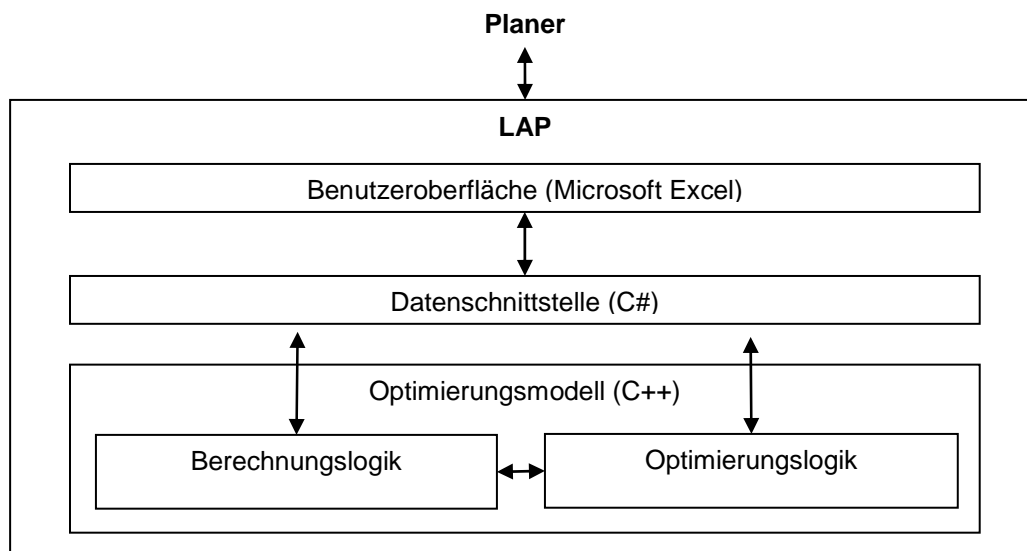


Abbildung 31: Architektur des „Lifecycle Adaptation Planners“ LAP

Die Funktionalitäten werden über eine grafische Excel-Benutzeroberfläche genutzt. Die Planer sind mit diesem Tabellenkalkulationsprogramm vertraut und haben die Möglichkeit, ohne Aufwand zusätzliche Daten und Auswertungen einzufügen. Außerdem findet man die Software Microsoft Excel in fast allen Automobilkonzernen als Standardwerkzeug vor. Der



beschriebene Optimierungsansatz wurde als zentrales Planungsinstrument eingebunden. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Rechengeschwindigkeiten im Kosten- und Optimierungsmodell wurde die Programmiersprache C++ verwendet. Über eine Datenschnittstelle in C# werden die Daten von der Benutzeroberfläche in die Berechnungs- und Optimierungslogik übertragen. Der Aufbau ist in Abbildung 31 dargestellt.

### 5.3.3 Aufbau der LAP-Optimierungsmodelle

Während sich der Aufbau der Benutzeroberflächen des LAP in erster Linie am Planungsablauf orientiert, steht beim Aufbau der Optimierungsmodelle die Effizienz der Algorithmen im Vordergrund. Im Folgenden werden zwei umgesetzte Algorithmen vorgestellt, die das Potenzial der Modelle repräsentieren und auf deren Basis die Rechenzeitanalysen in Abschnitt 5.3.4 basieren: Das Ein- und das Zwei-Linien-Modell.

Zustandsvariablen	Statusvariablen
Schichtbetrieb	Pufferstand
Taktzeit	Taktausgleich
Arbeits- und Betriebszeit (Schichtmodell)	Stand des Arbeitszeitkontos
Stamm-Arbeitskräfte	

Tabelle 6: Zustands- und Statusvariablen der Optimierung im Ein-Linien-Modell

Das Ein-Linien-Modell lässt sich aufgrund seiner Allgemeingültigkeit auf alle untersuchten Montagelinien bei beliebiger Produktanzahl anwenden. Es integriert die für eine Linie relevanten Entscheidungsvariablen und besitzt einen hohen Detaillierungsgrad. Optimiert werden die Entscheidungsvariablen Taktzeit, Schichtbetrieb, Betriebsnutzungszeit und Stamm-Arbeitskräfte. Nicht automatisch optimiert werden die Betriebsruhen, da deren Lage und Dauer nur wenig Spielraum lassen. Sie können vom Planer vorgegeben werden. Gleiches gilt im Ein-Linien-Modell für die Programmverteilung und die Arbeitskräfte-Verschiebung zwischen Montagelinien. Falls mehrere Ein-Linien-Modelle parallel für verschiedene Montagelinien eingesetzt werden, können sie vom Planer vorgegeben werden. Die Statusvariablen Pufferstand, Taktausgleich und Stand des Arbeitszeitkontos erlauben eine optimierte Glättung des Produktionsprogramms, die Ermittlung der optimalen Umtaktungszeitpunkte sowie eine optimale Nutzung des Arbeitszeitkontos. Eine Reduktion der Zustands- und Statusvariablen auf die in Tabelle 6 aufgelisteten Größen ist möglich, weil Ansätze der Komplexitätsreduktion aus Kapitel 5.2 umgesetzt wurden.

Zustandsvariablen	Statusvariablen
Taktzeit	Taktausgleich
Schichtbetrieb	Mixbetrieb
Arbeits- und Betriebszeit (Schichtmodell)	
Stamm-Arbeitskräfte	
Verschiebung von Arbeitskräften	

Tabelle 7: Optimierung im Zwei-Linien-Modell

Während der Fokus des ersten Modells auf der optimalen linieninternen Nutzung der Flexibilität liegt, erlaubt das Zwei-Linien-Modell die Bewertung der linienübergreifenden Flexibilität. Zwei Aspekte stehen dabei im Vordergrund: Erstens die optimale Nutzung der Routenflexibilität, die sich in einer optimalen Programmverteilung eines Produkts auf zwei produktflexible Montagelinien ausdrückt, und zweitens die optimale Verschiebung der Arbeitskräfte zwischen den Montagelinien. Zu diesem Zweck sind die in Tabelle 7 aufgezählten Zustands- und Statusvariablen umgesetzt. Aus Komplexitätsgründen wird auf die optimierte Glättung des Produktionsprogramms zwischen den Perioden und auf eine optimale Nutzung des Arbeitszeitkontos verzichtet. Wie in Kapitel 5.2 erläutert wird das Arbeitszeitkonto heuristisch geplant, indem zuerst eine Optimierung ohne Berücksichtigung des Arbeitszeitkontos erfolgt. Danach wird eine minimal erforderliche Arbeitskräfte-Anzahl einstellt, um Spitzen des Arbeitszeitkontos abzufangen.

```

Eingabe: T = AnzahlPerioden
t = 1
SOLANGE t <= T
  FÜR ALLE Zustände z in Periode t
    FALLS z ist gültig
      Berechne Betriebskosten bk(z) für z
      Berechne Gesamtkosten: gk(z,t) = gk(vorgänger(z),t-1) + bk(z)
      FÜR ALLE Nachfolgerzustände n von z in Periode t + 1
        FALLS n ist gültig
          Berechne Anpassungskosten ak(z,n) von z nach n
          FALLS gk(n,t+1) noch nicht berechnet
            gk(n,t+1) = gk(z,t) + ak(z,n)
          ANDERNFALLS gk(z,t) + ak(z,n) < gk(n,t+1)
            gk(n,t+1) = gk(z,t) + ak(z,n)
            vorgänger(n) = z
          ENDE FALLS
        ENDE FÜR ALLE
      ENDE FÜR ALLE
    ENDE FÜR ALLE
  t = t + 1
ENDE SOLANGE

```

Abbildung 32: Pseudocode zur Identifikation der kostenoptimalen Nachfolgerzustände

Sind die Zustand- und Statusvariablen des jeweiligen Modells definiert, so lässt sich durch die dynamische Programmierung ein optimaler Anpassungspfad durch den Lösungsraum

generieren. Die Umsetzung ist in Abbildung 32 als Pseudocode dargestellt. In einem ersten Schritt wird über die Perioden iteriert. Für alle gültigen Anpassungszustände einer Periode werden die Gesamtkosten ermittelt, indem die Gesamtkosten des Vorgängerzustands, die Betriebskosten des Zustands sowie die Anpassungskosten zum günstigsten Nachfolgerzustand aufaddiert werden. Der günstigste Nachfolgerzustand wird jeweils für den nächsten Iterationsschritt zwischengespeichert. In jedem Iterationsschritt wird die Gültigkeit der Anpassungszustände geprüft. Diese periodenbezogene Gültigkeitsprüfung steigert die Effizienz des Algorithmus durch Reduktion der Zustände und Anpassungspfade. Definiert sind jeweils Nebenbedingungen bezüglich der Auslastung der Produktionskapazitäten, der Arbeitskräftebedarfe und der maximal möglichen Programmverschiebung.

```
FÜR ALLE Gültigen Zustände  $z$  in Periode  $t = T$ 
  FALLS  $min$  noch nicht definiert
     $min = z$ 
  ANDERNFALLS  $gk(z, t) < gk(min, t)$ 
     $min = z$ 
  ENDE FALLS
ENDE FÜR ALLE
 $OptimaleStrategie(T) = min$ 
 $t = T - 1$ 
SOLANGE  $t > 0$ 
   $OptimaleStrategie(t) = vorgänger(OptimaleStrategie(t+1))$ 
   $t = t - 1$ 
ENDE SOLANGE
```

Abbildung 33: Pseudocode zur Identifikation des kostenoptimalen Anpassungspfads

Sind alle Perioden durchlaufen, so sind für jeden Zustand die Gesamtkosten sowie der günstigste Vorgängerzustand gefunden (vgl. Abbildung 33). Es gilt für die letzte Periode, dass der Zustand mit den günstigsten Gesamtkosten Teil der optimalen Gesamtstrategie ist. Ausgehend von diesem Zustand wird in einer Rückwärtsrechnung die optimale Strategie bestimmt, indem über die besten Vorgängerzustände bis zur ersten Periode iteriert wird.

Aus bereits erläuterten Effizienzgründen wurde auf eine allgemeingültige prototypische Lösung für mehrere Linien und Produkte verzichtet. Falls keine vorhandenen Modelle verwendet werden können, führt der Programmierer die Konfiguration der Modelle und Algorithmen für ein spezifisches Produktionssystem durch. Für eine zukünftige Softwarelösung ist eine automatisierte Konfiguration über die Benutzeroberfläche denkbar: Der Planer gibt die Anzahl der Linien und Produkte sowie die Produktflexibilität der Linien vor. Darauf aufbauend werden die Module entsprechend kombiniert und angepasst.

### 5.3.4 Analyse der Rechenzeit

Die Rechenzeit der Optimierungsalgorithmen wird in erster Linie festgelegt durch die Anzahl der Anpassungsentscheidungen zwischen den Perioden und steigt annähernd linear mit der Anzahl der Perioden. Theoretisch errechnet sich die Anzahl der möglichen Zustandswechsel zwischen zwei Perioden aus der Multiplikation der Zustände beider Perioden. Praktisch wird sie durch die Nebenbedingungen und Ansätze zur Komplexitätsreduktion reduziert (vgl. Kapitel 4.1.4 und 5.2.2). Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung 34 oben auf, in der die real durchgeführten Anpassungsentscheidungen über der Anzahl der theoretisch möglichen Anpassungsentscheidungen aufgetragen sind. Die Reduktion der Anpassungsentscheidungen liegt für die untersuchten Fragestellungen in der Größenordnung  $10^3$  und resultiert aus einem Verhältnis gültiger zu ungültiger Zustände pro Periode von 10 Prozent.

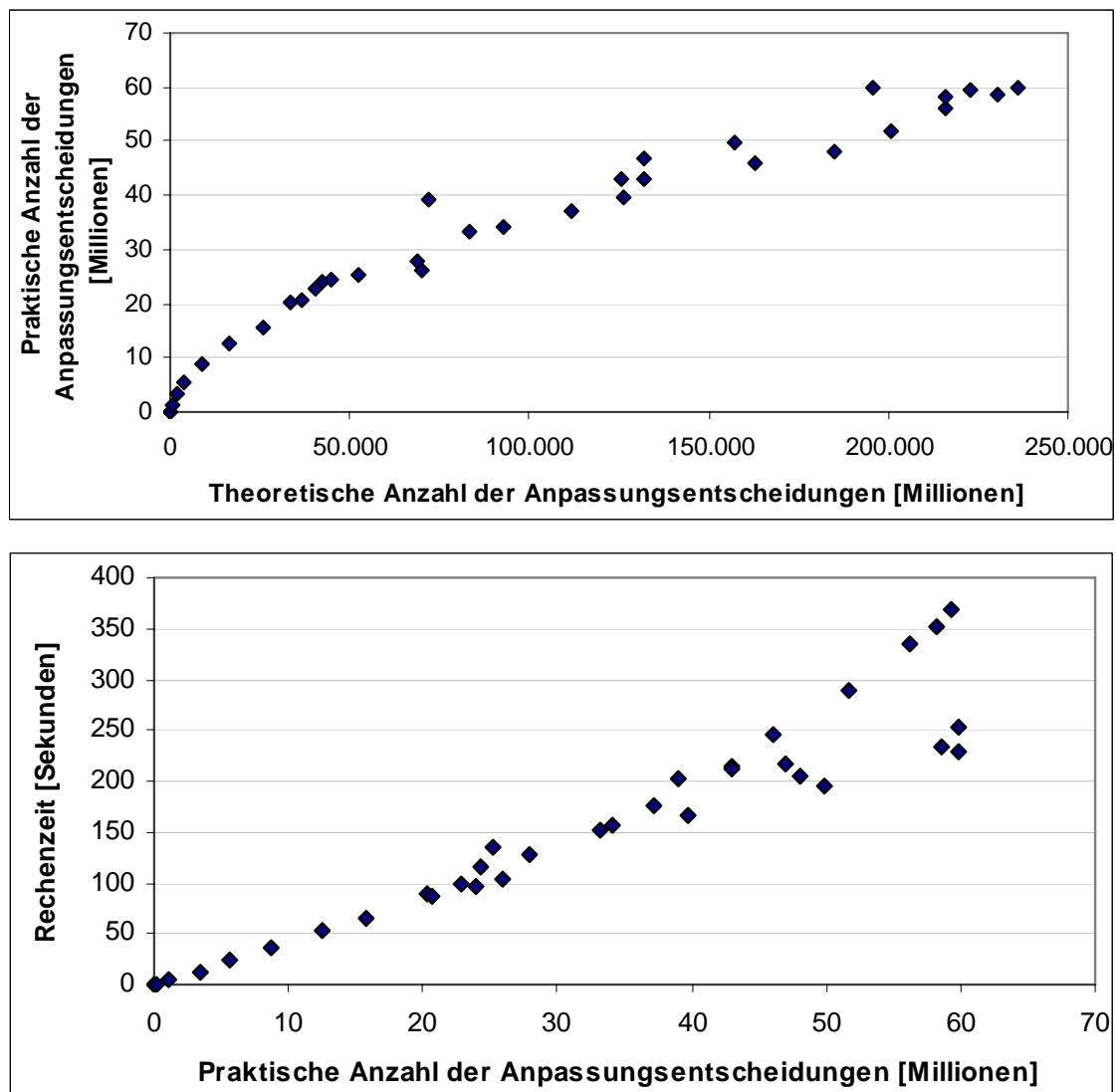


Abbildung 34: Ableitung der erforderlichen Rechenzeit in Abhängigkeit der zu realisierenden Anpassungsentscheidungen

Die erforderliche Rechenzeit ist in Abbildung 34 unten über der Anzahl der durchgeführten Anpassungsentscheidungen aufgetragen. Beispielsweise beträgt die Rechenzeit für 34 Millionen durchgeführte Anpassungsentscheidungen 160 Sekunden<sup>27</sup>. Wird für die Praxis davon ausgegangen, dass die Rechenzeit zwischen zwei Perioden 200 Sekunden nicht überschreiten soll, so kann rückwärts die Anzahl der theoretisch möglichen Zustände und damit der erforderliche Aggregationsgrad ermittelt werden. Es ergibt sich eine Zahl von 42 Millionen praktischer und 135 Milliarden theoretische Anpassungsentscheidungen. Demzufolge können 370.000 Zuständen pro Periode betrachtet werden. Dies entspricht rechnerisch jeweils 8,5 Variablenausprägungen für sechs Entscheidungsvariablen pro Periode. Damit können beispielsweise im Ein-Linien-Modell folgende Entscheidungsvariablen vorgegeben werden: Ein- oder Zweischichtbetrieb mit jeweils 5 Schichtmodellen, 11 verschiedene Taktzeiten und 15 Arbeitskräfte-Entwicklungen. Also verbleiben für die Statusvariablen 5 Pufferstände, 3 Zeitpunkte der letzten Umtaktung und 6 Intervalle für das Arbeitszeitkonto. In der Praxis durchgeführte Planungsläufe führen zu sehr guten Planungsergebnissen.

---

<sup>27</sup> Die Rechenzeitanalysen wurden auf einem Intel Xeon CPU 3,6 GHz mit 3 GB Arbeitsspeicher durchgeführt.

## 6 Anwendung der Methode

In den vorangehenden Kapiteln wurde die Notwendigkeit einer antizipativen und dynamischen Planung von Flexibilitätsstrategien durch die strategische Montageplanung aufgezeigt. Die bei existierenden Planungsansätzen vorhandenen Defizite wurden beschrieben, um den Anforderungen gerechte Modelle und Methoden zu entwickeln: Neben dem Modell der Montage-Wirkzusammenhänge wurden das Lernkurven- und das Optimierungsmodell konzipiert. Sie erlauben eine Antizipation der entstehenden Betriebskosten, indem sie betriebliche Lernkurveneffekte und zukünftiges Entscheidungsverhalten prognostizieren. Als Planungswerkzeug wurde der Lifecycle Adaptation Planner (LAP) implementiert. Er wird in diesem Kapitel an einem Anwendungsfall mit vier alternativen Flexibilitätsstrategien validiert. Um den Anforderungen an die Vertraulichkeit der untersuchten realen Anwendungsfälle gerecht zu werden, sind die verwendeten Daten in ihrer Größenordnung verfälscht. Die Bewertung der Flexibilitätsstrategien bleibt dabei repräsentativ für die Automobilindustrie.

In Kapitel 6.1 wird der Anwendungsfall der strategischen Montageplanung mit seinen produkt-, markt- und standortspezifischen Rahmenbedingungen beschrieben. Die Ergebnisse der LAP-Planungsläufe werden anschließend in Kapitel 6.2 vorgestellt. Sie zeigen das Potenzial produktflexibler Strategien zur Kostensenkung in der Automobilindustrie auf. Schlussendlich wird in Kapitel 6.3 eine kritische Würdigung der Methode vorgenommen.

### 6.1 Beschreibung des Anwendungsfalls

Der Anwendungsfall bezieht sich auf die Planung der Montage-Flexibilitätsstrategie für vier Kompaktklasse-Fahrzeuge eines Premium-Herstellers. Produktionsstandort ist Deutschland. Die vier ausgearbeiteten Flexibilitätsstrategien unterscheiden sich bezüglich ihrer Linienanzahl und ihrer Volumen-, Produkt-, Routen- und Nachfolgefähigkeit. Im Folgenden wird zuerst das Produktionsprogramm aufgezeigt. Anschließend werden die standortspezifischen Rahmenbedingungen und die Flexibilitätsstrategien erläutert.

#### Produktionsprogramm

Am Standort sollen vier Kompaktklassefahrzeuge A1, A2, B und C produziert werden. Produkt A1 wird als fünftüriges Volumenprodukt im Frühjahr 2006 eingeführt. Abhängig von seinem Markterfolg soll ab Januar 2014 sein Nachfolger A2 produziert werden. Auf Basis der Baureihe A werden zwei Derivate B und C abgeleitet. Produkt B wird ebenfalls als fünftüriges Volumenprodukt positioniert, während Produkt C ein abgeleitetes dreitüriges Nischen-

produkt mit geringerer Stückzahl und Trendcharakter darstellt. Der Anlauf der Produkte B bzw. C folgt um ein bzw. drei Jahre versetzt nach Einführung von A1.

Die *Konstruktion* der Fahrzeuge setzt die Rahmenbedingungen für die Montage: Die Fahrzeuge haben gleiche Vorranggraphen und gleiche Karosserie-Aufnahmepunkte. Damit kann die gleiche Linienstruktur und Fördertechnik genutzt werden. Die Karosserien sind in konventioneller Stahl-Schalenbauweise konstruiert und werden in der Montage-Hauptlinie um ein Front-, Heck- und Dachmodule ergänzt. Auch das Cockpit, die Sitze, die Seiten- und die Rückwandtüren werden als Module verbaut. Aus ergonomischen Gründen müssen diese Arbeitsvorgänge teil- oder vollautomatisiert werden. Ebenfalls automatisiert werden müssen aus qualitativen Gründen die Klebprozesse für Front- und Heckscheibe.

Klassifizierung der Arbeitsvorgänge	Mengentheoretische Abgrenzung der Arbeitsvorgänge	Startwerte der Montagezeit in Minuten
Nicht-ähnliche Arbeitsvorgänge	$A1 \rightarrow B \rightarrow C$	500
	$B \rightarrow A1 \rightarrow C$	625
	$C \rightarrow A1 \rightarrow B$	750
Ähnliche Arbeitsvorgänge	$A1 + B \rightarrow C$	0
	$B + C \rightarrow A1$	20
	$A1 + C \rightarrow B$	0
	$A1 + B + C$	750
Nicht-ähnliche Arbeitsvorgänge des Nachfolgers	$A2 \rightarrow A1 \rightarrow B \rightarrow C$	375

Tabelle 8: Startwerte der Montagezeit-Lernkurven

Aufgrund des individuellen Charakters der vier Produkte unterscheiden sich die *Montagezeiten*. In Tabelle 8 sind die Startwerte der Montagezeit-Lernkurven hinterlegt. Um zukünftige Lernkurveneffekte prognostizieren zu können, wird zwischen ähnlichen und nicht-ähnlichen Arbeitsvorgängen unterschieden. Die Montagezeiten beinhalten alle am Standort durchzuführenden manuellen Montagevorgänge und sind doppelt so hoch wie die MTM<sup>28</sup>-Vorgabewerte für die Serienproduktion, die nach ca. 2 Monaten erreicht werden sollen. Der mit einem individuellen Lernen beginnende Lernprozess setzt sich nach diesen zwei Monaten im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses fort. Es wird von einem Lernkurvenfaktor von 0,96 ausgegangen. In Zeile 1 der Tabelle wird der Montagezeit-Startwert in Minuten für Produkt A1 dargestellt. Die in den 500 Minuten beinhalteten Arbeitsvorgänge sind nicht ähnlich mit Arbeitsvorgängen bei den Produkten B und C. Demzufolge wirkt der Lernkurven-

<sup>28</sup> Aus dem Englischen: Methods Time Measurement.

effekt nur über der Stückzahl von Produkt A1. Zeile 5 zeigt die Montagezeit ähnlicher Arbeitsvorgänge für die Produkte B und C auf. Lernkurveneffekte auf die 20 Minuten wirken sich somit über der Stückzahl der Produkte B und C aus. Ergänzend ist in Zeile 8 die erwartete Montagezeit für A2, den Nachfolger von Produkt A1, dargestellt. Der Anteil nicht-ähnlicher Arbeitsvorgänge von 500 Minuten bei A1 wird bei A2 auf 375 Minuten reduziert.

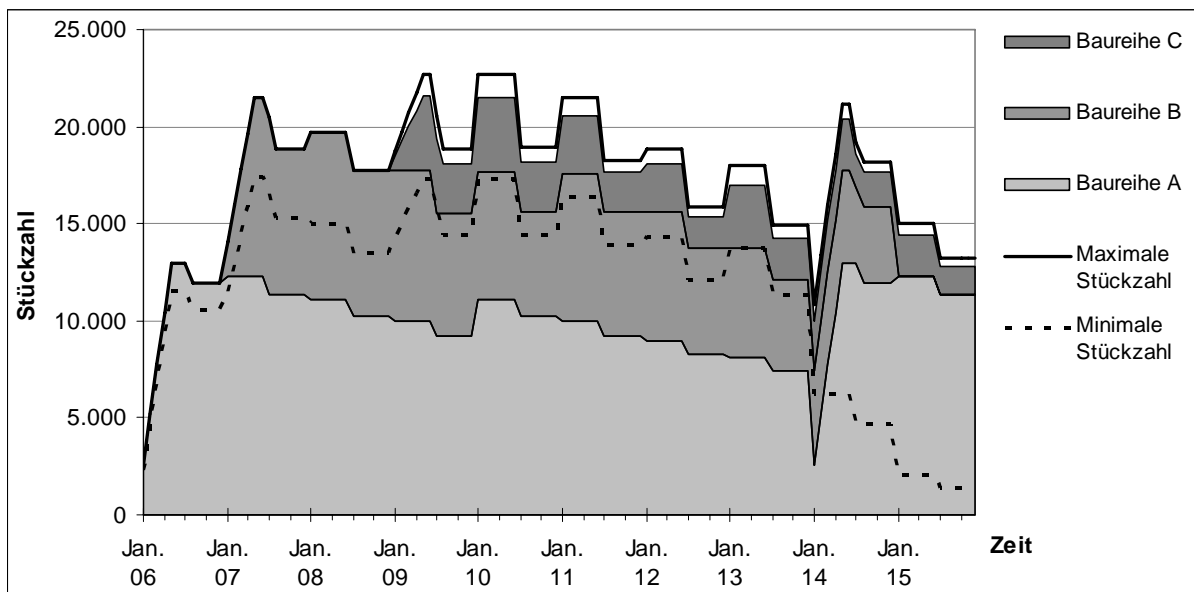


Abbildung 35: Prognostiziertes Nachfrageszenario sowie erwartete minimale und maximale Nachfrage

Die *prognostizierte Nachfrage* der drei Baureihen A, B und C ist in Abbildung 35 über der Zeit dargestellt. Die Kurven-Schwankungen sind bedingt durch Lebenszyklen, Saisonalitäten und Modellpflegen. Für Baureihe A wird eine Stückzahl von 124.690 Einheiten im ersten Produktionsjahr prognostiziert. Es wird angenommen, dass sich das Volumen jährlich um zehn Prozent reduziert. Im Jahr 2010 wird durch eine Modellpflege das Verkaufsvolumen auf 90 Prozent des ersten Verkaufsjahres angehoben. Die erwartete Saisonalität liegt bei einem Absatz von jeweils 52 Prozent des jeweiligen Jahresvolumens im ersten Halbjahr. Der Hochlauf der Baureihe wird über 4 Monate geplant. Die Stückzahl wird in diesem Zeitraum linear auf ein Maximalvolumen von 12.968 Einheiten pro Monat gesteigert. Für den Nachfolger A2, der im Jahr 2014 eingeführt wird, soll die gleiche Stückzahl wie für A1 erreicht werden.

Ähnliche Prämissen gelten für die Baureihen B und C, die einen ausgeprägteren Trendcharakter haben. Für Produkt B liegt die Saisonalität bei 55 Prozent im ersten Halbjahr, und im Lebenszyklus wird pro Jahr eine Reduktion von 15 Prozent angenommen. Für Produkt



C wird eine Saisonalität von 60 Prozent im ersten Halbjahr erwartet. Pro Jahr wird eine Stückzahlreduktion von 20 Prozent prognostiziert.

Die Nachfrage unterliegt einer in ihrer Größenordnung bekannten *Unsicherheit*, die über acht Nachfrageszenarien mit jeweiliger Eintrittswahrscheinlichkeit beschrieben wird<sup>29</sup>. In der Abbildung sind die minimale und maximale erwartete Stückzahl aller Produkte aufgezeigt. Der starke Rückgang der minimalen erwarteten Nachfrage ab Januar 2014 wird erwartet, wenn A2 aufgrund mangelnder Nachfrage nicht eingeführt wird. Dieser Fall wird in zwei der acht Nachfrageszenarien berücksichtigt und mit einer Gesamtwahrscheinlichkeit von 6,7 Prozent bewertet. Eine *Glättung des Produktionsprogramms* kann durch den Vertrieb erfolgen, wenn er gezielt mit Werbeaktionen auf den Markt einwirkt. Für die Baureihen ist mit dem Vertrieb eine maximale Verschiebung der Stückzahlen um zehn Prozent über der Zeit vereinbart. M. a. W. können zehn Prozent des monatlichen Produktionsvolumens einen Monat früher oder später als im Marktszenario beschrieben produziert werden.

### **Standortspezifische Rahmenbedingungen**

Der Standort gibt durch den Tarifvertrag, die verhandelten Löhne und Gehälter sowie die Personalflexibilität die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und die Reaktionsfähigkeit auf Nachfrage- und Montagezeitschwankungen wesentlich vor. Die im Anwendungsfall vorgegebene *Lohn- und Gehaltsstruktur* sowie der Urlaubsanspruch orientieren sich für befristete und unbefristete Mitarbeiter an der Tarifstruktur der Metallindustrie mit einer tariflichen Arbeitszeit von 35 Stunden pro Woche. Für die *Arbeitskräfte-Flexibilität* wird davon ausgegangen, dass am Standort ein maximaler Anteil befristeter Arbeitskräfte beschäftigt werden kann. Ein Prozentsatz von 30% darf nicht überschritten werden. Für jede Einstellungsmaßnahme fallen Kosten für die Personalplanung und Qualifizierung der Mitarbeiter an. Unbefristete Arbeitskräfte können nicht entlassen werden, sondern verlassen im Rahmen einer Fluktuation von 3 Prozent pro Jahr den Standort<sup>30</sup>.

Für die *Arbeitszeit-Flexibilität* gilt, dass die Linien in Ein- bis Drei-Schicht-Modellen betrieben werden können. Die Arbeitszeit pro Schicht variiert dabei zwischen 400 und 490 Minuten. Daraus resultieren nach Abzug der bezahlten Pausen Betriebsnutzungszeiten

---

<sup>29</sup> Die Anzahl der Szenarien ist nicht repräsentativ für die zukünftige Nachfrageentwicklung. Sie erlaubt jedoch eine Validierung der Methode.

<sup>30</sup> Um eine allgemeine Vergleichbarkeit der Flexibilitätsstrategien sicher zu stellen, sollen Arbeitskräfte-Abordnungen von und zu anderen Standorten nicht zugelassen werden.

zwischen 380 und 480 Minuten. Für Betriebsnutzungszeiten größer gleich 460 Minuten werden zusätzliche Mitarbeiter als Pausen-Ablöser erforderlich. Samstagsschichten sind nicht vorgesehen. Als Schichtzuschlagssätze werden für die Spätschicht 10 Prozent und für die Nachtschicht 20 Prozent berechnet. Überstunden werden nicht ausbezahlt, sondern über das Arbeitszeitkonto abgefangen. Der Korridor umfasst mit einer Untergrenze von minus 200 und einer Obergrenze von plus 200 Stunden eine Breite von 400 Stunden.

### **Flexibilitätsstrategien für die Montage**

Im Anwendungsfall werden vier Flexibilitätsstrategien als Handlungsalternativen der strategischen Montageplanung analysiert. Die Konzepte repräsentieren mit ihren Flexibilitätsarten einen wesentlichen Teil des zu untersuchenden Flexibilitätsspektrums. Sie sind mit ihrer jeweiligen Maximalkapazität bezüglich Taktzeit und Stationszahl ausgelegt auf das zu produzierende Produktionsprogramm. Die Berechnung der erforderlichen Kapazitäten basiert auf Ergebnissen des LAP, die im Vorfeld durchgeführt wurden. Die Konzepte sind in Abbildung 36 dargestellt.

Wesentliches Merkmal der Linienkonzepte sind die *Investitionssummen*. Das dreilinige Solitärkonzept K1 zeichnet sich durch eine geringe Stationszahl pro Linie und eine hohe Linieneffizienz aus. Die Montagelinien K1\_A und K1\_B für die Produkt A und B werden auf Zwei-Schicht-Betriebe ausgelegt und erfordern minimale Taktzeiten von 1,4 bzw. 2,1 Minuten. Das Nischenprodukt C wird aufgrund seiner geringen Stückzahl im 1-Schicht-Betrieb produziert. Die technische Kapazität der Linie K1\_C wird auf eine Taktzeit von 2 Minuten festgelegt. Die erforderliche Kapazität der Linie wurde auf Basis einer Vergleichsrechnung mit der LAP bestimmt, wonach die Produktion von Produkt C im Zwei-Schicht-Betrieb mit einer erforderlichen Taktzeit von 4 Minuten aufgrund der Schichtzuschlagssätze und der wegzzeitbedingt geringeren Linieneffizienz nicht wirtschaftlich ist.

Bei einer Basisinvestition von 20 Mio. Euro pro Linie und einem Kostensatz von 200.000 Euro pro Station fallen Investitionen in Höhe von 228 Mio. Euro an. Im gewichteten Mittel über die Nachfrageszenarien beläuft sich der Barwert der Investitionen auf 201 Millionen Euro. Dabei ist berücksichtigt, dass Investitionen zeitversetzt in 2007 und 2008 getätigt werden: Einerseits werden kapazitive Anpassung in Abhängigkeit des jeweiligen Nachfrageszenarios durchgeführt, da die Unsicherheit der Nachfrageentwicklung zu späteren Investitionszeitpunkten geringer ist. Zusätzlich werden die anfallenden Investitionen über einen kalkulatorischen Zinssatz von 10 Prozent abgezinst.

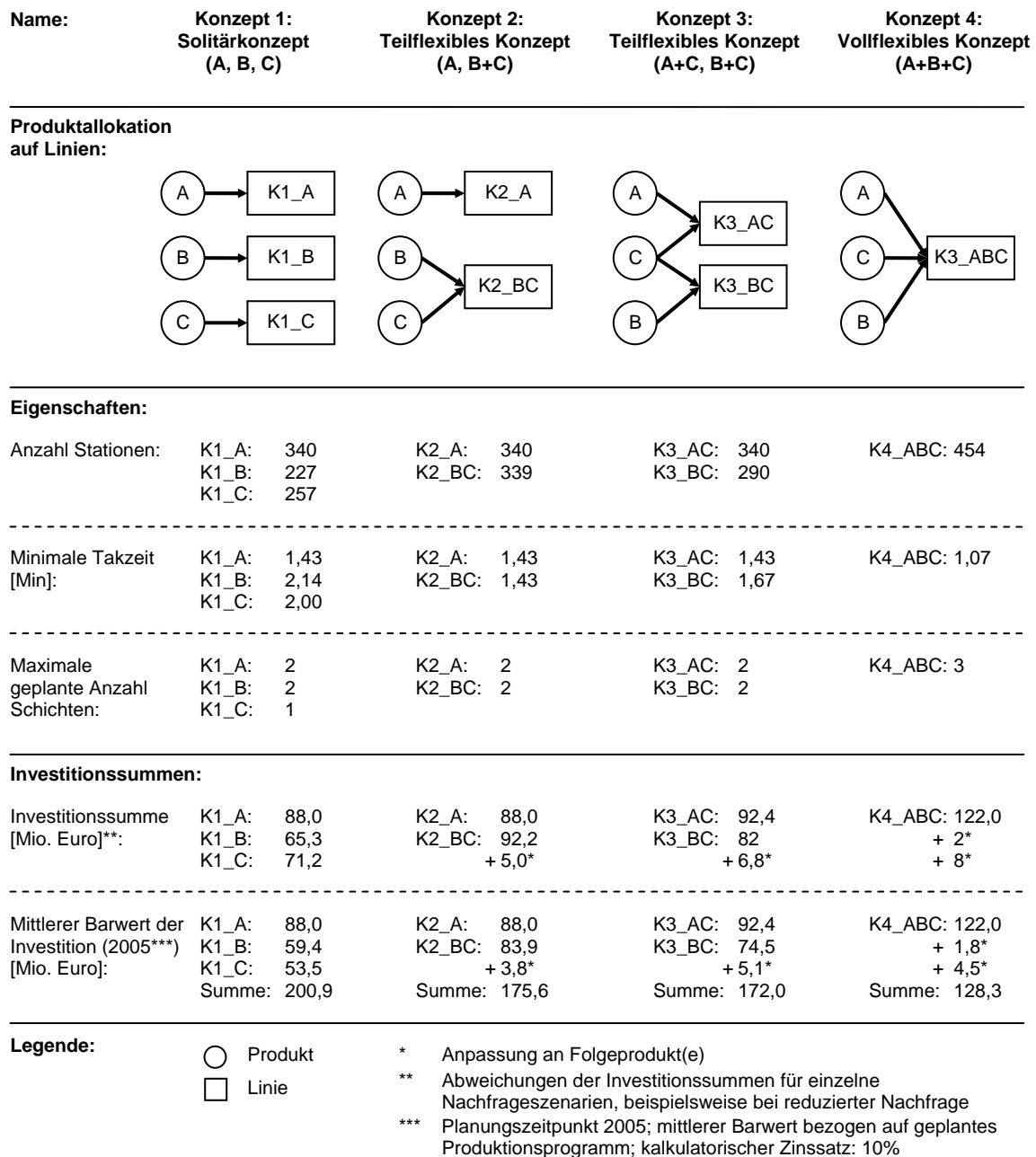


Abbildung 36: Beschreibung der Flexibilitätsstrategien

Für das teilflexible Konzept K2 sind zwei Produktionslinien geplant. Linie K2\_A entspricht der Montagelinie K1\_A. Auf ihr wird Produkt A in Solitärproduktion montiert. Auf Linie K2\_BC werden die Produkte B und C im Mix-Betrieb gefertigt. Es müssen 340 Stationen aufgebaut werden, um bei Nachfrageszenario 1 eine maximale durchschnittliche Montagezeit von 792 Minuten abfangen zu können. Die erforderliche minimale Taktzeit liegt bei 1,43 Minuten. Für Konzept 2 ist im Mittel über alle Nachfrageszenarien ein Barwert der Investitionen von 176 Millionen Euro erforderlich. Dabei beinhaltet die teilflexible Linie Zusatzinvestitionen von 5 Prozent im Vergleich zur Solitärlinie.

Konzept K3 ist ein auf Konzept K2 aufbauendes teilflexibles Produktionssystem. Grundidee ist, die erforderlichen Linienkapazitäten zu reduzieren, indem die Produktionslinie K3\_AC, die im Wesentlichen Produkt A solitär produziert, zusätzlich die Nachfragespitzen für Produkt C produziert. Die Produktflexibilität kann immer dann genutzt werden, wenn Linie L3\_BC die Stückzahlen nicht selbst kostengünstig liefern kann. Das „Spitzenbrecher“-Linienkonzept ermöglicht eine Reduktion der Stationszahl von L3\_BC um 49 Stationen. Gleichzeitig kann die Kapazität der Linie gesenkt werden, indem die minimal erforderliche Taktzeit auf 1,6 Minuten erhöht wird. Der gemittelte Barwert der Investitionssummen beläuft sich nach der Kapazitätsreduktion auf 164 Millionen Euro im Mittel über alle Nachfrageszenarien.

Basiert auf nur einer Produktionslinie repräsentiert Konzept K4 ein vollflexibles Montagesystem. Alle Produkte werden auf der Linie K4\_ABC montiert. Aufgrund der zeitversetzten Anläufe kann dauerhaft mit einer Taktzeit größer 1 Minute produziert werden. Dabei sind bei einer maximalen durchschnittlichen Montagezeit von 778 Minuten über alle Produkte 454 Stationen erforderlich. Die Grundinvestitionen von 20 Millionen Euro pro Linie sowie die stationsvariablen Investitionen in Höhe von 200.000 Euro erlauben bei dem einlinigen Produktionskonzept eine minimale Investitionssumme, obwohl ein 10-prozentiger Zuschlag für die volle Produktflexibilität berücksichtigt ist. Da die Investitionen im Jahr 2005 durchgeführt werden, sind weder Unsicherheiten noch Abzinsung zu beachten. Lediglich die Linienanpassungen in Höhe von 2 und 6 Millionen Euro für die Produkte B und C werden zeitversetzt getätigt und gehen mit ihrer Unsicherheit ein. Die resultierende Investitionssumme liegt bei lediglich 128 Millionen Euro. Damit ist das voll produktflexible Konzept 4 in Summe um 51 Millionen Euro günstiger als das dreilinige Solitärkonzept 1. Abgezinst auf das Jahr 2005 entspricht das einem Barwert von 27,4 Millionen Euro.

Im Falle der Einführung von Produkt A2 sind im Dezember 2013 *Umbaumaßnahmen* für die Linien K1\_A, K2\_A, K3\_AC und K4\_ABC erforderlich. Abhängig von der Produktflexibilität und damit der Linienkomplexität werden für Solitärlinien 2 Betriebsruhetage, für teilflexible Linien 3 Betriebsruhetage und für vollflexible Linien 5 Betriebsruhetage eingeplant, die zusätzlich zu den Weihnachtsbetriebsruhen zur Verfügung stehen. Zusätzlich fallen bei den Neuanläufen der Produkte B und C Anpassungskosten an. Sie beinhalten Umbaumaßnahmen der Linien und belaufen sich auf 2 bis 8 Millionen Euro in Abhängigkeit der jeweiligen Linienflexibilität.

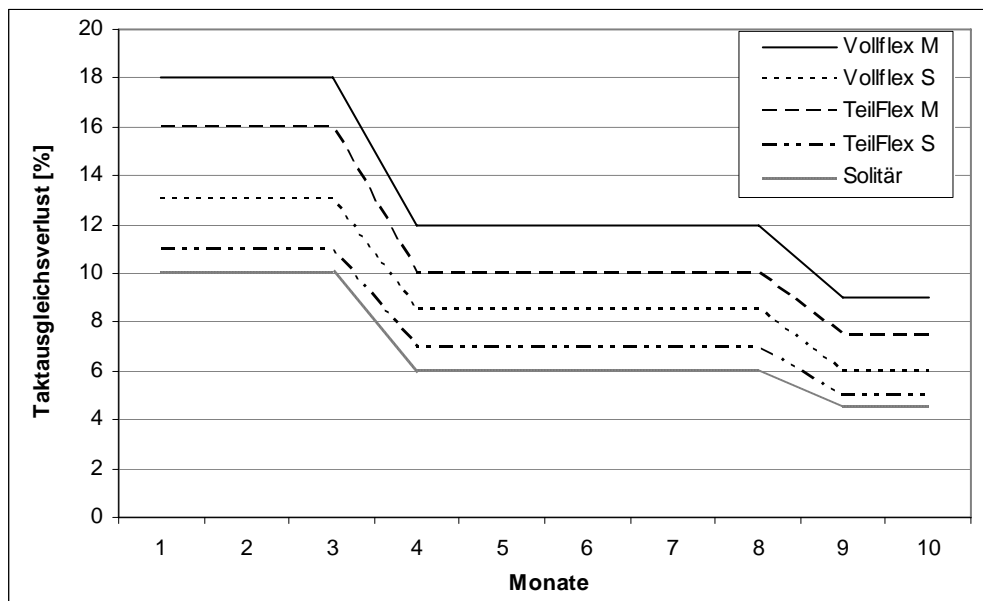


Abbildung 37: Taktgleichungsverluste der Linien im Solitär (S) und im Mix-Betrieb (M) über der Zeit

Neben den Investitionen charakterisiert die *Linieneffizienz* die Flexibilitätsstrategien. Sie wird über den Taktgleichungsverlust in Abbildung 37 beschrieben. Dieser liegt für die Solitärlinien mit minimalen Taktzeiten zwischen einer und 2,1 Minuten bei einem Zielwert von 4,5 Prozent. Die nach Umtaktungen auftretenden Lerneffekte schlagen sich nieder in Taktgleichungsverlusten von 10 Prozent über 3 Monate und 6 Prozent über weitere 5 Monate nach der Umtaktung. Die teilflexiblen Linien der Konzepte 2 und 3 können sowohl solitär als auch im Mix betrieben werden. In Abhängigkeit davon unterscheidet sich die Effizienz. Während im Solitärbetrieb ein Ziel-Taktgleichungsverlust von 5 Prozent erreicht wird, liegt er im Mixbetrieb bei 7,5 Prozent. Die entsprechenden Lernkurveneffekte sind ebenfalls stärker ausgeprägt. Die geringste Zieleffizienz weist die produktflexible Linien K4\_ABC auf. Während im Solitärbetrieb immerhin ein Ziel-Taktgleichungsverlust von 6 Prozent erreicht wird, so liegt er im Mix-Betrieb bei lediglich 9 Prozent. Der Lernkurveneffekt nach einer Umtaktung verläuft über einen Zeitraum von 8 Monaten stark ausgeprägt und beginnt bei 18 Prozent. Damit weist die voll produktflexible Linie höhere Lernkurveneffekte und Taktgleichungsverluste auf als die weniger flexiblen Linien. Dies gilt sowohl im Solitär- als auch im Mix-Betrieb.

Die direkten Arbeitskosten der Produktionslinien lassen sich durch *Automatisierung* von Arbeitsvorgängen senken. Für die vier Konzepte wird aus Gründen der Vergleichbarkeit von einem gleichen Automatisierungsgrad der Linien ausgegangen. Die Stationen sind infolgedessen nicht aus wirtschaftlichen, sondern lediglich aus den beschriebenen qualitativen und

ergonomischen Gründen teil- bzw. vollautomatisiert. Insbesondere an teilautomatisierten Stationen sind die von der Montage- und Taktzeit unabhängigen Arbeitskräfte mit in die Bewertung der Konzepte einzubeziehen. Da sie bei einer steigenden Taktzeit oder bei Lern-effekten kaum reduziert werden können, haben sie Einfluss auf die Linieneffizienz der Linie. Sie steigern in diesem Fall den Taktausgleichsverlust.

Monat(e) nach Anlauf	1	2	3	4
<b>Leerplattformen nach (Neu-)Anlauf-Produkt</b>				
Solitärlinie	1,5	0,0	0,0	0,0
Teilflexible Linie	1,7	0,0	0,0	0,0
Vollflexible Linie	1,8	0,0	0,0	0,0
<b>Linienverfügbarkeit nach Neuanlauf</b>				
Solitärlinie	73%	84%	95%	100%
Teilflexible Linie	70%	80%	90%	100%
Vollflexible Linie	70%	80%	90%	100%
<b>Linienverfügbarkeit nach Anlauf (bekanntes Produkt)</b>				
Teilflexible Linie	95%	100%	100%	100%
Vollflexible Linie	95%	100%	100%	100%
<b>Linienverfügbarkeit nach Anlauf Nachfolger</b>				
Solitärlinie	95%	100%	100%	100%
Teilflexible Linie	85%	95%	100%	100%
Vollflexible Linie	80%	90%	100%	100%

Tabelle 9: Verfügbarkeit nach Anläufen über der Zeit

Die Kapazitäten der Linien werden durch die *Anläufe* beeinträchtigt. Erstens sinkt die technische Verfügbarkeit der Anlagen, zweitens muss aus organisatorischen Gründen, um Bandstillstände zu vermeiden, die Plattformbelegung reduziert werden<sup>31</sup>. Diese Effekte sind in Tabelle 9 dargestellt. So werden bei Anläufen auf Solitärlinien im Mittel 1,5 Plattformen im Anlaufmonat nicht belegt, während bei der vollflexiblen Linie aufgrund der höheren Komplexität 1,8 Plattformen frei bleiben. Längerfristige Auswirkung auf die Kapazität hat die Linienverfügbarkeit nach Anläufen. Auf der Solitärlinie sinkt sie nach einem Neuanlauf auf 73 Prozent im Anlaufmonat, um dann über einen Zeitraum von zwei Monaten wieder auf 100% anzusteigen. Auf der vollflexiblen Linie wird eine Reduktion der Verfügbarkeit um 30% erwartet. Bei der Planung wird berücksichtigt, dass bekannte Produkte, die auf einer neuen Linie produziert werden, und Nachfolgeprodukte zu einer geringeren Senkung der Verfügbarkeit führen.

<sup>31</sup> Dies erfolgt im Rahmen der Anlaufstrategie

Art der Kosten	Montagelinien							
	K1_A	K1_B	K1_C	K2_A	K2_BC	K3_AC	K3_BC	K4_ABC
Fixe Kosten der Umtaktung [Euro]	107.473	75.785	82.671	107.473	169.615	170.017	145.240	227.220
Arbeitskräftevariable Kosten der Umtaktung [Euro]	200	200	200	200	220	220	220	250

Tabelle 10: Anpassungskosten bei Linienumtaktung

Neben den Umbaumaßnahmen für Neuprodukte führen die operativ-taktischen Anpassungen im Produktionsbetrieb zu *Anpassungskosten*. In Tabelle 10 sind die bei Taktzeitwechsel anfallenden Kosten dargestellt. Sie sind neben der Linienflexibilität abhängig von der Stationszahl und der Anzahl der Linienmitarbeiter. Demzufolge wird unterschieden zwischen fixen und arbeitskräftevariablen Anpassungskosten. Die fixen Anpassungskosten treten unabhängig von der Anzahl der aktuellen Linienmitarbeiter auf. Sie sind lediglich abhängig von der Flexibilität und Anzahl der Stationen. Die arbeitskräftevariablen Kosten beinhalten den Umbau der Arbeitsplätze sowie den Qualifizierungsaufwand pro Arbeitskraft. Für beide Größen gilt, dass mit einer steigenden Linienflexibilität die Anpassungskosten steigen. Während sich die fixen Kosten für die Solitärlinie mit 340 Stationen auf lediglich 107.000 Euro belaufen, fallen für die vollflexible Linie fixe Anpassungskosten in Höhe von 227.000 Euro bei 454 Stationen an. Die variablen Kosten pro Linienmitarbeiter liegen bei 200 Euro für Solitärlinien und bei 250 Euro für die voll produktflexible Linie.

Art der Anpassungskosten	Anpassungskosten in Euro
Kosten bei Anpassung des Schichtmodells	10.000
Fixe Kosten bei Anpassung der Schichtgruppen-Anzahl	100.000
Arbeitskräftevar. Kosten bei Anpassung der Schichtgruppen-Anzahl	100
Kosten bei Einstellung einer unbefristeten Arbeitskraft	200
Kosten bei Einstellung einer befristeten Arbeitskraft	130
Kosten bei Ende eines befristeten Arbeitsvertrags	100

Tabelle 11: Anpassungskosten bei Wechsel der Schichtmodelle und der Arbeitskräfte-Anzahl

Die Anpassungskosten bei Veränderung der Schichtmodelle und der Arbeitskräfte-Anzahl sind in Tabelle 11 dargestellt. Sie ergeben sich aus dem Planungsaufwand der Personalabteilungen und dem Aufwand für die Qualifikation der Mitarbeiter. Wie bei der Taktzeit-Anpassung wird auch hier unterschieden zwischen fixen und arbeitskräftevariablen Kosten.

## **6.2 Auswertung der Ergebnisse**

Aus Gründen der Komplexitätsreduktion wird zur Optimierung des Anwendungsfalls eine Dekomposition des Planungsproblems durchgeführt, so dass die LAP Ein-Linien-Modelle genutzt werden können (vgl. Abschnitt 5.2.2): Zuerst wird unter der Annahme, dass 100 Prozent der Arbeitskräfte befristet eingestellt sind, optimiert. Anschließend werden die Restriktionen der unbefristeten Arbeitskräfte iterativ hinzugefügt und, wenn technisch und organisatorisch möglich, Produktionsprogramm und Arbeitskräfte szenariobasiert zwischen den Montagelinien verschoben. Nach Eingabe der Eingangsgrößen in den LAP wird für jedes Nachfrageszenario die Flexibilitätsstrategie bewertet: Das Lernkurvenmodul zeigt die Entwicklung der Montagezeit pro Produkt und Linie auf, während der Optimierungsalgorithmus die kostenoptimalen Betriebsstrategien identifiziert. Zielgröße ist der Kosten-Kapitalwert, der die abgezinsten Auszahlungen über der Zeit aggregiert.

Exemplarisch ist in Abbildung 38 das Ergebnis des LAP für das Nachfrageszenario 3 und die vollflexible Linie K4\_ABC dargestellt. Während Diagramm 1 „Planned production program“ das Nachfrageszenario darstellt, ist in Diagramm 2 „Production program incl. program shift“ das optimierte Produktionsprogramm aufgezeigt. Es berücksichtigt die mögliche Verschiebung von Stückzahlen, die abhängig von der optimalen Linienkapazität erfolgt. Die Taktzeit ist in Diagramm 3 „Cycle time“ dargestellt, während der gewählte Schichtbetrieb pro Schichtgruppe in Diagramm 4 „Operating Time“ deutlich wird. Hier sind die Betriebsnutzungszeiten für die Früh-, Spät- und Nachtschicht kumuliert aufgetragen. Ist die Betriebsnutzungszeit in der Nachtschicht gleich 0, so ist ein Zweischicht-Betrieb gewählt.



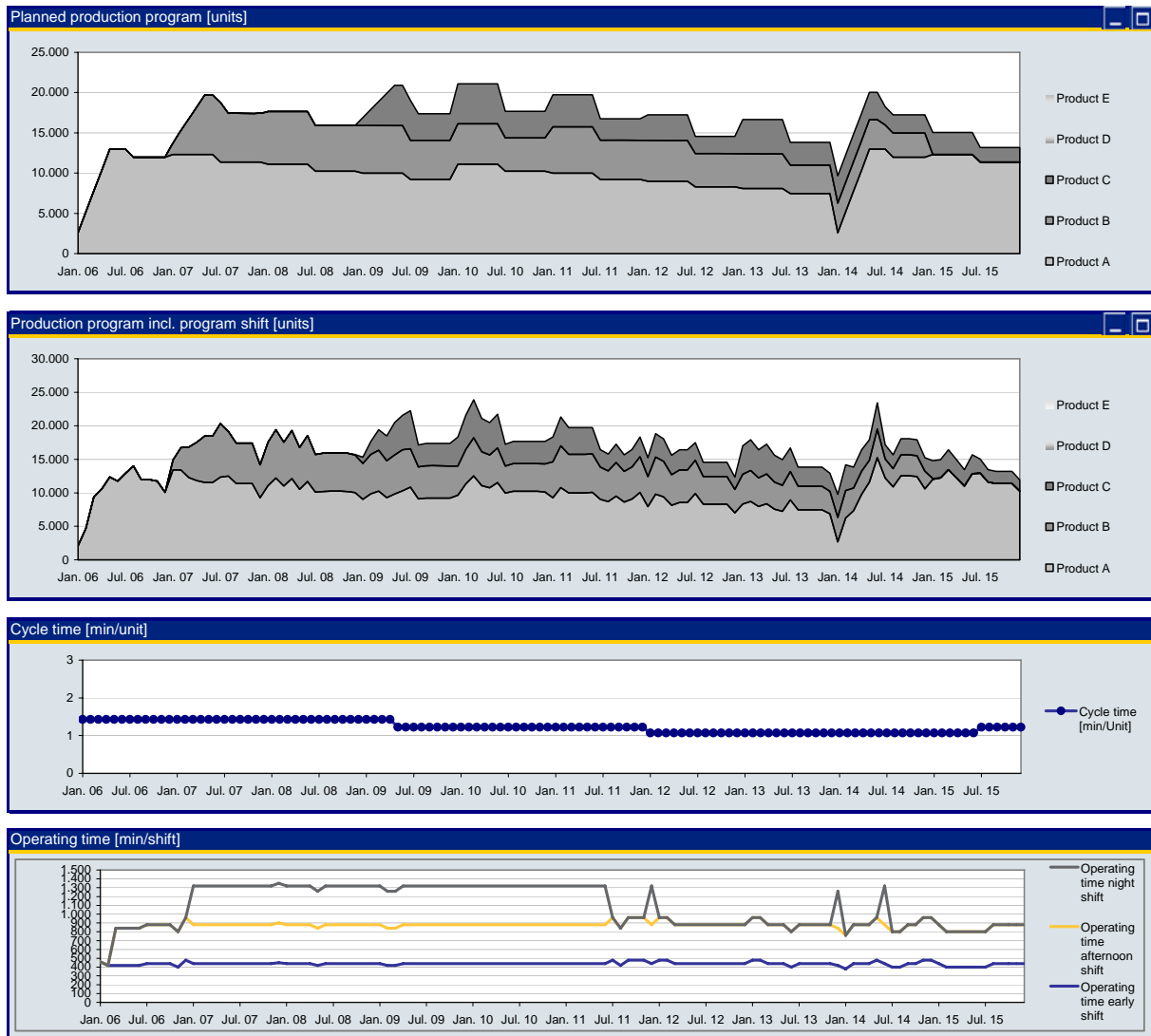


Abbildung 38: Ergebnis des LAP, exemplarisch dargestellt für Nachfrageszenario 3 und Konzept 4

Es wird deutlich, dass auf der Linie nach Anlauf von Produkt A1 im Januar 2006 im Einschicht-Betrieb und nach März 2006 im Zwei-Schicht-Betrieb bei einer Taktzeit von 1,4 Minuten produziert werden kann. Zum Anlauf von Produkt B im Januar 2007 wird ein Dreischicht-Betrieb erforderlich. Die Taktzeit muss zum ersten Mal nach 3 Jahren mit Anlauf von Produkt C an die höhere Nachfrage angepasst werden. Sie liegt danach bei 1,2 Minuten. Die Taktzeit wird im Juli 2011 nochmals um 0,2 Minuten auf 1 Minute reduziert, um in zwei Schichten produzieren zu können und damit die hohen Nachtschichtzuschläge einzusparen. Über den gesamten Planungszeitraum werden Stückzahlen zwischen den Perioden verschoben, um teure Anpassungen des Schichtbetriebs oder der Betriebsnutzungszeit zu vermeiden. Die Verschiebung erlaubt zusätzlich die Anpassung des geplanten Produktionsprogramms an die unterschiedliche Anzahl von Arbeitstagen in einer Periode. Da ein geringer Prozentsatz der Fahrzeuge um maximal einen Monat verschoben wird, bleibt der prognostizierte Nachfragetrend im Produktionsprogramm erhalten.

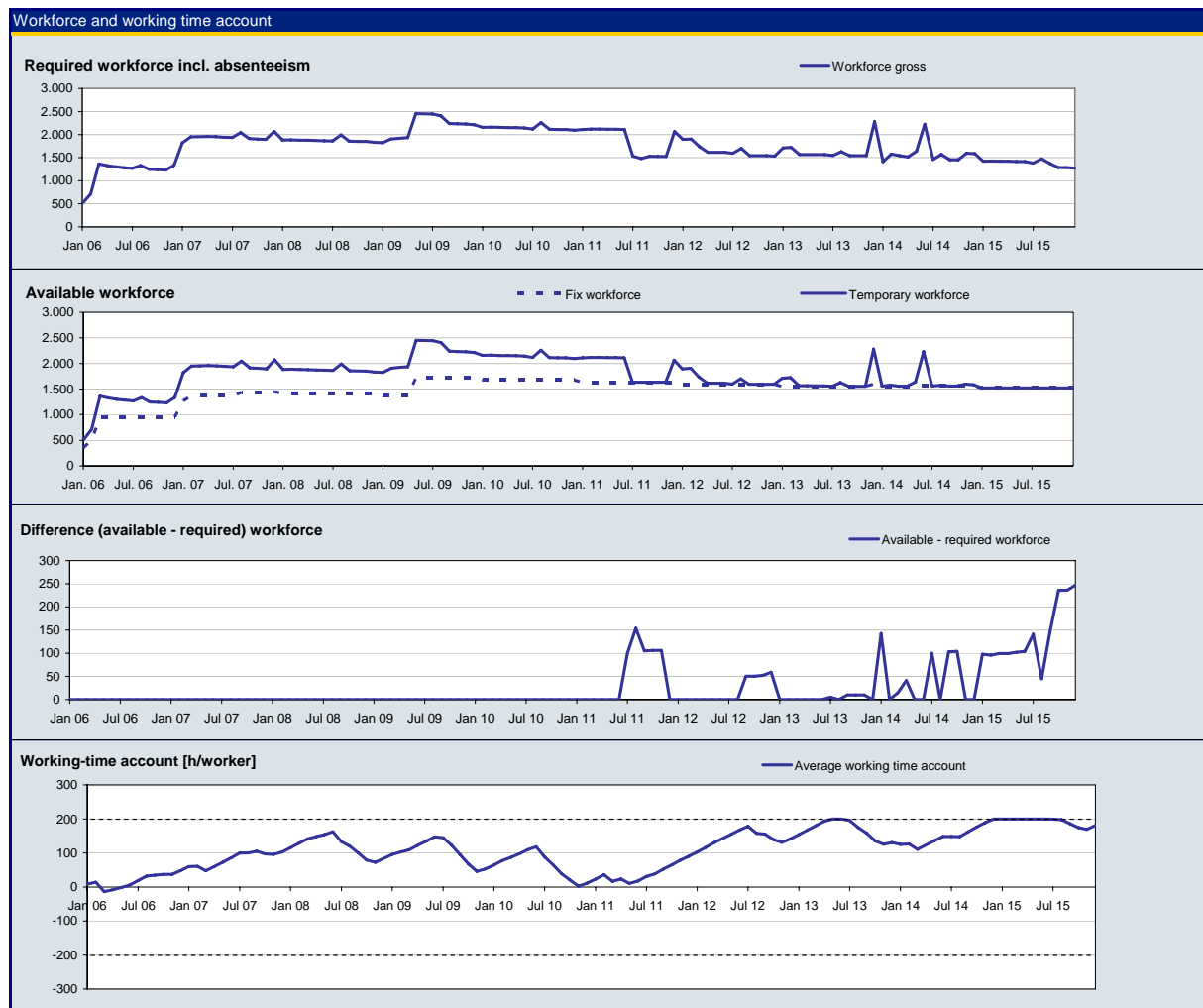


Abbildung 39: Arbeitskräftebedarf, befristete und unbefristete Mitarbeiter, Arbeitskräfte-Überschuss und Arbeitszeitkonto für Nachfrageszenario 3 und Konzept 4

Der Optimierungsalgorithmus minimiert den Arbeitskräftebedarf und berücksichtigt hierbei den maximalen Anteil flexibler Arbeitskräfte sowie den aktuellen Stand des Arbeitszeitkontos. Das Resultat stellt Abbildung 39 dar. Im ersten Diagramm sind die für die Produktion erforderlichen Brutto-Arbeitskräfte dargestellt, die sich aus Montage- und Taktzeit, Taktausgleichsverlust und Schichtbetrieb herleiten. Außerdem geht der prognostizierter Kranken- und Urlaubsfehlstand ein. In Diagramm 2 sind die eingestellten Arbeitskräfte aufgezeigt. Es wird unterschieden zwischen befristeten Arbeitskräften und Stammarbeitskräften. Das dritte Diagramm gibt die Differenz zwischen den für die Produktion erforderlichen Bruttoarbeitskräften und den eingestellten Arbeitskräften an. Durch die Nebenbedingungen des Algorithmus ist sichergestellt, dass eine ausreichende Anzahl Mitarbeiter für die Produktion verfügbar ist. Die Differenz zwischen benötigten und verfügbaren Mitarbeitern lässt sich am Verlauf des Arbeitszeitkontos erkennen. Eingestellte Arbeitskräfte, die nicht für die

Produktion benötigt werden, senken den Stand des Arbeitszeitkontos, indem sie das Gleitzeit-Guthaben reduzieren.

In der Abbildung lässt sich erkennen, dass nach Erreichen eines Maximums an eingestellten Arbeitskräften die Anzahl von Stamm-Arbeitskräften fast kontinuierlich sinkt. Das Maximum wird mit dem ersten Taktwechsel im Dreischicht-Betrieb im Mai 2009 erreicht. Die folgende Reduktion der Arbeitskräfte ist möglich durch Lernkurveneffekte nach dem Taktwechsel. Da unmittelbar keine Stammarbeitskräfte entlassen werden können, wird zuerst die Anzahl flexibler Arbeitskräfte reduziert und gleichzeitig die natürliche Fluktuation zur Reduktion der Stamm-Arbeitskräfte genutzt. Der maximale Anteil flexibler Arbeitskräfte wird wenn möglich voll ausgenutzt, wodurch gegen Ende des Lebenszyklus die personellen Fixkosten minimal sind. Gut zu erkennen sind die späteren kurzfristigen Wechsel in den Dreischicht-Betrieb, die jedoch aufgrund der fortgeschrittenen Lernkurveneffekte fast komplett durch Einstellung von befristeten Leiharbeitskräften durchgeführt werden können.

Nachfrageszenario 3 zeichnet sich durch eine verhältnismäßig stabile Stückzahl über der Zeit aus. Im letzten Produktionsjahr werden noch immer 76,5 Prozent des Maximalvolumens nachgefragt. Infolgedessen wird das Arbeitszeitkonto der Stammarbeitskräfte kaum zum atmen genutzt: Die Stückzahl-Schwankung können über die befristeten Arbeitskräfte abgefangen werden. Das Arbeitszeitkonto erlaubt lediglich einen günstigen langen Zwei-Schicht-Betrieb, in dem mehr als 7 Stunden pro Schicht gearbeitet werden. Demzufolge höhere Taktzeiten erlauben eine Minimierung der Arbeitskräfte-Anzahl. Anders verhält sich das Arbeitszeitkonto bei Nachfrageszenario 8. Hier bricht die Stückzahl in den letzten zwei Betrachtungsjahren ein, weil A2 als Nachfolger von A1 nicht produziert wird. Das Arbeitszeitkonto sinkt auf minus 200 Stunden.

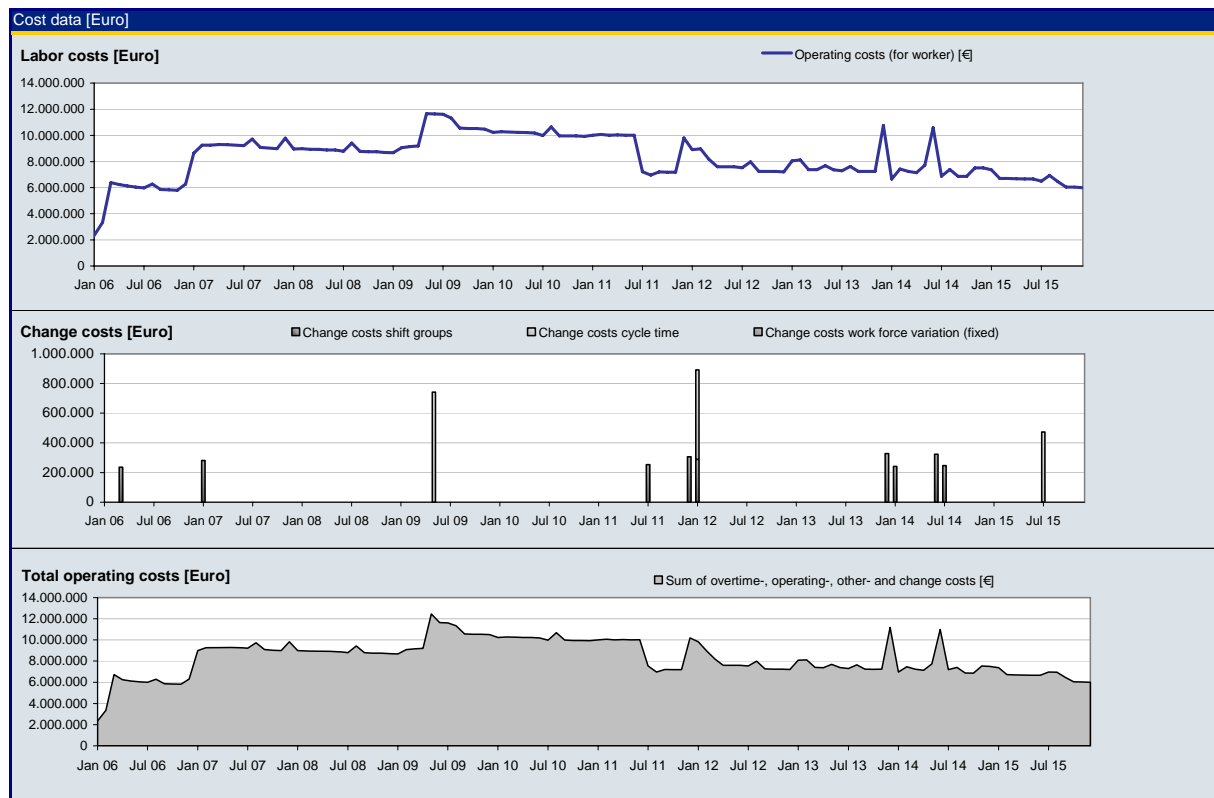


Abbildung 40: Personal-, Anpassungs- und Betriebskosten<sup>32</sup> für Nachfrageszenario 3 und Konzept 4

Aggregiert lassen sich die antizipierten operativen Anpassungsstrategien anhand ihrer operativen Betriebskosten bewerten (vgl. Abbildung 40). Sie setzen sich aus Personal- und Anpassungskosten zusammen. Die Personalkosten in Diagramm 1 („labor cost“) folgen dem Schichtbetrieb und sinken langfristig bedingt durch die Stückzahlreduktion und Lernkurveneffekte. Die Anpassungskosten in Diagramm 2 („change cost“) repräsentieren die Taktwechsel und die Variationen des Schichtbetriebs. Im letzten Diagramm („Total operating cost“) sind die operativen Betriebskosten als Summe der Personal- und Anpassungskosten des Szenarios aufgetragen.

<sup>32</sup> Exkl. Investitionen

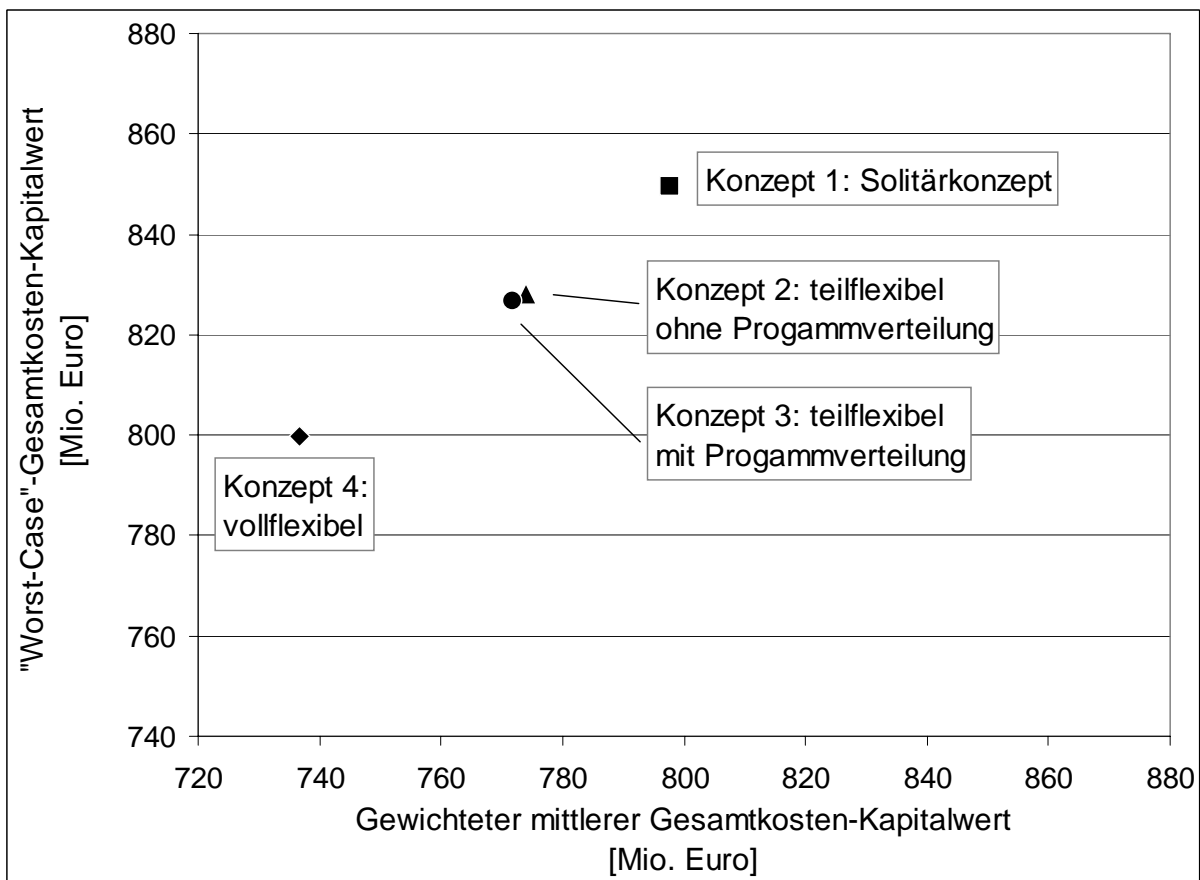
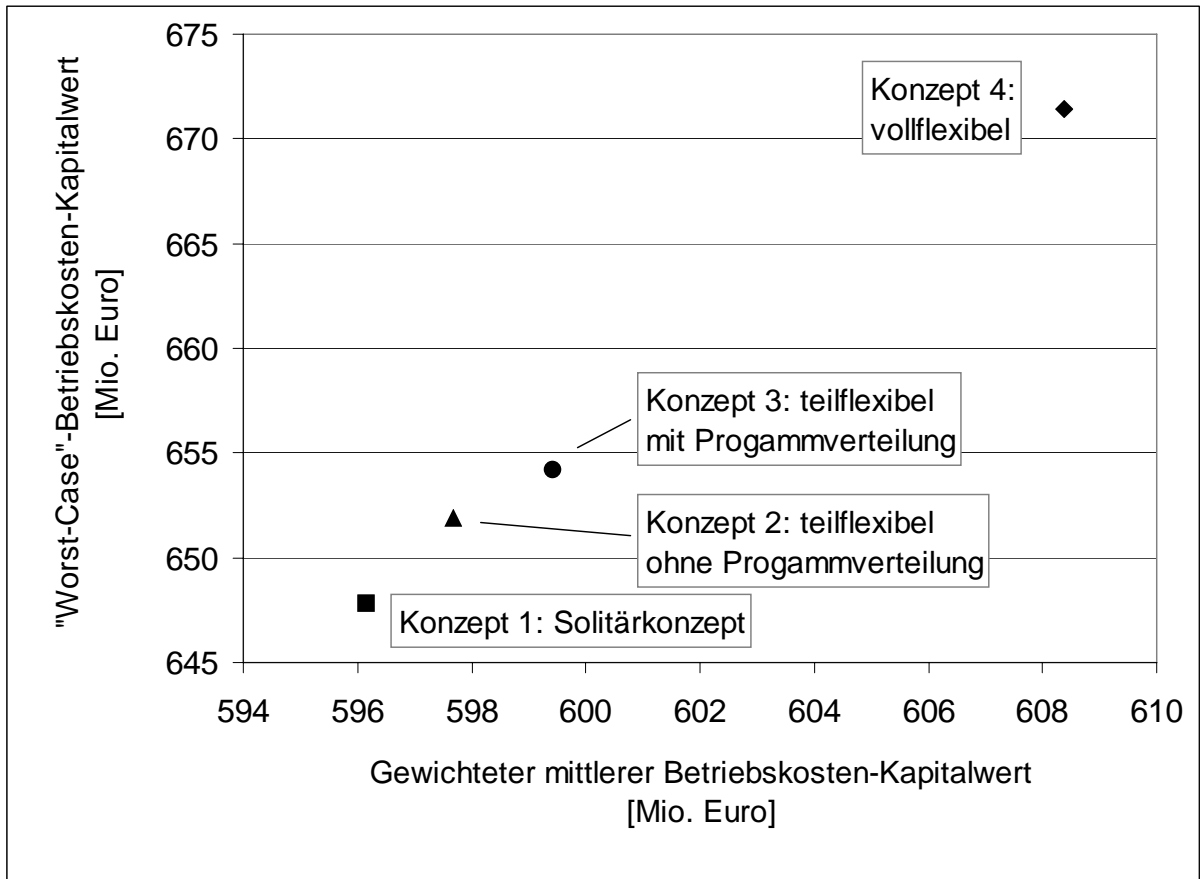


Abbildung 41: Gewichteter mittlerer und Worst-Case-Kapitalwerte der Betriebskosten (oben) und der Gesamtkosten (unten)

Nach der Optimierung der Betriebsstrategien für alle Nachfrageszenarien sind die jeweils optimalen Betriebskosten und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit bekannt. Auf ihrer Basis können der mittlere Betriebskosten-Kapitalwert und der „Worst-Case“-Betriebskosten-Kapitalwert über alle Nachfrageszenarien berechnet werden. Beide sind in Abbildung 41 oben dargestellt. Man erkennt, dass die operativen Betriebskosten mit der Flexibilität steigen.

Zur endgültigen Bewertung der Flexibilitätsstrategien müssen jedoch die Barwerte der Investitionen zu den Betriebskosten-Kapitalwerten hinzuaddiert werden. Es ergibt sich der Gesamtkosten-Kapitalwert, der in Abbildung 41 unten sowohl als gewichteter mittlerer als auch als Worst-Case-Gesamtkosten-Kapitalwert für die vier Flexibilitätsstrategien dokumentiert ist. Trotz der hohen Produktverschiedenheit, der sich in der Zeitspreizung der Montagezeiten und in den hohen Taktausgleichsverlusten zeigt, steigt die Vorteilhaftigkeit mit zunehmender Produktflexibilität. Mit dem vollflexiblen Ein-Linien-Konzept kann am kostengünstigsten produziert werden: Die solitär- und teilflexiblen Strategien haben höhere Kosten-Kapitalwerte. Dies gilt sowohl bei Betrachtung des gewichteten Mittelwerts als auch beim Worst-Case-Kosten-Kapitalwert. Bei gegebenen produkt- und standortseitigen Rahmenbedingungen lassen sich für diesen Sachverhalt folgenden Gründe identifizieren:

- *Geringere Investitionen:* Aufgrund der hohen Investitionen pro Linie und Arbeitsstation steigt die Vorteilhaftigkeit mit einer sinkenden Linienzahl. Das vollflexible Ein-Linien-Konzept führt mit 128 Mio. Euro zu den geringsten Investitionen nach Abzinsung der kalkulatorischen Zinsen. Im Vergleich zum Solitärkonzept werden Einsparungen in Höhe von 51 Mio. Euro erzielt. In diese Summe ist einkalkuliert, dass bei den später anfallenden Investitionen für die Produkte B und C eine geringere Marktunsicherheit besteht und dass die Kapazitäten deshalb besser an die Marktnachfrage angepasst werden können.
- *Geringe Differenz der durchschnittlichen Linieneffizienzen:* Die Effizienzverluste beim vollflexiblen System sind im Vergleich zu den solitär- und teilflexiblen Konzepten vergleichsweise gering. Die mittlere Differenz der Betriebskosten zwischen dem Solitärkonzept 1 und dem vollflexiblen Konzept 4 liegt abgezinst bei lediglich 12 Mio. Euro. Im Worst-Case beträgt der Unterschied 24 Mio. Euro. Es stellt sich die Frage, warum die hohe Effizienz der Solitärlinie mit einem Ziel-Taktausgleichsverlust von 4,5 Prozent nicht im erwarteten Maße eintritt. Der Grund findet sich in der Nutzung der Volumenflexibilität der Solitär- und der teilflexiblen Linien. Während die vollflexible Linie im Mittel nur drei Mal umgetaktet werden muss, so werden im

kostenoptimalen Fall über alle Solitärlinien 31 Umtaktungen erforderlich. Die Ziel-Effizienz wird aufgrund der auftretenden Lerneffekte demzufolge nur selten erreicht.

- *Frühzeitige Nutzung des Zwei-Schicht-Betriebs:* Bei den auf Ein- und Zwei-Schicht-Betriebe ausgelegten Solitär- und teilflexiblen Konzepten ist eine Reduktion des Schichtbetriebs erst nach einer Reduktion der Stückzahlen um ca. 40 Prozent möglich. Hingegen kann der 3-Schicht-Betrieb des vollflexiblen Systems frühzeitig auf einen Zwei-Schicht-Betrieb reduziert werden. Das kostenrelevante Atmen über die Betriebsnutzungszeit ist demzufolge einfacher, und die erforderliche Anzahl von Umtaktungen wird minimiert.
- *Lernkurven-Effekte:* Die im Vergleich zu den Solitärlinien stärkeren Lernkurven-Effekte führen zu freigesetzten personellen Kapazitäten sowie zu reduzierten Anlauf-Montagezeiten bei den Produkten B, C und A2. Aus diesem Grund können die zusätzlich erforderlichen Arbeitskräfte für die Anläufe minimiert werden. Während die Montage von Produkt B im Solitärkonzept 792 Minuten erfordert, beträgt die Montagezeit auf der produktflexiblen Linie nur 773 Minuten. Die Differenz von 19 Minuten schlägt sich bei einer Taktzeit von 1,22 Minuten im Zwei-Schichtbetrieb in einer Reduktion der Arbeitskräfte um 31 Mitarbeiter nieder. Aufgrund des geringen Anteils von Zeitarbeitskräften und einer geringen Mitarbeiterfluktuation von lediglich drei Prozent pro Jahr spiegelt sich diese Differenz in den personellen Fixkosten wieder, die nur langsam über die jährliche Mitarbeiter-Fluktuation abgebaut werden können.
- *Höhere technische Verfügbarkeit:* Die nach der Inbetriebnahme-Phase konstante technische Verfügbarkeit im vollflexiblen Ein-Linien-Konzept führt zu reduzierten Betriebskosten. Bei der Integration neuer Fahrzeuge in die Linie müssen lediglich geringfügige organisatorische Kapazitätsreduktionen und eine reduzierte Plattformbelegung in Kauf genommen werden. Hingegen müssen die Solitär- und teilflexiblen Linien auf die geringe technische Anlagenverfügbarkeit in der Anlaufphase ausgelegt werden.

Im Vergleich zu dem solitär und vollflexiblen Konzept zeigen die teilflexiblen Konzepte einen mittleren monetären Nutzen auf, wobei das routenflexible Konzept 3 dem produktflexiblen Konzept 2 überlegen ist. Sein Kosten-Kapitalwert liegt um 2 Mio. Euro niedriger. Zwar gilt, dass mit der Routenflexibilität für Produkt C die Betriebskosten steigen. Sie sind um im Mittel 1,9 Mio. Euro nach Abzinsung erhöht. Allerdings kann die technische

Kapazität der Linie K3\_BC im Vergleich zur Linie K2\_BC reduziert werden, da die Linie K3\_AC als Spitzenbrecherlinie fungiert. Die Investitionsdifferenz ergibt sich aus der Reduktion der Kapazität um im Mittel 48 Stationen. In die Rechnung ist einbezogen, dass 5 Mill. Euro Anpassungsinvestitionen anfallen, wenn Produkt C auf K3\_AC produziert wird.

Der Worst-Case-Gesamtkosten-Kapitalwert erlaubt eine Bewertung des Risikos des Montagesystems. Er ist im Anwendungsfall nicht entscheidungsrelevant, da sowohl im Mittel als auch im Worst-Case die Gesamtkosten-Kapitalwerte mit der Produktflexibilität sinken. Spricht jedoch der mittlere Gesamtkosten-Kapitalwert für ein Konzept, und der Worst-Case-Kapitalwert dagegen, so ist die Investitionsentscheidung von der Risikopräferenz des Unternehmens abhängig. Es soll aus diesem Grund transparent gemacht werden, warum im Anwendungsfall das Risiko mit der Produktflexibilität tendenziell steigt:

- *Investitionsrisiko*: Mit der Produktflexibilität steigt bei zeitversetzten Produktlebenszyklen das Investitionsrisiko. In die vollflexible Linie muss bereits 2005 bei hoher Marktunsicherheit für die Produkte B und C investiert werden. Durch die bei den Solitär- und teilflexiblen Linien in die Zukunft verschobenen Investitionszeitpunkte wird dieses Risiko reduziert.
- *Betriebskostenrisiko*: Mit der Produktflexibilität steigt im Anwendungsfall das Betriebskosten-Risiko. Dies liegt am verhältnismäßig teuren Drei-Schicht-Betrieb mit seinem 30-prozentigen Nachtschichtzuschlag. Bei hoher und stark wechselnder Nachfrage kann nicht dauerhaft in einen kostengünstigen Zwei-Schicht-Betrieb gewechselt werden. Demzufolge werden Umtaktungen und Anpassungen des Schichtbetriebs erforderlich. Die sich ergebenden Anpassungskosten und Effizienzverluste der Linien erhöhen dann die Betriebskosten.

Zusammenfassend stellt sich eine deutliche Vorteilhaftigkeit der vollflexiblen Linie heraus. Dies gilt, obwohl die Produkte eine hohe Zeitspreizung aufweisen und damit einen hohen Taktausgleichsverlust verursachen. Außerdem sind die Lebenszyklen der Produkte nicht optimal zeitversetzt. Würden die entwicklungs- und vertriebsseitigen Randbedingungen verbessert, so könnten die Vorteile der vollflexiblen Linie weiter ausgespielt werden.

### **6.3 Kritische Würdigung**

Nachdem in Kapitel 2.4.2 die Anforderungen an eine Planungsmethode definiert wurden, sollen die erarbeiteten und umgesetzten Modelle und Methoden auf ihrer Basis kritisch gewürdigt werden. Zu diesem Zweck werden gewonnene Erkenntnisse aus dem erdachten



Anwendungsfall herangezogen. Ergänzend werden die in den Geschäftsbereichen der DaimlerChrysler AG bearbeiteten Anwendungsfälle in die Kritik einbezogen. Zuerst wird die antizipative, dynamische und kostenorientierte Planung aus theoretischer Sicht betrachtet. Die Eignung für die betriebliche Praxis wird in einem zweiten Schritt untersucht. Dabei wird auf die rechenzeitbedingten Systemgrenzen eingegangen.

### **Antizipative, dynamische und kostenorientierte Planung**

Bisher war seitens der strategischen Montageplanung kaum eine Antizipation des technisch-organisatorischen Flexibilitätsnutzens möglich, denn zukünftige Entscheidungen bezüglich der Anpassung des Systems an die Nachfragedynamik waren schwer vorherzusehen. Begründet lag das im kaum abzuschätzenden arbeitsorganisatorischen Handlungsspielraum der operativen Montageplanung und den sich daraus ergebenden Entscheidungen. Das führte zu einer strategischen Planung, die auf die kurzfristige Reduktion der Investitionen setzte und gleichzeitig eine maximale theoretische Effizienz der Linie in einem statischen Zielzustand anstrebte. Es wurde jedoch vernachlässigt, dass diese Zieleffizienz aufgrund der Lernkurveneffekte nach Anpassungen in der betrieblichen Praxis nur selten erreicht wird.

Dieses Planungsdefizit wird vom LAP aufgehoben. Er erlauben eine realistische Antizipation der Kosten des operativen Montagebetriebs und ihre Integration in die Investitionsrechnung. Als Grundlage steht das erarbeitete Modell der Montage-Wirkzusammenhänge zur Verfügung. In ihm werden die Kostentreiber des Montagebetriebs, der Flexibilitätsbedarf und das Flexibilitätsangebot modelliert. Ergebnisse im Realbetrieb zeigen, dass die Genauigkeit des Modells ausreichend hoch ist. Die Kostendifferenz zu historischen Realdaten lag in Fallstudien bei lediglich bis zu 5 Prozent.

Die zukünftige Flexibilitätsnutzung wird durch den Optimierungsalgorithmus antizipiert, der die für die Betriebsplanung wesentlichen Entscheidungsvariablen möglichst integriert betrachtet. Durch das Lernkurvenkonzept werden dabei betriebliche Lerneffekte nach Anläufen und Umtaktungen modelliert. Nach Analyse der LAP-Ergebnisse mit operativen Montageplanern mehrerer Standorte liefern die Modelle und der Algorithmus Ergebnisse, die neben einer Antizipation der Montagebetriebskosten für die strategische Montageplanung sogar eine Optimierung des operativen Montagebetriebs erlauben. In ersten realen Anwendungsfällen wurden dabei signifikante Einsparpotenziale aufgezeigt. Die Anpassungsschritte des Optimierungsalgorithmus sind in den untersuchten Fällen nachvollziehbar und kosten-

optimal. Bis zu diesem Zeitpunkt kann jedoch noch keine allgemeine Aussage über die Qualität der Ergebnisse gemacht werden.

### **Praxisorientierte Planung**

Ziel des LAP ist die Generierung von Kostenaussagen als Entscheidungsgrundlage für die strategische Montageplanung. Um diesem Ziel gerecht zu werden, muss er den Anforderungen an die praktische Einsatzfähigkeit gerecht werden. Im Vordergrund steht eine *transparente und nachvollziehbare Planung*. Sie wird vom LAP unterstützt, indem Auswirkungen von Maßnahmen der Montageplanung auf die Betriebskosten aufgezeigt werden. Der LAP bietet neben dem Kosten-Kapitalwert zusätzliche Kennzahlen zur Analyse der Ergebnisse. Dazu gehören eine Aufschlüsselung der Kosten, eine Analyse der Auslastung und den Schichtbetrieb beschreibende Größen. Die Ergebnisse und die Entscheidungsfindung des Optimierungsalgorithmus werden in einer Datei protokolliert. Grafische Auswertungen erleichtern die Nachvollziehbarkeit.

Bezüglich der *Flexibilität und Skalierbarkeit* des LAPs sind erste Schritte im Rahmen der Arbeit durchgeführt. Der Planer hat die Möglichkeit der schnellen Dateneingabe. Veränderungen der Eingangsdaten bei Änderung der Planungsprämissen sind unkompliziert und schnell durchzuführen. Zusätzliche Auswertungen kann der Planer generieren. Durch die Nutzung der Standardsoftware Microsoft Excel als grafische Benutzeroberfläche sowie der in C++ und C# implementierten Modelle und Algorithmen wird eine breite Anwendbarkeit sichergestellt.

Die implementierten Ein- und Zwei-Linien-Modelle lassen sich einfach auf neue Fragestellungen mit ähnlicher Linienstruktur übertragen. Ändert sich jedoch die Anzahl der Linien und ihre Produktflexibilität fundamental, so bieten sich den Planern zwei Möglichkeiten. Erstens erlaubt das allgemeine Ein-Linien-Modell die Abbildung beliebiger Standort- und Linienstrukturen. Produktionsprogramm- und Arbeitskräfte-Verschiebungen zwischen den Linien können dann zwar nicht integriert betrachtet werden, sie lassen sich jedoch szenarienbasiert untersuchen. Zweitens können die Eingangsgrößen, Berechnungen und Ausgangsgrößen der Modelle und Algorithmen softwaretechnisch angepasst werden. Sie sind dafür modular aufgebaut. Die manuelle Anpassung erfordert allerdings ein hohes Maß an problem- und informationstechnischem Verständnis. Die automatisierte Anpassung des LAP durch den Planer an neue, noch nicht modellierte Flexibilitätsstrategien, konnte im Rahmen der Arbeit

nicht umgesetzt werden. Dafür müssen in Zukunft Modellierungswerkzeuge erarbeitet werden.

Die Anwendbarkeit wird wesentlich beeinflusst durch die Frage, in welcher Zeit der Fragestellung angemessene Lösungen generiert werden können. Aus diesem Grund wurden Laufzeitanalysen durchgeführt. Diese erlauben Aussagen zum erforderlichen *Aggregationsgrad* und zur daraus folgenden *Genauigkeit* der Modelle. Nach den durchgeführten Rechenzeitanalysen auf einem gängigen Personalcomputer kann die Aussage gemacht werden, dass im Ein-Linien-Modell alle den Montagebetrieb bestimmenden Entscheidungsvariablen mit ausreichender Genauigkeit beschrieben werden könne. Durch Nutzung der Ansätze zur Komplexitätsreduktion und durch geschickte Wahl der Diskretisierungsstufen über der Zeit können auch für mehrlinige routenflexible Modelle Rechenzeiten von unter einer Stunde erreicht werden. Dabei erfordert die Komplexitätsreduktion ohne Zweifel ein hohes Maß an Expertenwissen.

Im Rahmen von Schulungen und verschiedenen Anwendungsfällen wurde der LAP von Planern aus den Bereichen Produktions-, Betriebs-, Personal- und Finanzplanung positiv bewertet. Anklang fand die schnelle und ganzheitliche Bewertung alternativer Montagesysteme sowie die Kostenoptimierung des Montagebetriebs durch eine optimierte Nutzung der technischen und organisatorischen Flexibilität. Den Zusammenhängen zwischen der technischen Montage- und Personalplanung wurde besondere Bedeutung zugemessen. Ausdrücklich wurden die Genauigkeit des Montagemodells und die Ergebnisqualität des Ein-Linien-LAP-Modells geschätzt.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Zur wirtschaftlichen Reaktion auf neue Produkte und Nachfrageschwankungen hat die strategische Montageplanung das Ziel, optimale *Flexibilitätsstrategien* für die Produktion umzusetzen. Dabei stellt sich grundsätzlich die Frage, in welche Flexibilität an einem Standort investiert werden soll. Abhängig ist die Wahl vor allem von den zu fertigenden Produkten. Lassen sich verschiedene Produkte effizient auf einer Linie fertigen, so können *produktflexible* Anlagen dauerhaft gut ausgelastet werden. Unterscheiden sich die Produkte zu stark, so ist die Produktion auf spezifischen Ein-Produkt-Linien, so genannten Solitärlinien, zweckmäßig. Das Abfangen von Nachfrageschwankungen kann dann über eine *Volumenflexibilität* erfolgen. Die Wahl der Flexibilitätsstrategie ist jedoch nicht nur abhängig vom zukünftigen Produktportfolio. Besonderen Einfluss hat zusätzlich die standortspezifische Kostenstruktur und Personalflexibilität.

In die Kostenbewertung von Flexibilitätsstrategien gehen auf der einen Seite die *Investitionen* für die Systemflexibilität ein. Auf der anderen Seite muss der im Produktionsbetrieb auftretende *Flexibilitätsnutzen* bewertet werden. Während die Investitionen in der Regel einfach abzuleiten sind, gestaltet sich die Vorhersage des Flexibilitätsnutzens schwieriger. Die Schwierigkeit liegt darin, dass die implementierte Flexibilität als ein Potenzial anzusehen ist, das die Reaktionsfähigkeit im Produktionsbetrieb steigert. Sie wird nur genutzt, wenn ein *Flexibilitätsbedarf* besteht. Welche Flexibilität mit welcher Ausprägung verwendet wird und welche Kosten dabei entstehen, hängt von einer Vielzahl technischer und arbeitsorganisatorischer Randbedingungen ab. Um dennoch eine Vorhersage der zeitdynamischen Flexibilitätsnutzung und ihrer Kosten zu ermöglichen, sind neue Planungshilfsmittel erforderlich.

Dafür bietet sich das Konzept der hierarchischen Planung an: Nachdem funktionale Zusammenhänge zwischen den Reaktionsmöglichkeiten im Montagebetrieb und den daraus resultierenden Montagebetriebskosten existieren, kann die *Antizipation* des Montagebetriebs auf Basis einer *mathematischen Optimierung* durchgeführt werden. Sie erlaubt eine Vorhersage des zukünftigen Entscheidungsverhaltens bei der Flexibilitätsnutzung. Voraussetzung ist eine ausreichend detaillierte Betriebskostenstruktur und die Berücksichtigung betrieblicher Lerneffekte. Zu diesem Zweck werden im Rahmen der Arbeit drei Kernelemente konzipiert und umgesetzt: Das Montage-, das Lernkurven- und das Optimierungsmodell.

Das *Montagemodell* ermöglicht bei spezifischen produkt- und standortspezifischen Eingangsgrößen und für ein gegebenes Entscheidungsverhalten im Produktionsbetrieb die Ableitung der Betriebskosten. Das Modell basiert auf analytischen Zusammenhängen und integriert neben einer Kapazitätsrechnung eine Arbeitskräftebedarfs- und Kostenrechnung. Das *Lernkurvenmodell* beschreibt zukünftige betriebliche Lerneffekte nach Anläufen und Anpassungsmaßnahmen. Diese wirken sich auf die Montagezeiten, die Verfügbarkeiten und die Taktausgleichsverluste aus. Das Modell basiert auf mengentheoretischen Überlegungen, die Lernkurveneffekte über der kumulierten Anzahl durchgeführter ähnlicher Arbeitsvorgänge aufzeigen. Dabei wirkt das Lernkurvenmodell nicht nur auf Einzellinien, sondern anteilig auch linienübergreifend, z. B. wenn ein Produkt auf zwei Linien produziert wird. Das *Optimierungsmodell* schließlich basiert auf der dynamischen Programmierung und prognostiziert das Entscheidungsverhalten bei der Flexibilitätsnutzung im Produktionsbetrieb. Als Entscheidungsvariablen werden die Instrumente der operativen Montageplanung integriert betrachtet. Dies umfasst sowohl die technische Flexibilität des Systems als auch die Personalflexibilität des Standorts. Beispielsweise werden Taktzeiten, Einstellungen befristeter und unbefristeter Arbeitskräfte, Schichtmodelle und das Produktionsprogramm über der Zeit optimiert. Das kostenoptimale Ergebnis zeigt auf, zu welchen Personal- und Anpassungskosten das Produktionsprogramm bei gegebener implementierter Flexibilität zukünftig produziert werden kann.

Die entwickelten Methoden wurden im Rahmen der Dissertation in einem Planungswerkzeug umgesetzt. Der *Lifecycle Adaptation Planner* (LAP) wurde anhand von Realdaten validiert und wird heute in den Geschäftsbereichen der DaimlerChrysler AG eingesetzt. Er führt zu einer höheren Transparenz der Auswirkungen von strategischen Investitionsmaßnahmen auf die Montagebetriebskosten und erlaubt damit eine Optimierung der Flexibilitätsstrategie. Gleichzeitig werden durch die Modelle und Methoden Verhandlungen zwischen den Planungseinheiten unterstützt. So können beispielsweise Auswirkungen von Produktänderungen auf die Montage-Betriebskosten aufgezeigt werden. Ein weiteres Einsatzfeld ist die Unterstützung des operativen Montagebetriebs. Hier werden durch den LAP kostenoptimale Anpassung der Montage an Stückzahlschwankungen errechnet.

Im Anwendungsfall der Arbeit weist der LAP das Potenzial produktflexibler Montagelinien für innovative Kompaktklassefahrzeuge aus. Wesentlicher Vorteil sind die geringeren Investitionen in wenige produktflexible Linien. Die höhere Produktionseffizienz der Solitärlinie

kann diesen Vorteil nicht ausgleichen, denn sie ist geringer als häufig angenommen. Dafür gibt es im Wesentlichen zwei Gründe. Solitärlinien werden bei starken Nachfrageschwankungen häufiger umgetaktet. Die auftretenden Lernkurveneffekte nach Taktanpassungen führen zu einer reduzierten Effizienz. Zweitens können auf produktflexiblen Linien produktübergreifende Lernkurveneffekte über einer höheren Stückzahl realisiert werden, und die Montagezeit wird schneller gesenkt. Dementsprechend sind bei Neuanläufen oder Nachfolgeprodukten geringere Anlauf-Montagezeiten zu erzielen, was sich positiv auf den Arbeitskräftebedarf und auf die erforderliche Anzahl von Arbeitsstationen auswirkt. Nachdem Arbeitskräfte in westlichen Industrienationen oft als Fixkosten anzusehen sind, die nur über eine geringe Mitarbeiterfluktuation abgebaut werden können, hat dieser Aspekt einen hohen Einfluss auf die Produktionskosten. Es bleibt festzuhalten, dass an dieser Stelle keine allgemeine Aussage über die Vorteilhaftigkeit der produktflexiblen Linien gemacht werden soll. Flexibilitätsstrategien müssen weiterhin produkt- und standortspezifisch beurteilt werden. Jedoch kann der Behauptung, dass Solitärlinien wesentlich effizienter sind als produktflexible Linien, bei den untersuchten Nachfrageschwankungen und der vorgegebenen Zeitspreizung der Montagezeiten ausdrücklich entgegen getreten werden.

Aus der Arbeit lassen sich weitere Forschungs- und Handlungsbedarfe ableiten. Erstens müssen repräsentative Studien durchgeführt werden, die eine allgemeine Bewertung der Flexibilitätsstrategien zulassen. Zweitens zeigt der praktische Einsatz des LAP, dass die integrierte Modellierung neuer Flexibilitätsstrategien aufwändig ist. Der hohe Programmieraufwand muss reduziert werden, indem Planungswerkzeuge entwickelt werden, die flexibler an neue Fragestellungen angepasst werden können. Dabei darf die Effizienz der Algorithmen nicht zu stark sinken. Dieser Punkt muss aus informationstechnischer Perspektive beleuchtet werden.

Mit dieser Arbeit ist ein weiterer Schritt zur Planung flexibler Montagesysteme gemacht worden. Jedoch müssen weitere Schritte folgen. Dabei kann die Nutzung mathematischer Verfahren dazu beitragen, dass die Automobilindustrie ihre Auslastung, Lieferfähigkeit und Effizienz weiter steigert.

## Literatur

- Aggteleky, 1987                      Aggteleky, B.: Fabrikplanung, Bd. 1: Grundlagen. München: Hanser 1987.
- Alden et al., 2002                    Alden, J. M.; Costy, T.; Inman, R. R.: Product-to-Plant Allocation Assessment in the Automotive Industry. In: Journal of Manufacturing Systems, 21 (2002) 1, S. 1 bis 13.
- Aurich et al., 2004                    Aurich, J. C.; Barbian, P.; Naab, C.: Produktionsstrategien im Produktlebenszyklus. In: Zeitschrift für Wirtschaftlichen Produktionsbetrieb (ZWF). 99 (2004) 5, S. 218 bis 223.
- Bailey, 1989                            Bailey, C. D.: Forgetting and the learning curve: A laboratory study. In: Management Science 35 (1989) 3, S. 340 bis 352.
- Baloff, 1966                            Baloff, N.: Startups in machine-intensive production systems, in: The Journal of Industrial Engineering 17 (1966) 1, S. 25 bis 32.
- Baloff, 1971                            Baloff, N.: Extensions of the learning curve – some empirical results, in: Operational Research Quarterly 22 (1971) 4, S.329 bis 340.
- Balve et al., 2001                    Balve, Patrick; Rally, Peter J.: Integrative und marktorientierte Montageplanung. In: Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Horváth, P.; Zahn, E.: Montageplanung – effizient und marktgerecht. Berlin, Springer, 2001.
- Baumgärtel, 1999                    Baumgärtel, Hartwig: Verteiltes Lösen von constraint-Problemen in Multiagenten-Systemen zur optimierten Planung in einer Fließfertigung. Sankt Augustin: Infix, 1999. Zugl.: Berlin, Technische Universität, Dissertation, 1999.
- Bertsekas, 1987                        Bertsekas, D.: Dynamic Programming. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- Bertsekas, 1995                        Bertsekas, D.: Dynamic Programming and Optimal Control, Vol. I. Athena Scientific, Belmont, 1995.
- Bish et al., 2000                        Bish, E. K.; Muriel, A.; Biller, S.: Managing Flexible Capacity in a Make-to-Order Environment. 2000.

- Brown et al., 1984      Brown, J.; Dubois, D.; Rathmill, K.; Sethi, S.P.; Stecke, K.E.:  
Classification of Flexible Manufacturing Systems. In: The FMS  
Magazine, April 1984, S.114 bis 117.
- Buchenau, 2005      Buchenau, M.-W.: BMW startet Serienproduktion in Leipzig  
schon am 1. März. Handelsblatt, Düsseldorf, Ausgabe Nr. 31,  
14.02.2005, S. 11.
- Bunz et al., 1987      Bunz, A.; Hopfmann, L.: Simulationsmodelle vom Typ Dynamics  
als Instrument zur strategischen Planung flexibler Montage-  
systeme. In: Biethahn, J.; Schmidt, B. (Hrsg.): Simulation als  
betriebliche Entscheidungshilfe: Methoden, Werkzeuge, Anwen-  
dungen. Bd. 1, Springer, 1987.
- Chandra et al., 2005      Chandra, C., Everson, M., Grabis, J.: Evaluation of enterprise-  
level benefits of manufacturing flexibility. In: Omega,  
International Journal of Management Science, 33 (2005) 1, S. 17  
bis 31.
- Cherrington et al., 1985      Cherrington, J. E.; Lipert, S.; Towill, D. R.: The effect of prior  
experience on learning curve parameters. International Journal of  
Production Research 25 (1985) 3. S. 399 bis 411.
- De Toni et al., 1998      De Toni, A.; Tonchia, S.: Manufacturing Flexibility: a Literature  
Review. In: International Journal of Production Research.  
36 (1998) 6, S. 1587 bis 1617.
- Dangelmaier, 2002      Dangelmaier, Wilhelm: Produktion und Information, System und  
Modell. Berlin: Springer 2003.
- Dembrowsky, 1998      Dembrowsky, Ralf: Rechtliche Rahmenbedingungen für die  
Vereinbarung flexibler Arbeitszeitregelungen. In: Klenner,  
Christina; Seifert, Hartmut (Hrsg.): Zeitkonten – Arbeit à la carte?  
Neue Modelle der Arbeitszeitgestaltung. VSA-Verlag Hamburg.  
1998. S. 175 bis 184.
- Domschke et al., 2003      Domschke, W.; Scholl, A.: Grundlagen der Betriebswirtschafts-  
lehre: Eine Einführung aus entscheidungstheoretischer Sicht. 2.  
Aufl., Berlin: Springer, 2003.



- Fine et al., 1990      Fine, C. H.; Freund, R. M.: Optimal Investment in Product-Flexible Manufacturing Capacity. In: Management Science. 36 (1990) 4, S. 449 bis 466.
- Eppen et al., 1989      Eppen, G.; Martin, R.; Schrage, L.: A Scenario Approach to Capacity Planning. In: Operations Research, 37 (1989) 4, S. 517 bis 527.
- Faißt et al., 1991      Faißt, J., Günther, H.-O., Schneeweiß, Ch.: Ein Decision-Support-System zur Planung der Jahresarbeitszeit. In: Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe, Bd. 2, Springer, Berlin et al, 1991.
- Fischer et al., 2002      Fischer, Ulrich; Reihnsner, Rolf: Personalplanung. Frankfurt am Main : Bund-Verlag, 2002.
- Forrester, 1968      Forrester, J.-W.: Industrial Dynamics – After the first decade. In: Management Science, 14 (1968) 7.
- Francas, 2005      Francas, D.: Baureihenflexible Produktionsnetzwerke in der Automobilindustrie. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Logistik, Universität Mannheim, März 2005.
- Friese et al., 2004      Friese, M.; Roscher, J.; Bürkner, S.: Gestaltungskonzepte für Fabrikparks aus OEM-Sicht. In: Neue Konzepte für wandlungsfähige Fabriken und Fabrikparks. Witte, K.-W.; Vielhaber, W. (Hrsg.). Shaker Verlag 2004.
- Gagsch et al., 2001      Gagsch, B.; Herbst, C.: Ausrichtung der Montage auf den Markt mit Hilfe der Simulation. In: Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Horváth, P.; Zahn, E.: Montageplanung – effizient und marktgerecht. Berlin, Springer, 2001.
- Garg et al., 1961      Garg, A.; Milliman, P.: The aircraft progress curve – modified for design changes. In: The Journal of Industrial Engineering 12 (1961) 1, S. 23 bis 28.
- Goldberg, 1989      Goldberg, D.E.: Genetic Algorithms in Search, Optimisation, and Machine Learning. Addison Wesley, 1998.

- Günther, 1989                      Günther, H.-O.: Produktionsplanung bei flexibler Personalkapazität. C.E. Poeschel, Stuttgart, 1989.
- Haller, 1999                         Haller, M.: Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflußsysteme der variantenreichen Großserienproduktion. TU München, Dissertation, 1999.
- Hartmann, 1993                     Hartmann, M.: Entwicklung eines Kostenmodells für die Montage: Ein Hilfsmittel zur Montageanlagenplanung. RWTH Aachen, Dissertation, 1993.
- Henderson, 1974                    Henderson, B. D.: Die Erfahrungskurve in der Unternehmensstrategie, 2. Aufl., Frankfurt/New York, 1974.
- Henfling, 1987                      Henfling, M.: Lernkurventheorie – Ein Instrument zur Quantifizierung von produktivitätssteigernden Effekten, Gerbrunn bei Würzburg, Dissertation, 1987.
- Hernández, 2003                    Hernández Morales, Roberto: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 16 (2003) 149. Düsseldorf: VDI Verlag 2003.
- Herrmann, 1983                     Herrmann: Flexibel fertigen – warum eigentlich?. In: VDI-Zeitschrift 125 (1983) 8. S. 267 bis 270.
- Hieber, 1991                         Hieber, Wolfgang Lothar: Lern- und Erfahrungskurveneffekte und ihre Bestimmung in der flexible automatisierten Produktion. Verlag Franz Vahlen München, Controlling Praxis, 1991.
- Hillier et al., 2005                   Hillier, F.S; Lieberman, G.J.: Introduction to Operations Research. International Edition 2005. McGraw-Hill. 2005.
- Holweg et al., 2004                   Holweg, M.; Frits, P.: The Second Century. Cambridge: MIT Press 2004.
- Hopfmann, 1988                     Hopfmann, Lienhard: Flexibilität im Produktionsbereich: Ein dynamisches Modell zur Analyse u. Bewertung von Flexibilitätpotenzialen. Schriften zur Unternehmensplanung; Bd. 12. 1998. Zugl.: Stuttgart, Univ., Dissertation, 1988.

- Inman et al., 1997 Inman, R. R., Jordan, W. C.: Integrated Assembly Line Loading, Design and Labor Planning. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 16/No. 5, S. 315-322, 1997.
- IPA, ISST, 1997 IPA und ISST: Adaption der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur für produzierende Unternehmen mit dezentraler Struktur. Studie der Fraunhofer Institute für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) und für Software- und Systemtechnik (ISST). Stuttgart, Berlin, 1997.
- Jordan et al., 1995 Jordan, W.C.; Graves, S.C.: Principles on the benefits of Manufacturing process flexibility. *Management Science*, 41, 4 (1995) 577 bis 594.
- Kratzsch, 2001 Kratzsch, Sabine: Wirtschaftliche Automatisierung in der Fahrzeugmontage. In: *ZWF Jahrg. 96 (2001) 5*. Carl Hanser Verlag, München. S. 247 bis 251. 2001.
- Lehndorff, 1999 Lehndorff, Steffen: Überstundenabbau - geht das? In: *Institut Arbeit und Technik: Jahrbuch 1998/99*. Gelsenkirchen, S. 34 bis 48. 1999.
- Lehndorff, 2000 Lehndorff, Steffen: Die Arbeits- und Betriebszeiten in der europäischen Automobilindustrie. Graue Reihe des Instituts Arbeit und Technik 2000-13. ISSN 0949-4944. Gelsenkirchen. 2000.
- März et al., 2001 März, L.; von Langsdorff, P.: Flexibilität und Marktorientierung in der Montage. In: Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Horváth, P.; Zahn, E.: *Montageplanung – effizient und marktgerecht*. Berlin, Springer, 2001.
- McKinsey, 2004 Revolutionizing Automotive Companies' Economics. A&A Extranet RACE survey. McKinsey & Company, Berlin, 2004.
- McKinsey, 2005 Reducing Labor Costs by Managing Flexibility. By M. Dechow, T. Eichstädt, A. Hüttmann, M. Kloss, J. Mueller-Oerlinghausen. McKinsey & Company Automotive & Assembly Extranet: <https://autoassembly.mckinsey.com>. 2005.

- Milling, 2004                      Milling, Peter: Kybernetische Überlegungen beim Entscheiden in komplexen Systemen. In Peter Milling (Hrsg.): Entscheiden in komplexen Systemen. Verlag Duncker&Humblot Berlin. Mannheim, 2001.
- Mishima, 1997                      Mishima, Y.: Present State and Future Vision of Vehicle Assembly Automation in Mitsubishi Motors Corporatijon. In: Shimokawa, Hoichi; Jürgens, Ulrich; Fujimoto, Takahiro: Transforming automobile assembly: experience in automation and work organization. – Berlin, Springer, 1997.
- Nagel, 2003                         Nagel, M.: Flexibilitätsmanagement. Ein systemdynamischer Ansatz zur quantitativen Bewertung von Produktionsflexibilität. Dissertation, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2003.
- Niemann et al., 2004              Niemann, J.; Westkämper, E.: Dynamisches Life Cycle Controlling von ganzheitlichen Produktionssystemen mit erfahrungskurverbasierten Planungsverfahren. In: wt Werkstattstechnik online, 94 (2004) 10, S. 553 bis 557.
- Niimi et al., 1997                 Niimi, A.; Matsudaira, Y.: Development of a new Vehicle Addembly Line at Toyota: Worker-oriented, Autonomous, new Assembly System. In: Shimokawa, Hoichi; Jürgens, Ulrich; Fujimoto, Takahiro: Transforming automobile assembly: experience in automation and work organization. – Berlin. Springer, 1997.
- Pibernik, 2001                      Pibernik, Richard: Flexibilitätsplanung in Wertschöpfungsnetzwerken. 1. Aufl. – Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2001.
- Porter, 1985                         Porter, Michael E.: Competitive Advantage. 1985, The Free Press. New York. S. 11 bis 15.
- Prochno, 2004                       Prochno, Paulo: Learning Curve? Which One? Brazilian Administration Review, 2004, S. 54 bis 66.
- Radtke et al, 2004                 Radtke, Philipp; Abele, Eberhard ; Zielke, Andreas E.: Die smarte Revolution in der Automobilindustrie. Frankfurt/Wien: Redline Wirtschaft bei ueberreuter, 2004.

- Sage, 1992 Sage, A. P.: Systems Engineering. New York: Wiley Interscience 1992.
- Schauerhuber, 1998 Schauerhuber, M.: Produktionswirtschaftliche Flexibilität: Eine Konstruktion pekuniärer, kontextbezogener und interagierender Flexibilitätsmaße. 1. Aufl., Wien: Service-Fachverlag, 1998.
- Schieferer, 1957 Schieferer, G.: Die Vorplanung des Anlaufs einer Serienfertigung. Stuttgart, Univ., Dissertation, 1957.
- Schmigalla, 1995 Schmigalla, Hans: Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge. REFA. München, Wien; Hanser, 1995.
- Schneeweiß et al., 1990 Schneeweiß, Ch.; Kuhn, M.: Zur Definition und gegenseitigen Abgrenzung der Begriffe Flexibilität, Elastizität und Robustheit. Zeitschrift für Betriebswirtschaft Wiesbaden. Gabler, 1990.
- Schneeweiß, 1992 Schneeweiß, Christoph: Kapazitätsorientiertes Arbeitszeitmanagement. Physica-Verlage, 1992.
- Schneeweiß, 1992a Schneeweiß, Ch.: Planung 2. Konzepte der Prozess- und Modellgestaltung. Springer-Lehrbuch, 1992.
- Schneeweiß, 1999 Schneeweiß, Christoph: Hierarchies in Distributed Decision Making. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1999.
- Schraft et al., 2005 Schraft, Rolf Dieter (Hrsg.); Westkämper, Engelbert (Hrsg.); Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und mobile Roboter : Chancen, Technologie, Wirtschaftlichkeit. Neueste Erkenntnisse und Trends in Materialfluss und mobiler Automation. Fraunhofer IPA Technologieforum, 29. April 2005, Stuttgart.
- Schuh et al., 2005 Schuh, G.; Friedrich, C.; Wemhöner, N.: Flexibility Windows: A Method for Evaluating and Visualising Production Flexibility. Proceedings of the EurOMA International Conference on Operations and Global Competitiveness, Budapest, Hungary, 2005, S. 1612 bis 1621.

- Schuh et al., 2005a Schuh, G.; Wemhöner, N.; Roscher, J.; Friese, M.: Lifecycle Evaluation of Automotive Body Shops. Proceedings of the 3rd CIRP International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, MI, 2005.
- Seifert, 2001 Seifert, Hartmut: Zeitkonten: Von der Normalarbeitszeit zu kontrollierter Flexibilität. In: WSI Mitteilungen 2/2001. S. 84 bis 91. 2001.
- Sesterhenn, 2003 Sesterhenn, Lothar: Bewertungssystematik zur Gestaltug struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme. Dissertation. Shaker Verlag GmbH, 2003.
- Sethi et al., 1990 Sethi, A.K.; Sethi, S.P.: Flexibility in Manufacturing: A Survey. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2, 1990, Nr. 4, S.289 bis 328.
- Slack, 1989 Slack, N.: Focus on Flexibility. In: Wild, R. (Hrsg.): International Handbook of Production and Operations Management, Cassel Educational Ltd., London, 1989. S. 52ff.
- Tidd, 1997 Tidd, J.: Key Characteristics of Assembly Automation Systems. In: Shimokawa, K. (Hrsg.): Transforming Automobile Assembly: Experience in Automation and Work Organization, Berlin: Springer, 1997.
- Upton, 1994 Upton, D. M.: The Management of Manufacturing Flexibility. In: California Management Review. 33 (1994) 4, S. 72 bis 89. VDA: Auto Jahresbericht 2004. Frankfurt: Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), 2004.
- Vielhaber, 2004 Vielhaber, Wolfgang: Planung und Gestaltung wandlungsfähiger Satellitenfabriken und Fabrikparks. In: Neue Konzepte für wandlungsfähige Fabriken und Fabrikparks. Witte, K.-W.; Vielhaber, W. (Hrsg.). Shaker Verlag 2004.
- Wallentowitz et al., 2002 Wallentowitz, H.; Leyers, J.; Parr, T.; Dögl, R.; Schneider, W.: Technologie-Trends in der Automobilindustrie: BAIKA-Studie "Automobilzulieferer". Bayerische Innovations- und Kooperationsinitiative Automobilzulieferindustrie, 2002.

- Warburton, 2004 Warburton, M.: The Futur of the European Auto Industry. A capital market's view, 13.5.2004.
- Warnecke, 1996 Warnecke, H.-J.: Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb: Technik, Organisation, Betriebswirtschaft. Berlin: Springer, 1996.
- Westkämper et al., 2000a Westkämper, E; Zahn, E; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. In: wt Werkstattstechnik 90 (2000), H. 1/2, S. 22 bis 26.
- Westkämper, 2001 Westkämper, E.: Modulare Produkte – Modulare Montage. In: wt Werkstattstechnik 91 (2001) H. 8.
- Westkämper et al., 2001 Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Horváth, P.; Zahn, E.: Montageplanung – effizient und marktgerecht. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio. Springer, 2001.
- Westkämper, 2002 Westkämper, E.: Die Digitale Fabrik – Kontinuierliche und Partizipative Planung. In: Erfolg in Netzwerken/Joachim Milbert; Günther Schuh (Hrsg.).-1.Aufl.-Berlin: Springer, 2002, S. 247 bis 260.
- Westkämper et al., 2003 Westkämper, Engelbert; Kirchner, Sören; Winkler, Ralph: Unternehmensstudie zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen : Ergebnisse einer Unternehmensbefragung unter 200 deutschen produzierenden Unternehmen. In: wt Werkstattstechnik 93 (2003), Nr. 4, S. 254 bis 260.
- Westkämper, 2005 Westkämper, E.: Integration einer „Smart Factory“ in eine Echtzeit Produktion. 1. Industriekolloquium, 4.3.2005.
- Westkämper et al., 2005 Westkämper, E.; Roscher, J.: Bewertung flexibler Endmontagesysteme für die Automobilindustrie durch Simulation des Realbetriebs. In: wt Werkstattstechnik 95 (2005), H. 4, S. 181 bis 185.
- Wiendahl et al., 1981 Wiendahl, H.-P.; Mende, R.: Produkt- und Produktionsflexibilität – Wettbewerbsfaktoren für die Zukunft. In: Zeitschrift für industrielle Fertigung 71 (1981), S. 293 bis 296.

- Wiendahl, 1996                      Wiendahl, H.-P.: Grundlagen der Fabrikplanung. In: Eversheim, W., Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management – Betriebs-hütte, 1996. S. 9-1 bis 9-31.
- Wiendahl et al., 2001                Wiendahl, H.-P.; Reichert, J.; Hernández, R.: Kooperative Fabrikplanung - Wandlungsfähigkeit durch zielorientierte Integration von Prozess- und Bauplanung. In: wt Werkstattstechnik Online 91 (2001) 4, S. 186 bis 191.
- Wildemann, 1984                    Wildemann, H.: Investitionsplanung und Wirtschaftlichkeitsrechnung für eine flexible Produktionstechnik. In: Albach, H.; Held, T. (Hrsg.), 1984, S. 163 bis 181.
- Winston, 2004                        Winston, W.: Operations Research – Applications and Algorithms. Duxbury, Belmont, 2004.
- Witte et al., 2004                    Witte, K.-W.; Bruch, N.; Bürkner, S.; Friese, M.: Strategien und Werkzeuge zur Integration von Satellitenfabriken und Fabrikparks in mehrstufigen Produktionsnetzen. In: wt Werkstattstechnik Online, 94 (2004), H. 4, S. 162 bis 165.
- Witte et al., 2005                    Witte, K.-W.; Vielhaber, W.; Ammon, C.: Planung und Gestaltung wandlungsfähiger und wirtschaftlicher Fabriken. In: wt Werkstattstechnik online. 95. Jg., 2005, Nr. 4, S. 227 bis 231.
- Wolf, 1989                            Wolf, J.: Investitionsplanung zur Flexibilisierung der Produktion. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 1989.
- Wunderlich, 2002                    Wunderlich, Jürgen: Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme. Erlangen, Nürnberg, Univ., Dissertation, 2002.
- WVS, 2000                            Wirtschaftvereinigung Stahl: Arbeitszeitflexibilisierung – Beschreibung und Beurteilung von Flexibilisierungsinstrumenten mit Empfehlungen und Praxisbeispielen. Hsg: Wirtschaftsvereinigung Stahl, Abteilung Arbeits- und Sozialpolitik. Düsseldorf. 2000.



- 
- Zäh et al., 2005                      Zäh, M. F., Sudhoff, W., Moeller, N.: Quantitative Modeling of Mobile Production Scenarios. 38<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems 2005. Florianopolis / Brazil, 16. - 18. Mai 2005.
- Zeile, 1995                              Zeile, Ulrich: Montagestrukturplanung für variantenreiche Serienprodukte. Dissertation. Springer-Verlag, 1995.

## Lebenslauf Jörg Roscher

### Persönliche Daten

Geburtsdatum 27.09.1976  
Geburtsort Würzburg  
Staatsangehörigkeit deutsch/französisch  
Familienstand verheiratet

### Berufserfahrung

Seit 12/05 **Porsche Consulting GmbH**, Bietigheim-Bissingen,  
Geschäftsprozessoptimierung  
11/02 – 11/05 **DaimlerChrysler AG**, Forschungszentrum Ulm,  
Projekte im Bereich Produktionsmanagement

### Akademische Ausbildung

12/02 – 11/07 **Universität Stuttgart**, Institut für Industrielle Fertigung und  
Fabrikbetrieb, Promotion  
10/96 – 10/02 **Universität Karlsruhe (TH)**, Wirtschaftsingenieurwesen,  
Abschluss: Diplom-Wirtschaftsingenieur  
09/00 – 08/01 **INSA de Lyon, Frankreich**, Produktionswirtschaft,  
Abschluss: Diplôme d'Etudes Approfondies DEA  
07/87 – 06/96 Max-Planck-Gymnasium Karlsruhe,  
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife



Jörg Roscher  
Ludwigsburg, den 12.12.2007