



## HEURISTIK ZUR STEUERUNG KOMPLEXER MONTAGESYSTEME MIT FLEXIBLER RESSOURCENZUTEILUNG UND -LEISTUNG UND BEGRENZTER RESSOURCENKAPAZITÄT

**Auftraggeber:** Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen  
"Otto-von-Guericke" e.V. (AiF) im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

**Auftragnehmer:** Technische Universität Dresden  
Forschungsstelle 1:  
Fakultät Maschinenwesen  
Professur Technische Logistik  
Forschungsstelle 2:  
Fakultät Informatik  
Professur Modellierung und Simulation

**Bearbeiter:** T. Schmidt, O. Rose, M. Völker,  
S. Carl, D. Noack, E. Angelidis,  
F. Pappert

**Datum:** Dresden, 25.08.2009

Schlussbericht des aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto-von-Guericke" e.V. (AiF) im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. geförderten Forschungsvorhaben (AiF-Nr. 15522 BR).

**Herausgegeben von:**

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt  
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme  
Professur für Technische Logistik  
Telefon: +49 351 463-32538  
Telefax: +49 351 463-35499  
Email: [thorsten.schmidt@tu-dresden.de](mailto:thorsten.schmidt@tu-dresden.de)  
<http://tu-dresden.de/mw/tla>  
Technische Universität Dresden

Prof. Dr. rer. nat. Oliver Rose  
Institut für Angewandte Informatik  
Professur Modellierung und Simulation  
Telefon: +49 351 463-38360  
Telefax: +49 351 463-39688  
Email: [oliver.rose@inf.tu-dresden.de](mailto:oliver.rose@inf.tu-dresden.de)  
<http://simulation-dresden.de>  
Technische Universität Dresden

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch nur auszugsweise – vorbehalten.

---

# Inhaltsverzeichnis

## Abbildungsverzeichnis

## Abkürzungsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>1.1</b> Ausgangssituation	2
<b>1.2</b> Beschreibung der Problemstellung	2
<b>1.3</b> Erhöhte Anforderungen für die Logistik	6
<b>1.4</b> Wissenschaftliche Zielstellung und angestrebte Forschungsergebnisse	7
<b>1.5</b> Lösungsweg zur Erreichung des Forschungszieles	7
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b> Definitionen elementarer Begriffe des Forschungsprojektes	10
<b>2.2</b> Arten und Formen von Montage	12
<b>2.3</b> Charakteristische Merkmale komplexer Montageprozesse	15
<b>2.4</b> Anforderungen an moderne PPS-Konzepte	16
<b>2.5</b> Stand der Forschung	18
<b>3 Lösungsansatz der simulationsbasierten Heuristik</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b> Struktureller Aufbau	21
<b>3.2</b> Funktionsweise und Ablauf des Verfahrens	22
3.2.1 Ablauf und Datenfluss	22
3.2.2 Konzept und Umsetzung der Ablaufsteuerung	22
3.2.3 Verwaltung der LogObjekte	22
3.2.4 Verändern der Simulationseinstellung	23
3.2.5 Planbewertung	23
3.2.6 Zyklusende	23
3.2.7 Nutzerinteraktion und Datenausgabe	23
<b>3.3</b> Funktionsweise des Verfahrens	23
<b>3.4</b> Optimierungsalgorithmen	25
3.4.1 Erste Stufe: Initialisierung der Vorgangsmodi	26
3.4.2 Zweite Stufe: Senken der Personalressourcen	27
3.4.3 Zielfunktion	30
3.4.4 Abbruchkriterium	31
<b>3.5</b> Bewertung der simulationsbasierten Heuristik	33
3.5.1 Experimente Stufe 1	33
3.5.2 Experimente Stufe 2	36
<b>4 Modellierung der Fallbeispielprozesse und Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b> Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse	42
<b>4.2</b> Prozessanalyse ausgewählter Produkttypen	43
<b>4.3</b> Beschreibung von Montage-Prozessmodellen	45
<b>4.4</b> Optimierungsziele und Restriktionen der Fallbeispiele	49

<b>4.5</b>	Simulationsergebnisse – Potentiale und Effekte	51
<b>4.6</b>	Abschließende Bewertung des Forschungsprojektes	53
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und resultierender Forschungsbedarf</b>	<b>55</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>57</b>

## Abbildungsverzeichnis

<b>Bild 1:</b> Beispiel Montagearbeitsplan mit detaillierter Personal-, Vorrichtungs-, Bauteil- und Baugruppen-Zuordnung .....	3
<b>Bild 2:</b> Taktmodell mit 18 Taktstationen und 3 Takten pro Schicht.....	4
<b>Bild 3:</b> Visualisierung des Kapazitätsbedarfes für drei parallele Montagestationen .....	4
<b>Bild 4:</b> Abstrahierter Vorgangspfeilnetzplan für die Endmontagealternativen einer kundenspezifischen Großmaschine .....	6
<b>Bild 5:</b> Arbeitsschritte und Personaleinsatz des Forschungsvorhabens .....	9
<b>Bild 6:</b> Planungsaktivitäten und Vorgehensweise der PPS .....	11
<b>Bild 7:</b> Komplexität des Montageobjektes .....	12
<b>Bild 8:</b> Organisationsformen der Montage .....	13
<b>Bild 9:</b> Klassifizierung von Montagesystemen .....	15
<b>Bild 10:</b> Anforderungskatalog für moderne PPS-Konzepte .....	18
<b>Bild 11:</b> Struktureller Systemaufbau .....	21
<b>Bild 12:</b> Programmablaufplan.....	22
<b>Bild 13:</b> Stufendifferenzierter Ablauf .....	24
<b>Bild 14:</b> Vorgangsmodi.....	26
<b>Bild 15:</b> Restzeit.....	27
<b>Bild 16:</b> Unterschiedliche Ressourcenauslastung.....	28
<b>Bild 17:</b> Schema Vorgangsänderung .....	29
<b>Bild 18:</b> Analyse der Zielfunktion .....	31
<b>Bild 19:</b> Abbruchkriterium.....	33
<b>Bild 20:</b> Experimente zu den Jobauswahlregeln der ersten Stufe .....	34
<b>Bild 21:</b> Entwicklung der Auftragsregeln über mehrere Schleifen.....	35
<b>Bild 22:</b> Experimente zu den Betriebsmittelregeln der ersten Stufe .....	35
<b>Bild 23:</b> Rechenzeit der Modelle .....	36
<b>Bild 24:</b> Experimente zur auslastungsbasierten Restzeitverteilung .....	37
<b>Bild 25:</b> Kennwerte eines Modells.....	38
<b>Bild 26:</b> Experimente aller Modelle zur Restzeitverteilung .....	38
<b>Bild 27:</b> Experimente zum Vergleich der Verteilungsalgorithmen.....	39
<b>Bild 28:</b> Experimente zur auslastungsbasierten Restzeitverteilung .....	39
<b>Bild 29:</b> Experiment zum Abbruchkriterium .....	40
<b>Bild 30:</b> Personalverteilung eines Modells nach Stufe 2.....	41
<b>Bild 31:</b> PPS-Gestaltung des Fallbeispiels .....	43
<b>Bild 32:</b> Typologie und Merkmalsausprägungen eines Fallbeispiels .....	44
<b>Bild 33:</b> Unterscheidung alternativer Prozessabläufe in der Netzplannotation .....	45
<b>Bild 34:</b> Vorgehensweise der Prozessmodellierung .....	47
<b>Bild 35:</b> Prozessgraph eines Fallbeispiels.....	48
<b>Bild 36:</b> Beispielnetzplan einer Großbaugruppe.....	49
<b>Bild 37:</b> Optimierungsziele der Planung und Steuerung komplexer Montageprozesse .....	50
<b>Bild 38:</b> Zusammenfassung der Simulationsergebnisse .....	51
<b>Bild 39:</b> Ergebnisvisualisierung mittels Gantt-Diagramm „Termine“ .....	52
<b>Bild 40:</b> Ergebnisvisualisierung mittels Gantt-Diagramm „Ressourcen“ .....	53

**Bild 41:** Erfüllungsgrad der Anforderungen ..... 54

---

## Abkürzungsverzeichnis

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V.
BMWA	Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit
BVL	Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.
DLZ	Durchlaufzeit
ERP	Enterprise Resource Planning
JIS	Just-in-sequence
JIT	Just-in-time
NP	Nichtdeterministisch polynomielle Zeitkomplexität
OR	Operations Research
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
VKN	Vorgangsknotennetzplan
VPN	Vorgangspfeilnetzplan
ZF	Zielfunktion

# 1. EINLEITUNG

## 1.1 AUSGANGSSITUATION

In einer immer schnelllebigeren Zeit mit sich stetig verkürzenden Technologie- und Entwicklungszyklen stehen die Unternehmen heute anderen Anforderungen gegenüber als noch vor einigen Jahren. Komplexer werdende Produkte in wachsender Vielfalt, die Befriedigung individueller Kundenbedürfnisse bei steigendem Konkurrenzdruck und unsichere Märkte stellen eine Realität dar, die auch veränderte Ansprüche an eine effiziente Planung, Steuerung und Überwachung der Montageprozesse stellt.

Angesichts dieser Situation sind die Unternehmen gezwungen, innovative Konzepte und Technologien anzuwenden, mit deren Hilfe sie in der Lage sind, die gesteigerte Komplexität der Prozesse zu beherrschen und mit einem hohen Maß an Flexibilität und Reaktionsvermögen auf sich dynamisch verändernde Verhältnisse zu reagieren. Insbesondere hinsichtlich des Ressourceneinsatzes sind wesentliche Flexibilitäts- und Produktivitätspotentiale vorhanden, die bisher noch nicht optimal ausgeschöpft werden.

Charakteristika komplexer Montageprozesse sind meist stark vernetzte Montageprozessstrukturen mit einer großen Anzahl von in der Abfolge variierbaren Arbeitsgängen, die ggf. eine Parallelbearbeitung am Produkt ermöglichen. Zudem fordern zugehörige Montagesysteme flexibel einsetzbare manuelle und technische Ressourcen (vgl. Evers, 2002). Die hohe Komplexität des Montageprozesses resultiert aber auch aus kundenspezifisch variierenden Produkten, die zeitlich parallel in einer Montagehalle durch ein spezifisches Mitarbeiterteam (Teilautonome Arbeitsgruppe) möglichst effizient zu montieren sind. Typisch ist dies vor allem für den Maschinen-, Anlagen- und Großfahrzeugbau. Es kann somit von einer Auftragsfertigung mit großer konstruktiv-struktureller Individualität der Erzeugnisse ausgegangen werden.

Niedrige Stückzahlen und komplexe Montageprozesse erfordern oft speziell ausgerüstete Montagestationen, hier Bauplätze genannt, und verhindern somit eine flexible, wahlfreie Belegung dieser. Ein hohes Maß an Flexibilität ist jedoch notwendig, um die auftragsspezifischen Arbeitsmengenschwankungen zwischen den einzelnen Bauplätzen auszugleichen. Fundamentales Stellglied hierfür ist die Variation der Mitarbeiterressourcen.

Notwendig ist folglich ein Werkzeug bzw. ein Optimierungsverfahren, das die Flexibilität des Mitarbeiterereinsatzes zum Ausgleich von Bedarfsschwankungen umfassend nutzt und gleichzeitig eine weitgehende Ressourcenbedarfsglättung realisiert. Ein derartiges Planungssystem erfordert eine praxisnahe und effiziente Modellierung des Montageprozesses sowie ein analytisches oder heuristisches Optimierungsverfahren mit kurzen Berechnungszeiten und hinreichend hoher Lösungsgüte.

Das hier vorgestellte Forschungsvorhaben (AiF-Nr. 15522 BR) trägt den Titel: „Heuristik zur Steuerung komplexer Montagesysteme mit flexibler Ressourcenzuteilung und -leistung und begrenzter Ressourcenkapazität“ (Kurztitel: MontageSteuerung). Es wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. gefördert.

## 1.2 BESCHREIBUNG DER PROBLEMSTELLUNG

In der Einzel- oder Kleinserienfertigung von Maschinen und Anlagen spielt die Montageautomatisierung bis heute eine untergeordnete Rolle. Ein Grund dafür sind die enormen Aufwendungen zum automatisierten Handling der Bauteile und Baugruppen sowie die teils komplizierte Geometrie der Teile und Einbauräume. Ein weiterer Grund besteht in der zu-

nehmend geforderten Produktvarianz: Dem Kunden bietet sie eine individuelle Konfiguration seiner Maschine – für den Hersteller aber bedeutet sie erhebliche Anforderungen an die Montageautomatisierung. Aktuelle, internationale Publikationen (vgl. Meinberg und Gröblichhoff, 2006) zeugen von einer intensiven Suche nach Lösungen zur Verbesserung dieser Situation.

Klassische Rationalisierungskonzepte zur Optimierung der Montage zielen primär auf die permanente Senkung der Montagezeiten. REFA-Studien, MTM-Zeitanalysen und andere Verfahren ermöglichen darüber hinaus eine Systematisierung der Verrichtungen und darauf basierend, die Bildung standardisierter, modularisierter Montagearbeitspläne (vgl. **Bild 1**).

AG Nr.	Zeit	MA	Werkzeuge	Vorrichtungen	Hilfsstoffe	Foto	Kran	Bemerkung
4280	08:39 08:43 00:04	B						
4220	08:57 08:64 00:07	A						
4230	09:04 09:10 00:06	A	Zange, Hammer, Maß, Inbus		Lochte	PS200065.JPG		
4234	09:16 09:21 00:05	A		Balancier				
4240	09:30 09:34 00:04	A				PS200063.JPG	X	
4250	09:34 09:39 00:05	A		Solraubendreher,	Lochte	PS200070.JPG		
4250	09:39 09:41 00:02	H						
4270	09:41 09:51 00:10	A	Hammer, Durchschlag,	Federvahrmesser mit "Lederband"		PS200072.JPG		
4280	09:51 09:53 00:02	H						2 min zu zweit
4280	09:53 09:58 00:05	A	Schlauchzange, Solraubendreher			PS200077.JPG		Verlegen durch Fingerschutz m. H. von Druckluft kompliziert -> Radius der Abkantung des Bleches muss größer sein
4300	09:58 10:14 00:16	A				PS200074.JPG		
4390	10:14 10:18 00:05	A						
4320	10:19 10:22 00:03	H						
4330	10:22 10:36 00:14	A	Ratsche, Fühlerlehre, Inbus, Drehmo, Maul					
4340	10:36 10:38 00:02	H						
4350	10:38 10:41 00:03	A						
4360	10:41 10:57 00:16	A	Inbus		Lochte	PS200063.JPG		
4370	10:57 11:10 00:13	PVZ						
4380	11:10 11:16 00:06	A						
4380	11:17 11:55 00:38	H						
4350	11:55 12:05 00:10	A						
4395	12:05 12:08 00:03	A	Reibahle		Druckluft			Bohrungen müssen vorher passen!
4400	12:09 12:14 00:05	A	Hammer		Lochte			
4410	12:14 12:18 00:04	B	Inbus, Ratsche		Lochte	PS200065.JPG		
4420	12:18 12:34 00:16	A	Ratsche, Drehmo		Lochte	PS200060.JPG		
4430	12:34 12:37 00:03	A	Reibahle,		Druckluft			
4440	12:37 12:39 00:02	A	Hammer		Lochte			warten auf 2. MA

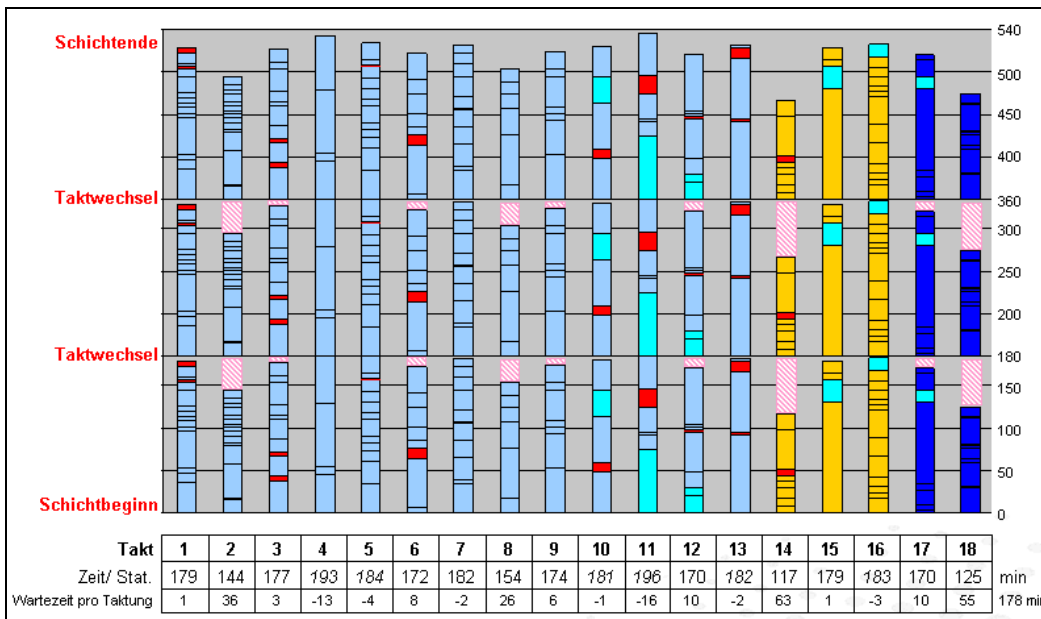
**Bild 1:** Beispiel Montagearbeitsplan mit detaillierter Personal-, Vorrichtungs-, Bauteil- und Baugruppen-Zuordnung (Quelle: Koenig & Bauer AG, 2006)

Maschinen und Anlagen werden seit vielen Jahren überwiegend in konventionellen sog. „Bauplatzmontagen“ endmontiert. Ein neuerer Weg zur Erschließung weiterer Produktivitätsreserven besteht in der Einrichtung getakteter bzw. kontinuierlicher Fließmontagen, analog zur Großserienfertigung von Fahrzeugen und anderen Massenprodukten. Die Fließmontage erlebt seit einem halben Jahrzehnt auch im Maschinen- und Anlagenbau geradezu eine Renaissance (vgl. Gildemeister, 2007). Die Effektivität und Produktivität einer Montagelinie hängt jedoch von vielfältigen Faktoren ab, wie eine kürzlich durchgeführte Analyse von Fließfertigungen über ein ausgewähltes Produktspektrum ergab (vgl. Herhold et al., 2006). Die Kernaussage dieser Analyse lautet komprimiert: „Die Fertigung variantenreicher Maschinen und Anlagen in Klein- oder Mittelserie ist prinzipiell am wenigsten für eine Fließfertigung geeignet.“ Insbesondere wenn in einem Unternehmen bereits eine hohe Produktivität bzw. Effektivität der Montage erreicht wurde, kann der Übergang zur Fließfertigung ohne gleichzeitige Entwicklung bzw. Einführung neuer innovativer Organisationskonzepte sogar zu einer Verschlechterung des erreichten Effektivitätsgrades führen.

Fließfertigung bedeutet im klassischen Sinne: „maximale Harmonisierung der Produktion“ und war früher meist mit der Gestaltung eines: „ausgetakteten Systems“ mit identischen Taktzeiten an allen Stationen verbunden. Diese Charakteristik steht jedoch in krassem Widerspruch zu aktuellen Forderungen nach hoher Produktvarianz bei schwankender Nachfrage.

Theoretische Untersuchungen im Rahmen eines Projektfallbeispiels zur Einführung einer getakteten Großbaugruppen-Fließmontage bei gleichzeitig erhöhtem Produktspektrum in

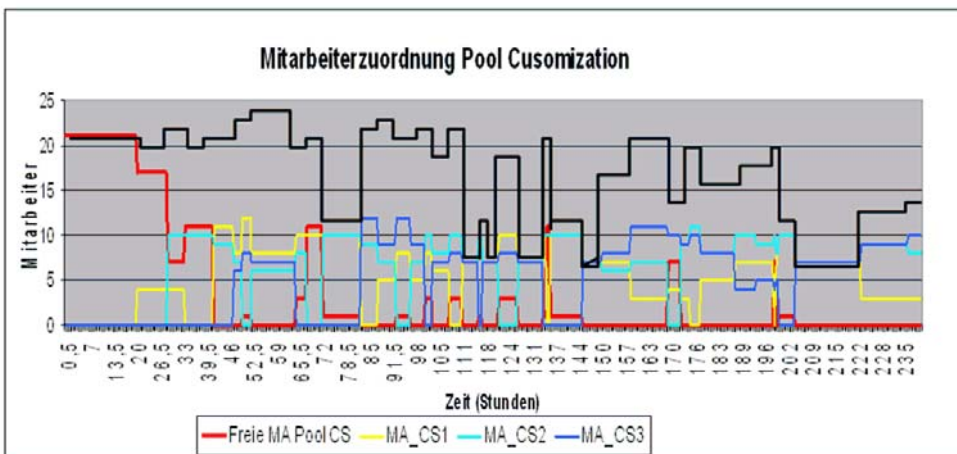
Verbindung mit konventioneller Arbeitsorganisation ergaben keine befriedigenden Ergebnisse, da das optimal mit dem Arbeitsplan sowie den technischen Montagerestriktionen harmonisierende Taktmodell Taktzeiten von ca. 180 min erfordert (3 Takte pro Schicht, vgl. **Bild 2**). Montagebrachzeiten sind rosa gekennzeichnet.



**Bild 2:** Taktmodell mit 18 Taktstationen und 3 Takten pro Schicht (Quelle: Herhold et al., 2006)

Einige Takte können bezüglich des Arbeitsinhaltes nicht voll aufgefüllt werden. Zusätzlich schwankt das Arbeitsvolumen in ausgewählten Takten aufgrund der Produktvarianz erheblich. Darüber hinaus benötigen mehrere Takte speziell qualifizierte Mitarbeiter, deren Arbeitsvolumen ebenfalls nicht taktfüllend ist. Das Resultat sind periodische, mehrfach je Schicht auftretende „Montage-Brachzeiten“ für das Personal. Außerdem ist eine extrem flexible (anspruchsvolle) Personaleinsatzplanung erforderlich.

Aus einem derartigen Montageorganisationsmodell resultieren Ressourcenanforderungsprofile für das Personal mit erheblich variierenden Bedarfsganglinien (insbesondere für spezielle, hochqualifizierte Mitarbeiter). **Bild 3** zeigt die Ergebnisgraphik einer Simulationsstudie von Flemming et al. (2006), die im Rahmen eines weiteren Fallbeispielprojektes: „Fließfertigung von Großbaugruppen“ realisiert wurde. Sie verdeutlicht dieses Problem eindrucksvoll.



**Bild 3:** Visualisierung des Kapazitätsbedarfes für drei parallele Montagestationen

Ein Lösungsansatz zum „Glätten“ (Ausfüllen) der Kapazitätsbedarfslinien besteht in der Kopplung der Endmontage mit der Baugruppen-Vormontage. Mitarbeiter pendeln zwischen diesen unmittelbar benachbarten Bereichen und füllen somit ihren vorhandenen Arbeitszeitfonds voll aus. Dieser Ansatz wurde mit Hilfe eines weiteren Simulationsmodells untersucht. Im Ergebnis zeigte sich, dass eine extrem dynamische Einsatzorganisation der Mitarbeiter erforderlich wäre. Dies ist jedoch praxisfremd. Die Umsetzung dieses Konzeptes ohne permanentes „Springen“ der Mitarbeiter bedeutet aber prinzipiell eine Verschlechterung der Produktivität (ca. 15%), selbst wenn durch typische „Trainingseffekte“ einer Fließmontage Potentiale zur Senkung der Verrichtungszeit erschlossen werden.

In Auswertung verschiedener Praxisstudien, analytischer Untersuchungen sowie Simulationsstudien kann resümiert werden, dass das Nichtbeherrschen der beschriebenen Problemstellung sowohl in

- *stationären Montagen* (die Mitarbeiter unterschiedlicher Qualifikation pendeln zwischen den Stationen) als auch in
- *Fließmontagen* (das Produkt und die Mitarbeiter, insbesondere die speziell qualifizierten, fließen)

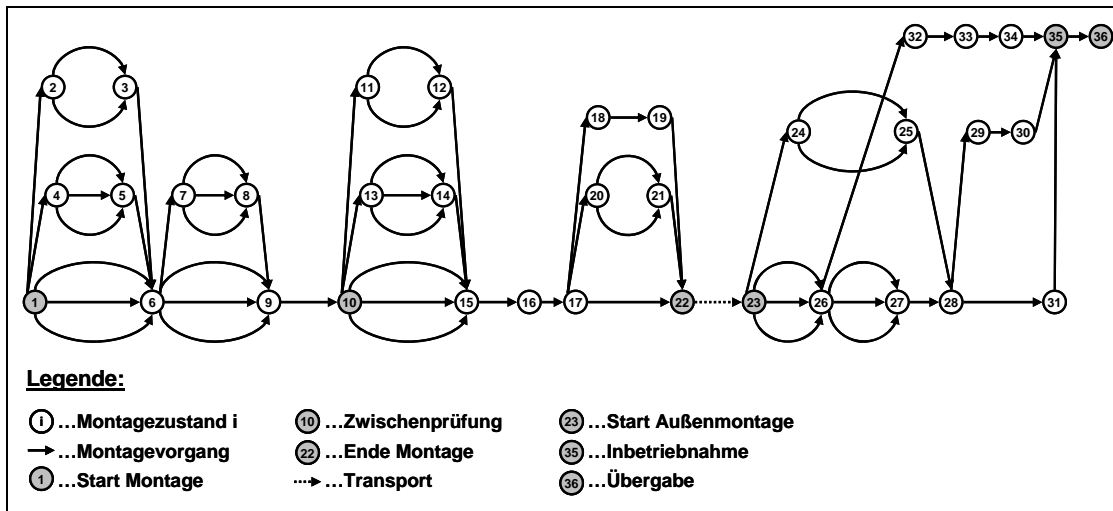
zu effektiven Montagezeitverlängerungen (Kostensteigerungen) von 10 % bis zu 30 % führen. Bei der Planung von Fließfertigungen mit ihren spezifischen Restriktionen werden diese möglichen Verluste am stärksten sichtbar, so dass diverse Unternehmen der Maschinen- und Anlagenbaubranche diesem Konzept gegenwärtig noch ablehnend gegenüberstehen. Die klassische „Standmontage“ bietet noch immer die größten Potentiale hinsichtlich einer Verlustzeitminimierung. Dazu werden permanent „Überbestände“ in die Produktion eingeplant. Somit bieten sich für jeden Mitarbeiter zu jedem Zeitpunkt, ggf. an mehreren Standorten, Ressourcenbedarfe, die durch einen Meister oder Gruppensprecher operativ zugeteilt werden. Gleichzeitig „entschärft“ sich damit das Problem der permanenten Verrichtungsreihenfolgeoptimierung – um den „Preis“ (erheblich) erhöhter Bestände und längerer Auftragsdurchlaufzeiten. In einem der untersuchten Fallbeispiele aus der Druckmaschinenbranche beträgt der Anteil permanent eingeplanter Überbestände 35-40 %.

Kombiniert wird dieses Vorgehen oft mit der Bildung sog. „Teilautonomer Arbeitsgruppen“ (TAG) – eine in vielen Montagebereichen größerer Unternehmen seit Jahren etablierte Form der Arbeitsorganisation. Berücksichtigt man jedoch die permanenten operativen Störungen im täglichen Arbeitsprozess, stößt auch diese Form der Arbeitsorganisation schnell an ihre Grenzen.

Eine wesentliche Grundlage von Simulationsstudien sind geeignete Prozessmodelle. Die Netzplantechnik ist in hervorragender Weise geeignet, komplexe Prozesse mit vielen Alternativen abzubilden. **Bild 4** zeigt z.B. den abstrahierten Vorgangspfeilnetzplan für die Endmontagealternativen einer kundenspezifischen Großmaschine. Mit Hilfe von Vorgangspfeilnetzplänen lässt sich die Problematik des alternativen Ressourceneinsatzes modellieren und visualisieren, insbesondere wenn differenzierte, kapazitiv begrenzte Mitarbeitergruppen spezieller Qualifikation in Reihenfolgevarianten zuzuteilen sind. Alternativen beziehen sich dabei auf die Mitarbeiteranzahl und -qualifikation im Arbeitsgang, Verrichtungsreihenfolgen und Montagestationen.

Die oben beschriebenen Simulationsstudien bestätigen sowohl für die Stand- als auch für die Fließmontage die Existenz eines komplexen „Multiressourcen-Zuteilungsproblems“. Aus Sicht der Operationsforschung handelt es sich dabei um ein erweitertes „Knapsack-Optimierungsproblem“ (vgl. Domschke und Drexl, 2005), speziell um ein so genanntes Multi-Mode Resource-Constraint Project-Scheduling Problem, kurz MRCPSP. Zur generellen Lösung dieses Problems laufen in den beantragenden Forschungseinrichtungen seit längerem Untersuchungen. Die bisher erarbeiteten Lösungen für die Montageoptimierung basieren

auf der kombinatorischen Optimierung in Verbindung mit Branch-and-Bound-Ansätzen. Die damit erzielbare Qualität der Planungsergebnisse stellt jedoch bei weitem nicht zufrieden.



**Bild 4:** Abstrahierter Vorgangspfeilnetzplan für die Endmontagealternativen einer kundenspezifischen Großmaschine

### 1.3 ERHÖHTE ANFORDERUNGEN FÜR DIE LOGISTIK

Die Optimierung der Montageablauforganisation konventioneller Montagesysteme und insbesondere der Übergang zur getakteten Fließfertigung unter Berücksichtigung der Prinzipien der „Lean Production“ stellen erhöhte Anforderungen an die Bereitstellungslogistik. Die Optimierung der operativen Montagesteuerung ist nur sinnvoll unter gleichzeitiger Berücksichtigung der „versorgenden“ Logistikketten.

Die o.g. Simulationsstudien lieferten u.a. ein Protokoll der Bedarfsanforderungen für A- und B-Teile in den Einzeltakten. Dabei wurde deutlich, dass an verschiedenen Takten (wegen räumlicher Beschränkungen) nur Teilmengen für einen Takt bereitgestellt werden können, was eine neue Anforderung an die Organisation und Steuerung der Bereitstellungslogistik bedeutet. Die Bereitstellung erfolgt für A- und B-Teile überwiegend über einen Marktplatz, dessen Bestand im Zusammenhang mit der Einführung des neuen Konzeptes reduziert werden soll. Die Anwendung des „Kitting“-Verfahrens (Muckelberg, 2006) in Verbindung mit dem „Postponement-Konzept“ (Cohen und Roussel, 2006) kann hier zu bedeutsamen Effekten führen. Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung eines solchen Konzeptes ist jedoch die Entwicklung und Einführung eines Montageleitsystems, das in Abhängigkeit vom wöchentlichen Produktionsplan (Produktspektrum) die manuellen Montageressourcen und die Bereitstellungslogistik plant und steuert sowie operativ auf Störungen bzw. Auftrags-Umdisponierungen reagiert.

Ein solchen Leistungsanforderungen genügendes Montageleitsystem kann in Verbindung mit direkter Synchronisation der Vormontagen und einem optimierten Logistikkonzept tatsächlich zu einem Produktivitätssprung in der Montage führen.

#### Fazit

Insbesondere den klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) fällt es schwer, das beschriebene „Optimierungsproblem der Montage“ in der täglichen Produktionspraxis zu lösen. Teilweise selbst erstellte einfache Kapazitätsplanungstools sind meist unterentwickelt (auf Basis von Tabellenkalkulationssoftware) und berücksichtigen die zeitliche Reihenfolgeproblematik der Kapazitätzuweisung in unzureichender Weise. Folglich wird in der Praxis überwiegend erfahrungs- und meisterbereichsorientierte, operative Montageplanung und -

steuerung auf Basis von Überbeständen betrieben. Gleichzeitig liefert die „Montageversorgungslogistik“ oftmals bereits Just-in-time (JIT) beziehungsweise Just-in-sequence (JIS) direkt an den Verbaupunkt – die Situation in den vorhergehenden Logistikketten zeichnet sich jedoch durch Überbestände und eingeschränkte Reaktionsfähigkeit aus, weil die Dynamik der Montage nicht ausreichend prognostizierbar ist.

Analysen und Umfragen im Rahmen von Industrieprojekten ergaben, dass ein „beherrschbares“ Tool mit den beschriebenen Funktionen notwendig ist, um eine permanente Kostenminimierung zu gewährleisten.

## **1.4 WISSENSCHAFTLICHE ZIELSTELLUNG UND ANGESTREBTE FORSCHUNGSERGEBNISSE**

### Angestrebte Forschungsergebnisse

Forschungsziel ist die Entwicklung einer neuen heuristischen Methode zur optimierten Planung und Steuerung der auftragsspezifischen Einzel- und Kleinserienmontage variantenreicher Produkte mit disponiblen und fixen, manuellen sowie technischen Ressourcen und der Nachweis ihrer Leistungsfähigkeit anhand praxisrelevanter Einsatzfälle. Damit soll die Grundlage für die Entwicklung praxisingerechter Planungswerkzeuge für einen breiten Anwenderkreis im mittelständischen Maschinen- und Anlagenbau geschaffen werden. Der Einsatz ist nur in Verbindung mit modernen, flexiblen Arbeitsorganisationsmodellen (teilautonome Arbeitsgruppen) sinnvoll, zu deren Weiterentwicklung dieses Forschungsprojekt einen Beitrag leisten soll.

Mit dem neuen Verfahren soll die klassische Trennung der Organisationsmethoden und Steuerungsverfahren von Stand- und Fließmontage aufgehoben und eine konsistente Behandlung beider Szenarien ermöglicht werden.

Das Entwicklungsergebnis (Methode, Heuristik) soll allgemeingültig eine Klasse von Optimierungsproblemen lösen und ist nicht auf eine bestimmte Produktbranche oder einen bestimmten Anwenderkreis begrenzt.

### Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Der bisher beschrittene Weg zur Problemlösung in Form des Einsatzes der dynamischen Simulation oder einer Methodenkombination von Netzplantechnik und kombinatorischer Optimierung führte bei komplexen Montagesystemen nicht zu befriedigenden Ergebnissen. Bisher wurde kein Lösungsansatz (Algorithmus) für das beschriebene NP-schwere Optimierungsproblem zur Erzielung „nahe-optimaler“ Lösungen in akzeptabler Rechenzeit in der Fachliteratur veröffentlicht. Auch vorhandene kommerzielle Tools sowie publizierte Lösungsansätze aus dem Bereich der naturanalogen Verfahren lassen sich auf das Problem nicht anwenden. Es wird folglich eine Methodik (Heuristik) entwickelt, die bekannte, leistungsfähige Lösungsverfahren des Operations Research (OR) in bisher nicht bekannter oder praktizierter Weise so kombiniert, dass eine völlig neue Leistungs- und Ergebnisqualität erreicht wird.

## **1.5 LÖSUNGSWEG ZUR ERREICHUNG DES FORSCHUNGSZIELES**

### Methodischer Ansatz

Das zu entwickelnde Lösungskonzept für komplexe Montagesysteme kombiniert die Lösungsansätze:

- Netzplantechnik und Graphentheorie,
- Dynamische Optimierung,
- Dispatching sowie

- ereignisorientierte Simulation.

Es basiert auf der Nutzung eines schnellen, objektorientierten, speziell für komplexe Scheduling-Probleme in der Halbleiterproduktion entwickelten Simulators. Eine dreistufige iterative Heuristik steuert dabei den Optimierungsprozess. Die Lösungssuche erfolgt unter Trennung von Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzproblem durch eine schrittweise, iterative Optimierung mit variierenden Zielen und Restriktionen. Hierbei definieren die Primärlösungen zunächst die Grenzen des Lösungsraumes. Erst im Anschluss daran beginnt die eigentliche Optimierung. Dispatching-Methoden ermöglichen die Erstellung operativer Personaleinsatzpläne innerhalb weniger Minuten auf einem Standard-PC.

### Arbeitsschritte und Personaleinsatz

Für den geplanten zeitlichen Ablauf der Bearbeitung des Forschungsvorhabens waren folgende Aktivitäten und ein entsprechender Mitarbeiterereinsatz in den einzelnen Arbeitspaketen vorgesehen:

- 1 Prozessanalyse (Analyse von Produkt-, Prozess- und Produktionssystemdaten in einer repräsentativen Auswahl von Praxispartnern), Spezifizierung von Fallbeispielen, Definition messbarer Zielkriterien)
- 2 Beschreibung von Montage-Prozessmodellen (Definition verallgemeinerter Klassen und Zielfunktionen auf Grundlage der vorangegangenen Prozessanalyse), Systematisierung von Produktvarianten, Formen der Aufbau- und Ablauforganisation sowie Systemlast- und Störungsszenarien)
- 3 Entwicklung einer Methode zur Erstellung von Standard-Prozessgraphen-modellen für komplexe Montageprozesse auf Basis der Graphentheorie und Netzplantechnik (Abbildung der Montage-Prozessmodelle in Form von Software-Datenstrukturen)
- 4 Konzipierung des Gesamtsystems, Entwicklung und Erprobung der einzelnen Module
- 5 Applikation der Fallbeispiele (Erstellung von Prozessgraphen für die bei der Prozessanalyse spezifizierten Fallbeispiele), Aufbau entsprechender Datentabellen und Spezifizierung von Schnittstellen zu ERP-Systemen (Produktdaten, Stücklistendaten, Arbeitsplandaten, Auftragsdaten mit Mengen und Terminen)
- 6 Konfiguration des Gesamtsystems einschließlich Simulator, Test der Schnittstellen und Funktionsnachweis
- 7 Erprobung und Leistungsbewertung des Gesamtsystems anhand der Fallbeispiele
- 8 Transfer (Implementierung und Test von Referenzanwendungen im industriellem Umfeld bei ausgewählten Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses), Systemoptimierung, Leistungsnachweis, Erstellung einer Dokumentation und eines Handlungsleitfadens, Veröffentlichung der Forschungsergebnisse

Das nachfolgende Arbeitsdiagramm zeigt den Personaleinsatz im Forschungsprojekt (vgl. **Bild 5**). Die Projektbearbeitung erfolgte durch je einen wissenschaftlichen Mitarbeiter von der Professur für Technische Logistik (hellgrau) und von der Professur für Modellierung und Simulation (dunkelgrau). Der Projektablauf und die Gliederung in Arbeitspakete sind so angelegt, dass beide Bearbeiter sich mit ihren spezifischen Qualifikationen (Kenntnis der maschinenbaulichen und technologischen Prozesse einerseits und Erfahrung mit ihrer Abbildung in Datenstrukturen und Algorithmen andererseits) sinnvoll ergänzen und dadurch Synergieeffekte entstehen.

Diese wissenschaftlichen Mitarbeiter führten das Projekt über die gesamte Laufzeit unter Anleitung eines Professors und eines habilitierten wissenschaftlichen Mitarbeiters eigenverantwortlich durch (24 Personenmonate). Je eine studentische Hilfskraft wirkte bei der Da-

tenerhebung, -systematisierung sowie Experimentdurchführung und -auswertung zusätzlich unterstützend mit (24 Personenmonate mit 62 h/Mon).

Aufbau des Berichts

Der vorliegende Bericht ist in 5 Kapitel untergegliedert. An die einleitenden Erläuterungen und die Zieldefinition in **Kapitel 1** schließen sich in **Kapitel 2** die Definition der elementaren Begriffe sowie der Stand der Technik zur Problemstellung an. **Kapitel 3** dient der Vorstellung und Beschreibung des entwickelten Lösungsansatzes der simulationsbasierten Heuristik. In **Kapitel 4** werden schließlich die erzielten Ergebnisse sowie resultierende Potentiale und Effekte spezifiziert und erläutert. Den Abschluss dieses Berichtes bildet **Kapitel 5**, das die wesentlichen Forschungsergebnisse zusammenfasst und einen Ausblick auf weiterführende Untersuchungen gibt.

Arbeitspaket	PM	Zeitraum (Projekt-Monat)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(1) Prozessanalyse	3,0	1	1	0,5	0,5								
(2) Beschreibung von Prozessmodellen	2,5			0,5	0,5	1	0,5						
(3) Entwicklung von Prozessgraphenmodellen	2,0		0,5	0,5			0,5	0,5					
(4) Entwicklung von Converter- und Controller-Modul	5,0	1	0,5	0,5	1	1	1						
(5) Applikation der Fallbeispiele	2,0							0,5	0,5	0,5			
(6) Konfiguration des Gesamtsystems	1,5							0,5	0,5	0,5			
(7) Erprobung und Leistungsbewertung	4,0							0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
(8) Transfer und Dokumentation	4,0										0,5	0,5	1
wiss. MA (Dipl.-Ing.)	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
wiss. MA (Dipl.-Inf.)	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
stud. HK (62 h/mon)	24	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

**Bild 5:** Arbeitsschritte und Personaleinsatz des Forschungsvorhabens

## 2 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

Das folgende Kapitel dient der Einführung in die Grundlagen komplexer Montageprozesse und gibt einen Überblick zum Stand der Technik hinsichtlich der Planung und Steuerung dieser. Hierfür ist es erforderlich zunächst die zentralen Begrifflichkeiten des Forschungsvorhabens zu definieren. Anschließend erfolgen die Erläuterungen zu den Arten und Formen und charakteristischen Merkmalen komplexer Montageprozesse. Darauf aufbauend werden die Anforderungen an die Planung und Steuerung abgeleitet sowie bisher bekannte Verfahren zu deren Unterstützung spezifiziert und erläutert.

### 2.1 DEFINITIONEN ELEMENTARER BEGRIFFE DES FORSCHUNGSPROJEKTES

#### Heuristik

Abgeleitet aus dem altgriechischen „heuriskein“ bedeutet der Begriff Heuristik soviel wie „finden“ oder „entdecken“. Eine Heuristik bezeichnet ein Verfahren, das unter akzeptablem Rechenaufwand nach den bestmöglichen zulässigen Lösungen sucht (vgl. hier und im Folgenden u.a.: Kokot, 2009; Zäpfel und Braune, 2005; Schulz, 1998; Blum, et al., 2008). Dabei kann jedoch nicht garantiert werden, dass es sich bei dem ermittelten Resultat um die optimale Lösung handelt bzw. sie als diese erkannt wird. Ferner sind keine Aussagen möglich, wie nah das Ergebnis am Optimum liegt. Grundgedanke aller Heuristiken ist die iterative Verbesserung. Sie sind somit durch eindeutige Verfahrensschritte charakterisiert und leiten ausgehend von einer oder mehreren Startlösungen neue Lösungen ab. Heuristische Verfahren lassen sich u.a. durch differierende Vorgehensweisen zur Generierung der Lösungen sowie durch die Anwendung unterschiedlicher Kriterien gegeneinander abgrenzen. Aus Basis dieser Kriterien erfolgt die Beurteilung über Akzeptanz oder Verwerfung neuer Problemlösungen.

#### Simulation

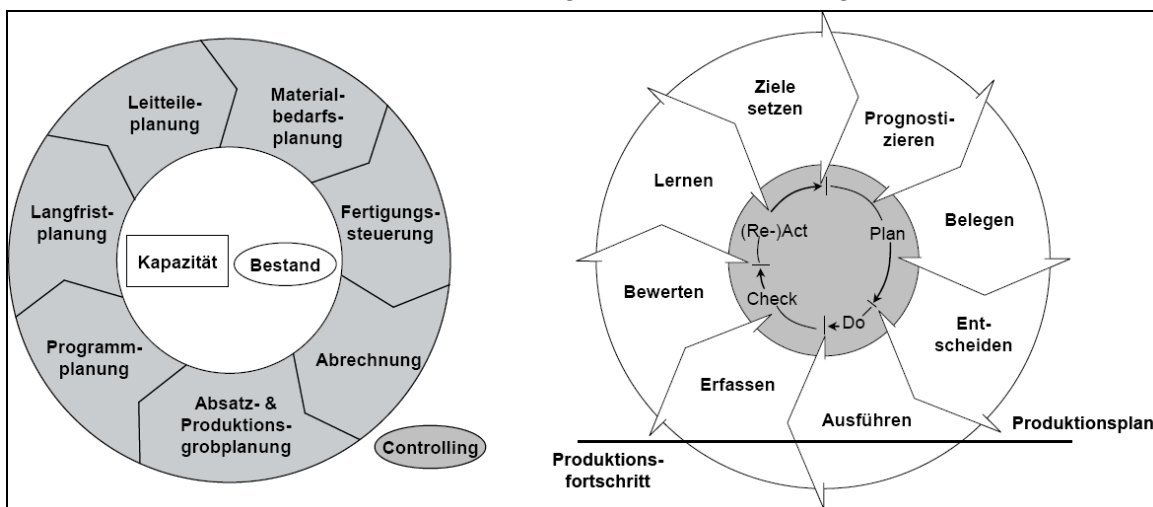
Zurückgehend auf das lateinische Wort „simulare“ bedeutet der Simulationsbegriff hinsichtlich technischer Vorgänge „nachbilden“ oder „nachahmen“. Gemäß VDI 3633 gilt folgende Definition: „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ Wird die Simulation computergestützt durchgeführt, werden die Elemente des zu untersuchenden Systems, deren wesentliche Eigenschaften sowie ihre Wechselwirkungen in ein formales Modell übertragen. Dabei ist eine wirklichkeitsgetreue Abbildung der betrachteten Prozesse erforderlich, um im Anschluss an die Ermittlung des Modellverhaltens Rückschlüsse auf das Verhalten des realen Systems zu ziehen. Anwendung findet die Simulation bei der Untersuchung von Systemen, deren Wirkungszusammenhänge so komplex sind, dass sie durch analytische Methoden nicht beschrieben werden können (vgl. u.a.: Kosturiak und Gregor, 1995; Wuttke, 2000, Schulz, 1998; Friedrich, 1998; Fischer und Dittrich, 1998; VDI 3633, 1996; Kohler, 1999).

#### Optimierung

Die Richtlinie VDI 3633 definiert Optimierung als: „Bestimmung derjenigen Werte der Einflussgrößen eines Modells, mit denen das Ziel bestmöglich erreicht wird. Zur Optimierung unter Verwendung der Simulation sind mehrere Simulationsläufe notwendig, bei denen die Parameter gezielt variiert werden.“ Kann kein Optimum gefunden werden erfolgt nach der Bewertung der Ergebnisse die Auswahl der Parameter, die eine Verbesserung der Zielfunktionswerte in Aussicht stellen.

Produktionsplanung und -steuerung (PPS)

Die PPS umfasst als Planungs- und Steuerungsinstrument der Beschaffung und Produktion die Aufgaben des operativen Produktionsmanagements (vgl. hier und im Folgenden: Friedrich, 1998; Kiener, et al., 2006; Wiendahl, 2008; Gubitz, 1994; Weihrauch und Keller, 2001; Koether, 2008; Zenner, 2006; Wildemann, 1998; Kokot, 2009). Dabei umspannt die Produktionsplanung die Bereiche Produktionsprogramm-, Mengen-, Termin- und Kapazitätsplanung. Die Produktionssteuerung setzt sich aus der Auftragsveranlassung sowie -überwachung zusammen und übernimmt sämtliche Funktionen zur Sicherung der Produktion. Das bedeutet, die PPS hat die Aufgabe, das Produktionsprogramm basierend auf bekannten oder erwarteten Kundenaufträgen nach Art, Zeit und Menge sowie unter Berücksichtigung der vorhandenen Ressourcen pro-aktiv zu planen, freizugeben und zu überwachen und trotz auftretender Störungen (z.B. Lieferverzögerungen, Personalausfall) die definierten Ziele so gut wie möglich zu verwirklichen. Bei der operativen Planung und Steuerung komplexer Montagen hat die PPS die Aufgabe, gleichzeitig die Maschinenbelegungs- und die Personaleinsatzplanung zu lösen. **Bild 6** veranschaulicht die Planungsaktivitäten und Vorgehensweise der PPS.

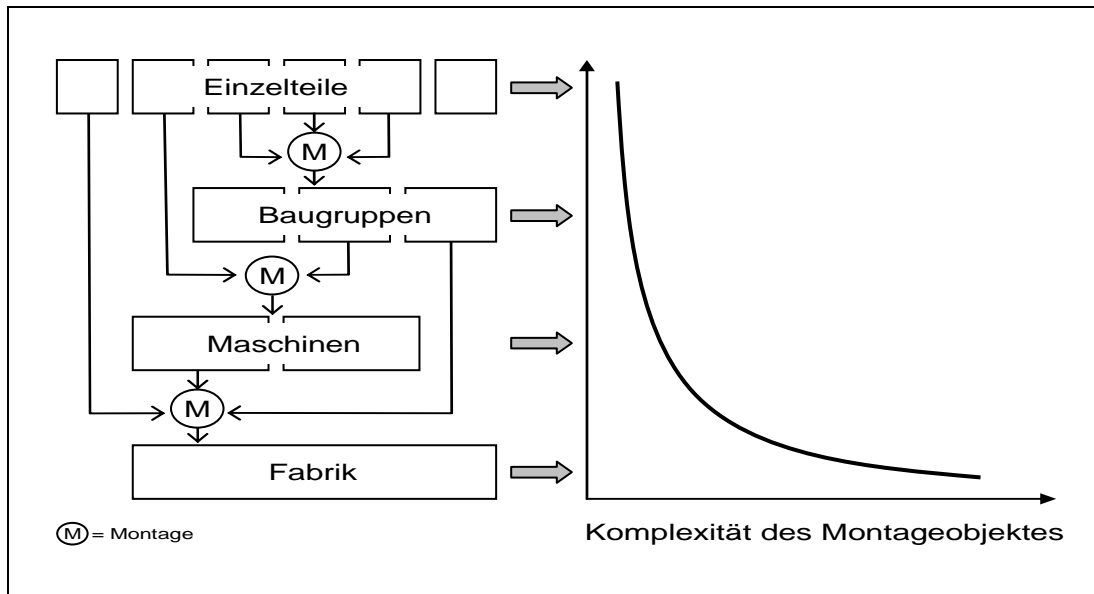


**Bild 6:** Planungsaktivitäten und Vorgehensweise der PPS (in Anlehnung an: Weihrauch und Keller, 2001 sowie Wiendahl, et al., 2005)

Komplexe Montage

Aufgabe der Montage ist die Zusammensetzung diverser Einzelkomponenten und Baugruppen zu einem Endprodukt mit erhöhter Komplexität und definierter Funktionsweise innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne (vgl. **Bild 7**). Dabei erfolgt eine gezielte Veränderung der Eigenschaften und Qualitätsmerkmale der Werkstücke. Eversheim (1996) entwickelt folgende Definition: „Montieren ist die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen. Dabei kann zusätzlich formloser Stoff (z.B. Gleit- und Schmierstoffe, Kleber usw.) zur Anwendung kommen.“ Die DIN 8593 (2003) ergänzt diese Begriffsbestimmung um: „Montieren wird zwar stets unter Anwendung von Fügeverfahren durchgeführt, es schließt jedoch zusätzlich auch alle Handhabungs- und Hilfsvorgänge einschließlich des Messens und Prüfens mit ein.“ Montagevorgänge können manuell oder automatisiert ausgeführt werden und bilden in der Regel im Anschluss an die Fertigung das letzte Element der Prozesskette. Die Komplexität der Montage resultiert aus der hohen Produkt- und Variantenvielfalt. Dadurch entsteht eine wachsende Dynamik sowohl hinsichtlich der Stückzahlen als auch der Montageabläufe. Die termingerechte Bereitstellung der benötigten Materialien sowie die Koordination universell genutzter Betriebsmittel und des Personals zählen ebenfalls zu den Komplexitätstreibern. Sie erfordern ein hohes Maß an Flexibilität sowie eine effiziente Planung, Steuerung und Kontrolle, um Störungen entgegenwirken zu

können (vgl. Sommer, 2008; Eversheim, 1996; Andreasen, et al., 1985; Gottschalk und Schuh, 2006; DIN 8593, 2003).



**Bild 7:** Komplexität des Montageobjektes (in Anlehnung an: Andreasen, et al., 1985 sowie Kokot, 2009)

## 2.2 ARTEN UND FORMEN VON MONTAGE

Die Montage mit ihrer oftmals hohen Anzahl an Betriebsmitteln und Mitarbeitern sowie deren Interaktionen stellt ein System dar, das sich aufgrund seiner Komplexität nicht immer hinreichend genau erfassen und beherrschen lässt. Es ergibt sich somit die Notwendigkeit, diesen Bereich sinnvoll zu unterteilen. Die Klassifikation kann dabei nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen (vgl. Eversheim, 1989).

Für die Durchführung von Montageprozessen existieren verschiedene Konzepte. Ein wichtiges Differenzierungsmerkmal stellt demnach die Unterscheidung der Montage nach ihrer Organisationsform bzw. Ablaufart dar. Wesentliches Kriterium ist dabei das Montageobjekt, das entweder stationär an einem Arbeitsplatz oder zwischen mehreren Stationen bewegt und an wechselnden Arbeitsplätzen montiert wird. Dabei lassen sich die ortsveränderlichen Objekte nach der zeitlichen Abhängigkeit des Materialflusses und die ortsfesten Montageformen nach dem Ort des Zusammenbaus gegeneinander abgrenzen (vgl. Seeliger und Neu, 1996). Darüber hinaus können Kriterien wie:

- Grad der Arbeitsteilung,
- Anzahl und Ähnlichkeit von Operationsfolgen,
- Kapazitätsbedarf der einzelnen Arbeitsgänge,
- Anforderungen an Arbeitsinhalte,
- Anforderungen an die Terminverfolgung,
- Produktstruktur,
- Aufwand für die Produktionssteuerung,
- Stückzahlen von Produktgruppen und
- Räumliche Struktur

ebenfalls mit in die Bewertung einfließen (vgl. Luczak und Eversheim, 1999; Loedding, 2008 und Eversheim, 1989). Anhand dieser Kriterien ist eine Einteilung in sechs Organisationsformen möglich, die in **Bild 8** mit Bezug auf deren Ausprägungen dargestellt sind.

	Organisationsform	Räumliche Struktur	Ortsveränderlichkeit des Montageobjektes	Ort der Montage	Zeitliche Abhängigkeit des Materialflusses
Stationäre Montage	Baustellenmontage		ortsgebunden an einer Station	am ortsfesten Montageobjekt	kein Materialfluss
	Einzelplatzmontage		ortsgebunden an einer Station	am ortsfesten Arbeitsplatz	kein Materialfluss
	Gruppenmontage		ortsgebunden an einer Station	an beweglichen Arbeitsplätzen	Kein Materialfluss
Gleitende Montage	Reihenmontage		ortsveränderlich zwischen den Stationen	an stationären Arbeitsplätzen	ohne zeitliche Bindung
	Fließmontage		ortsveränderlich zwischen den Stationen	an beweglichen Arbeitsplätzen	kontinuierlicher Materialfluss
	Taktstraßenmontage		ortsveränderlich zwischen den Stationen	an stationären Arbeitsplätzen	getakteter Materialfluss

**Bild 8:** Organisationsformen der Montage (in Anlehnung an: Kokot, 2009; Seeliger und Neu, 1996; Luczak und Eversheim, 1999; Grundig, 2009 und Wiendahl, 2008)

Die stationäre Montage ist durch ortsfeste Montageobjekte und sowohl bewegliche als auch unbewegliche Arbeitsplätze charakterisiert. Gleitende Montagen lassen sich hingegen vornehmlich durch das Maß der zeitlichen Verknüpfung (Personal /Arbeitsplätze) an den Fluss der Montageobjekte abgrenzen, wobei der Materialfluss vorwärts gerichtet ist (vgl. Grundig, 2009).

Die Zuordnung eines ortsfesten Werkstückes zu einem stationären Arbeitsplatz ist charakteristisch für die **Baustellenmontage**. Ihre Durchführung erfolgt ohne Wechsel des Personals und ohne vordefinierte Arbeitsteilung. Anwendungsgebiete dieser Form mit geringer Losgröße sind die Endmontagebereiche von Großmaschinen und der Schiffbau (vgl. hier und im Folgenden: Loedding, 2008; Kokot, 2009; Seeliger und Neu, 1996; Luczak und Eversheim, 1999; Evers, 2002; Grundig, 2009 und Wiendahl, 2008).

Bei der **Einzelplatzmontage** wird das Erzeugnis an einem ortsgebundenen Arbeitsplatz zusammengesetzt. Typisch ist diese Form für kleine bis mittlere Endprodukte.

Im Fall der **Gruppenmontage** wechseln die beweglichen Montagegruppen bzw. Arbeitsplätze zwischen den stationären Montageobjekten. Allerdings gilt es bei dieser Art der Montage eine zweite Ablaufmöglichkeit zu berücksichtigen. Beim vorgenannten Prinzip erfolgt eine Einteilung der Montageteams nach definierten Aufgabenumfängen. Nach Beendigung der Tätigkeiten werden sie dem nächsten ortsfesten Objekt zugewiesen. Wird dieses Vor-

gehen umgekehrt, ergibt sich eine weitere Alternative, bei der das Montageobjekt den Ort verändert. Dazu wird den stationären Arbeitsplätzen die Abwicklung bestimmter Montageabschnitte zugeteilt. Nach Ausführung der entsprechenden Schritte wird das Montageobjekt von einem Team zum nächsten transportiert. Die Bewegung kann unabhängig von der Methode periodisch oder aperiodisch erfolgen.

Sind die Montageobjekte beweglich und die Arbeitsplätze stationär entsprechend dem Hauptmontagefluss angeordnet, liegt eine **Reihenmontage** vor. Das zu leistende Arbeitspensum wird hierbei auf die Anzahl der Stationen verteilt. Da der Arbeitsumfang der einzelnen Montageplätze variieren kann, ist ein zeitlich festgelegter Materialfluss nicht realisierbar, d. h. der Bewegungsablauf erfolgt aperiodisch ohne Taktung. Zudem kann bei der Montage von Varianten flexibel auf Ablaufänderungen reagiert werden, so dass ein Überspringen irrelevanter Stationen möglich ist. Anwendung findet diese Art vorzugsweise bei wechselnden Montageobjekten mit mittleren Stückzahlen, was der Klein- und Mittelserienfertigung entspricht.

Die **Taktstraßenmontage** orientiert sich an einem zeitlich festgelegten Materialfluss. Die Weitergabe der Montageobjekte an den nächsten Arbeitsplatz erfolgt erst nach Beendigung sämtlicher Montagearbeiten an allen vorherigen Stationen und bedarf einer genauen Taktzeitabstimmung und Synchronisation. Der längste Arbeitsvorgang bestimmt hierbei die Taktzeit. Eine Pufferung zwischen den einzelnen Stationen findet nicht statt.

Der **Fließmontage** liegt das gleiche Konzept wie der Reihenfertigung zu Grunde. Im Unterschied zu ihr ist der Umfang der Arbeitsaufgabe jedoch wesentlich genauer abgegrenzt und die zeitliche Anpassung sehr exakt. Bei der Fließmontage befinden sich Montageobjekt und Fördersysteme in ständiger Bewegung, wobei die Montagearbeitsplätze mitwandern. In Bezug auf diese Montageform kann eine weitere Unterscheidung in kontinuierlich und stationär vorgenommen werden. Kontinuierlich beschreibt dabei, dass alle Montageoperationen gleichzeitig zur konstanten Weiterbewegung des Montageobjektes durchgeführt werden. Im Falle der stationären Fließmontage erfolgen die Montageoperationen an festen Stationen. Erst mit Abschluss dieser erfolgt die Weiterbewegung. Durch die Bildung von Puffern kann die zeitliche Kopplung zwischen den Montagestationen abgeschwächt werden. Findet keine Pufferung statt, handelt es sich um eine starre Fließfertigung. Werden Puffer angelegt liegt eine elastische Fließfertigung vor.

Eine weitere Möglichkeit der Klassifikation bietet die Unterscheidung der räumlichen Anordnung der Montagestationen. Mögliche Anordnungsstrukturen sind:

- 1 Montagezelle (Punktstruktur)  
Ausführung aller Montageprozesse räumlich zusammengefasst an einem Ort.
- 2 Montagelinie  
Linienförmige Anordnung mehrerer Stationen mit guter Zugänglichkeit in offener Struktur (z.B. Fließbänder in U- oder L-Form).
- 3 Ringstruktur (Karreestruktur)  
Geschlossene Struktur mit der Möglichkeit zur Rückführung von Montageobjekten an vorhergehende Stationen.
- 4 Netzstruktur  
Durchführbarkeit ungleicher Montageabläufe aber begrenzte Variabilität der Stationsabfolge (z.B. Variantenteile in der Endmontage).
- 5 Flächenstruktur  
Reihenfolge der Stationen frei wählbar, d.h. hinsichtlich Ihrer Abfolge sind die Stationen flexibel ansteuerbar (vgl. Seeliger und Neu, 1996 und Grundig, 2009).

Ein weiteres wichtiges Kriterium zur Gliederung von Montagesystemen ist die Einteilung nach verschiedenen technischen Niveaustufen bzw. dem Ausmaß menschlichen Eingreifens. Zusätzlich führt sowohl die Verschiedenartigkeit angewendeter Verfahren als auch der Variantenreichtum der Bauteile zu einer Differenzierung in:

- Manuelle,
- Mechanisierte,
- Teil- oder vollautomatisierte und
- Hybride Montagesysteme.

**Bild 9** zeigt zusammengefasst die beschriebenen Klassifizierungsmöglichkeiten von Montagen.

Fertigungsart	Organisationsform	räumliche Anordnung	Grad menschlichen Eingriffs
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einzelfertigung</li> <li>• Kleinserienfertigung</li> <li>• Einzel-, Kleinserienfertigung</li> <li>• Serienfertigung</li> <li>• Großserienfertigung</li> <li>• Massenfertigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baustellenmontage</li> <li>• Einzelplatzmontage</li> <li>• Gruppenmontage</li>   <li>• Reihenmontage</li> <li>• Fließmontage</li> <li>• Taktstraßenmontage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zelle</li> <li>• offene Linie</li> <li>• offene Linie</li>   <li>• geschlossener Ring</li> <li>• Netz</li> <li>• Fläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• manuelle Montagesysteme</li>   <li>• mechanisierte Montagesysteme</li>   <li>• automatisierte Montagesysteme</li>   <li>• hybride Montagesysteme</li> </ul>

**Bild 9:** Klassifizierung von Montagesystemen (in Anlehnung an: Seeliger und Neu, 1996; Grundig, 2009 und Kokot, 2009)

### 2.3 CHARAKTERISTISCHE MERKMALE KOMPLEXER MONTAGEPROZESSE

Komplexe Montagesysteme umfassen eine enorme Vielfalt an manuellen und automatisierten Elementen, die durch Material- und Informationsfluss miteinander verknüpft sind. Bedingt durch einen starken Konkurrenzdruck im internationalen Wettbewerb ergab sich in der Vergangenheit die Notwendigkeit, Rationalisierungspotentiale zu schaffen, indem der Automatisierungsgrad in Produktion und Montage erheblich gesteigert und die einzelnen Stationen flexibel miteinander verkettet wurden. Moderne Montagesysteme zeichnen sich durch eine gesteigerte Komplexität der Anlagen und Stationen aus, die in Verbindung mit der Vielzahl an Wirkungsbeziehungen zwischen den Komponenten nur schwer beherrschbar ist. Zwar bieten automatisierte Materialflusssysteme und Komponenten zur Datenverarbeitung ein hohes Maß an Flexibilität, bedingen jedoch gleichzeitig eine höhere Komplexität der Planung und Steuerung (vgl. Hartberger, 1991 und Schuh et al., 2008).

Auf Basis zunehmender Orientierung an Kundenwünschen lassen sich komplexe Montageprozesse ferner durch zunehmende Produktvarianz, zeitlich veränderlichen Produktmix und daraus resultierend gesteigerte Produktkomplexität charakterisieren. Hohe Anforderungen an Produktqualität und Liefertermintreue bedürfen der termingenauen Synchronisation von Produktion und Montage mit den Zulieferern (vgl. Hartberger, 1991 und Mönch, 2006).

Bedingt durch die Möglichkeit der Ausführung unterschiedlicher Prozessschritte sowohl in sequentieller als auch paralleler Abfolge ergibt sich eine netzförmige Struktur der Montageabläufe. Diese Strukturen sind über mehrere Aufträge miteinander verknüpft, da sie Zugriff auf denselben Ressourcenpool nehmen. Zudem erstreckt sich diese Struktur nicht nur über einen Montagebereich, sondern über alle Vor- und Endmontagebereiche, die Tätigkeiten für den gleichen Auftrag ausführen (vgl. Völker et al., 2008; Schuh et al., 2008 und Kokot, 2009).

Sich dynamisch verändernde Rahmenbedingungen steigern das Störpotential in Produktion und Montage. Kommt es während der Montageabläufe zu Störungen, resultiert daraus eine unmittelbare Gefährdung der Produktionspläne. Eine Erhöhung der Produktkomplexität bewirkt veränderte Anforderungen an die Beherrschung der Komplexität. Die bisherigen Konzepte der PPS streben eine reibungslose Koordination der Abläufe unter Einsatz ähnlich komplexer Systeme an, ohne den Grad der Komplexität dabei insgesamt zu verringern (vgl. Kokot, 2009). Mit den in der Praxis verwendeten PPS-Systemen gelingt es oft nicht diese Komplexität zu bewältigen. Untersuchungen haben ergeben, dass der Koordinierungsaufwand nicht im angemessenen Umfang gelöst wird. Pläne besitzen nur eine begrenzte Gültigkeit, die kurzfristige Planung pro Schicht bedarf mehrmaliger Anpassungen und ein erheblicher Anteil aller Aufträge kann nur mit Verzögerungen zum Abschluss gebracht werden. Es wurde festgestellt, dass die Unternehmen ihre individuellen Zielvorgaben in Bezug auf Produktion und Lagerung nicht erreichen konnten (vgl. Schuh et al., 2008; Wiendahl et al., 2005; Wildemann, 1998; Traenkner, 1990 und Evers, 2002).

Folglich kann resümiert werden, dass die Bewältigung und Koordinierung der Komplexität einen wesentlichen Aspekt für den Einsatz computergestützter PPS-Systeme darstellt. Um Verlustleistungen und mangelnder Transparenz der Auftragsdurchläufe entgegenzuwirken, ist es notwendig, geeignete Methoden und Werkzeuge zu erarbeiten, die entsprechend der Flexibilität der Montageabläufe und trotz niedriger Qualität und raschem Tempo der Informationsänderungen, eine hohe Planungssicherheit auch bei kurzfristigen Planungshorizonten gewährleisten (vgl. Kokot, 2009). Ansätze bezüglich eines zukunftsorientierten PPS-Einsatzes sollten nicht, wie in der Vergangenheit üblich, überwiegend auf Randbedingungen und technischen Vorgaben beruhen, sondern durch eine systembezogene und ganzheitliche Prägung eine parallele Beachtung von organisatorischen, personellen und technologischen Einflussgrößen ermöglichen (vgl. Hartberger, 1991; Schuh et al., 2008 und Wildemann, 1998).

### **2.4 ANFORDERUNGEN AN MODERNE PPS-KONZEPTE**

Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgte eine umfassende Literaturrecherche und Analyse zu den Anforderungen an moderne PPS-Konzepte (vgl. im Folgenden: Hillgruber, 2009; Kokot, 2009 und Siebert, 2009). Basierend darauf konnte ein Anforderungskatalog spezifiziert werden, der die Grundlage zur Bewertung der simulationsbasierten Heuristik schafft. Dabei wird eine Unterscheidung zwischen den Forderungen an die Leistungsfähigkeit der PPS-Systeme und den Voraussetzungen vorgenommen, die von den anwendenden Unternehmen zu erfüllen sind. Zunächst erfolgt die Darstellung funktionaler und methodischer Anforderungen.

Montageprozesse haben unmittelbar Anteil an der Produktion und beinhalten alle Bearbeitungsmittel, die direkten Einfluss auf den Fortschritt der Produktion haben. Die flexible Verkettung und die variablen Wechselbeziehungen bedürfen der Abbildung aller dynamischer Strukturen und Randbedingungen durch das PPS-System. Diese Zielvorgabe umfasst eine praxisnahe und effiziente Modellierung des Montageprozesses mit einer anpassungsfähigen und wahlfreien Belegung der Montagestationen (vgl. Hartberger, 1991; Eversheim, 1989; Völker et al., 2008 und Traenkner, 1990).

Die geforderte Flexibilität ist dabei nicht nur auf die vernetzte Planung der Stationen und Arbeitsabläufe beschränkt, sondern umfasst gleichzeitig den Bedarf nach schnellem Reaktionsvermögen auf Störungen (vgl. Eversheim, 1989 und Wildemann, 1998).

Trotz der Bedingung einer hohen Änderungsflexibilität auf häufig wechselnde Informationen und Abläufe sowie deren Kombination, sollte die Implementierung, Anwendung und Pflege eines derartigen Systems einen möglichst geringen Aufwand verursachen. Statt die Kom-

plexität durch komplizierte Mechanismen zusätzlich zu steigern, besteht eine weitere Anforderung an ein modernes PPS-Werkzeug in der ganzheitlichen Reduzierung der Komplexität (vgl. Schuh et al., 2006).

Ferner sollte sich das PPS-System durch eine anwender- und anwendungsgerechte Aufbereitung der Daten als benutzerfreundlich auszeichnen. Dies beinhaltet neben einer einfachen Handhabung und der passenden Visualisierung ebenfalls eine hohe Transparenz und Reproduzierbarkeit. Dennoch muss die Vielzahl an Randbedingungen und Wirkungsbeziehungen in vollem Umfang berücksichtigt werden. Restriktionen sind realitätsnah und in hohem Detaillierungsgrad abzubilden (vgl. Hartberger, 1991 und Wiendahl et al., 2005).

Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit, sowohl die verschiedenen Personalstrukturen (Montageteams und Qualifikationen) als auch die Variation der Anzahl an Mitarbeiterressourcen zu modellieren, um die individuellen operativen Personalsteuerungsziele abbilden und umsetzen zu können. Auch die Aufgaben, eine zeitlich angemessene Verteilung begrenzter Ressourcen zu realisieren sowie einen Ausgleich von Arbeitsmengenschwankungen zwischen den einzelnen Arbeitsplätzen zu schaffen, gilt es zu lösen (vgl. Völker et al., 2008).

Da Fertigstellungstermine unter Anwendung bisheriger Planungswerkzeuge oftmals nicht eingehalten werden, stellt die Planungssicherheit trotz kurzer Planungs-horizonte und sich ständig ändernden Informationen ein wesentliches Anforderungskriterium der PPS dar. Die Entkopplung von Material- und Informationsfluss sowie die frühestmögliche Weitergabe aktueller Informationen wirken dabei unterstützend (vgl. Schuh et al., 2006).

Der angestrebte, praxisnahe und branchenübergreifende Einsatz setzt zudem die Möglichkeit der Modellierung beliebiger Montagemodelle mit theoretisch unbegrenzter Variabilität der Startparameter sowie daraus folgend die Anwendbarkeit auf beliebige Auftragsszenarien voraus. Dabei müssen vorhandene Freiheitsgrade berücksichtigt und nutzbare Potentiale ausgeschöpft werden. Moderne Ansätze für optimierte PPS-Systeme sollten daher die Beherrschbarkeit der Planungsaufgabe in vertretbarem Aufwand und hoher Ergebnisqualität trotz kurzer Rechendauer garantieren (vgl. Völker et al., 2008; Traenkner, 1990; Schuh et al., 2006; Eversheim, 1989 und Hartberger, 1991).

Neben den geschilderten Anforderungen, ergeben sich darüber hinaus Ansprüche an die anwendenden Unternehmen. Grundvoraussetzungen für einen effizienten Softwareeinsatz sind eine eindeutige Verteilung der Ziel- und Aufgabenverantwortlichkeiten, klare Vorgaben bzgl. logistischer Ziele, eindeutige Schnittstellendefinitionen sowie die Kenntnis der Wirkzusammenhänge. Ferner ist die Verfügbarkeit aktueller Daten und Informationen sicherzustellen und auf eine korrekte Parametrierung dieser zu achten.

Um einen bestmöglichen Ablaufplan mit optimalen Belegungsvarianten unter Einbeziehung individueller logistischer Ziele (Termintreue, Durchlaufzeiten, Umlaufbestände) zu erhalten, ist eine ganzheitliche Betrachtung der Produktionsflüsse mit einer parallelen Berücksichtigung der technologischen, organisatorischen und personalspezifischen Einflussgrößen notwendig. Auf diese Weise wird eine simultane Bewältigung sowohl der Ressourcenbelegungsplanung (klassisches Reihenfolgeproblem) als auch des Ressourcenzuteilungsproblems (Personaleinsatzplanung - OR: Rucksackproblem) möglich (vgl. Völker et al., 2008).

**Bild 10** gibt zusammenfassend den Anforderungskatalog an moderne PPS-Konzepte wieder. Es sollte jedoch bedacht werden, dass Softwarewerkzeuge allein die Probleme der PPS nicht bewältigen können. Die widerspruchsfreie Auslegung der PPS-Gestaltungsaspekte und die Berücksichtigung organisatorischer Randbedingungen sind durch eine Softwarelösung nicht zu ersetzen (vgl. Wiendahl et al., 2005 und Wildemann, 1998).



**Bild 10:** Anforderungskatalog für moderne PPS-Konzepte (in Anlehnung an: Kokot, 2009)

## 2.5 STAND DER FORSCHUNG

Die Modellierung des Problems soll mit Hilfe von Vorgangspfeil-Netzplänen (VPN) erfolgen. Die verwendeten Ressourcen sind in ihrer Anzahl beschränkt. Zur Abbildung der Alternativen bezüglich der Prozessaktivitäten werden parallele Vorgänge genutzt. Diese parallelen Pfeile zwischen zwei Zuständen heißen Modi. Jeder Modus steht dabei für eine andere Art der Ausführung des Vorgangs mit einer bestimmten Kombination von Ressourcen, die aber alle zu analogen Ergebnissen führen. Die Fachliteratur spricht hier vom Multi-Mode Resource-Constraint Project-Scheduling Problem, kurz MRCPSP. Somit erfolgt neben der klassischen Zeit- auch eine Kapazitätsplanung über alle Modi. Diese Ergänzung steigert die Komplexität enorm.

Für diesen noch relativ neuen Ansatz sind in der Fachliteratur zur Projektplanung schon Lösungskonzepte zu finden. Diese werden im Folgenden geordnet nach verwendeten Lösungsverfahren beschrieben.

### Exakte Modelle

Exakte Modelle zur Lösung von MRCPSP basieren meist auf einem Branch-and-Bound-Ansatz und sind Weiterentwicklungen des Single-Modus-Ansatzes von Kolisch und Padmann (1997). Das erste exakte Lösungsmodell für Multi-Mode-Probleme wurde von Talbot (1982) entwickelt und verläuft in zwei Phasen. Die erste Phase dient der Ordnung von Vorgängen, Modi und Ressourcen auf einer Aktivitätenliste, in der zweiten Phase wird mittels vollständiger Enumeration für jeden Vorgang der kürzeste Modus und die früheste Startzeit berechnet. Ist ein Vorgang nicht durchführbar, wird zurückgesprungen und ein anderer Modus bzw.

ein späterer Termin gewählt. Dieser Ansatz wurde von Patterson et al. (1989) weiterentwickelt.

Die ersten Ansätze stammen von Demeulemeester und Herroelen (1992) sowie von Speranza und Vercellis (1993). In letzterem Modell wird z.B. ein Lösungsbaum anhand der Vorgangsbeziehungen aufgebaut und durch einen Branch-and-Bound-Algorithmus mit Tiefensuche durchgerechnet, bis die beste Lösung gefunden ist. Eine Fortführung und Weiterentwicklung der Methoden erfolgte durch Sprecher (1997), Hartmann und Drexl (1997), Klein und Scholl (1998), Mingozzi et al. (1998) sowie Vanhouke und Demeulemeester (2001). Dabei ist allen Ansätzen gemein, dass sie zwar optimale Lösungen finden, aber aufgrund der Rechenzeit nur auf kleine bzw. stark beschränkte Probleme anwendbar sind (vgl. Kolisch und Drexl, 1997). Daher konzentrieren sich die meisten Veröffentlichungen auf die Entwicklung heuristischer Modelle.

### Heuristiken

Bei heuristischen Lösungsansätzen sind Prioritätsregeln immer noch das am häufigsten verwendete Verfahren. Zurückzuführen ist dies insbesondere auf den einfachen Aufbau und die vielseitige sowie flexible Einsetzbarkeit. Im Fall der MRCPSP wurden sie zuerst von Bector (1990 und 1993) entwickelt. Er modifizierte Algorithmen mit parallelen Einplanungsschemata zur Optimierung der Projektdauer. Darin benutzte er Prioritätsregeln zur Bestimmung der nachfolgenden Vorgänge und ihrer Modi. Demgegenüber bauten Drexl und Grünewald (1993) eine spezielle Erweiterung eines sequentiell arbeitenden Algorithmus auf Basis von Prioritätsregeln. Dann folgen mehrere Arbeiten von Özdamar (1994), der regelbasierte Verfahren erfolgreich zur Lösung verschiedenster Multi-Modus-Probleme einsetzte. Heilmann (2001) entwickelte eine regelbasierte Heuristik mit Rückwärtsterminierung und validierte sie an einem Beispiel aus der Prozessindustrie mit 100 Vorgängen und jeweils 5 Modi. Schließlich ist noch die Arbeit von Buddahakulsomsiri und Kim (2007) zu nennen, die Prioritätsregeln nutzt, die die Ressourcenauslastung durch eine Spaltung von Vorgängen steigert.

Neben Prioritätsregeln werden auch Meta-Heuristiken, wie Tabu Search (TS), Simulated Annealing (SA) und in letzter Zeit auch Genetische Algorithmen (GA) erfolgreich angewendet. Slowinski et al. (1994) stellten als Erste einen SA-Ansatz zur Lösung von Multi-Modus-Problemen vor. Dieser basiert auf der Nachbarschaftssuche durch paarweise Vertauschung und dem zufälligen Auswechseln von Aktivitäten auf der Aktivitätenliste. Auch Kolisch und Drexl (1997) experimentierten mit lokalen Suchverfahren. Dabei bezogen sie neben erneuerbaren auch knappe nicht erneuerbare Ressourcen ein. Baar et al. (1998) entwickelten eine TS-Heuristik, die basierend auf Einplanungsschemata für große Probleme gültige Lösungen erzeugt. SA-Ansätze wurden von Bouleimen und Lecocq (2003) weiterentwickelt. Mika et al. (2005) setzten TS- und SA-Methoden in ihrer Studie zur Optimierung von Gesamtprojektkosten, Kosten zur Beendigung von Aktivitäten sowie zur allgemeinen Überwachung von Kostenflüssen ein und erzielten gute Ergebnisse. Die Nutzung von GA wurde zuerst von Özdamar (1999) sowie Hartmann und Drexl (1997) geprägt. Letztere benutzten Modelle basierend auf mehreren Aktivitätenlisten, wie eine Vorgangsliste und eine Liste für die Vorgangsmodus-Verteilung, die durch seriell arbeitende evolutionäre Algorithmen untersucht und verändert werden, bis eine zufriedenstellende Lösung erreicht ist. Alcaraz et al. (2003) erweitert einen GA für ein Single-Modus-Modell zum Multi-Mode-Einsatz. Dabei wurden die Crossover- und Mutationsoperatoren verbessert und (zur Vermeidung lokaler Optima) mit einer auf dem Zufallsprinzip beruhenden Ersetzungsprozedur erweitert.

### Bewertung

Die Mehrzahl der Ansätze beschäftigt sich mit der Zeit- und Terminplanung in Verbindung mit der Auftragsreihenfolgeplanung unter Berücksichtigung limitierter Ressourcen. Ziel ist eine minimale Projektdauer unter Einhaltung der Randbedingungen. Dies ist beispielsweise

bei Baar et al. (1999), Kolisch und Drexl (1997), Sprecher (1997), Hartmann und Drexl (1997), Vanhouke und Demeulemeester (2001) sowie Özdamar (1997) der Fall. Verschiedene Ansätze verwenden ferner Vorgangskostenflüsse (z.B. Vanhouke und Demeulemeester, 2001). Im vorliegenden, praktisch orientierten Problem ist die Zu- und Abgangsreihenfolge der Aufträge durch die übergeordnete Planungsebene aber bereits vorgegeben. Für die Terminplanung ist es nur wichtig, die gesetzten Rahmentermeine nicht zu überschreiten. Im Unterschied dazu steht hier die Personalkapazitätsplanung (resource allocation) im Mittelpunkt, die so nah wie möglich an ein vorgegebenes Personalangebot angenähert werden soll.

Abgesehen von Spezialanwendungen haben die wenigsten Modelle breite Praxisrelevanz erlangt. Auch die Beispiele, an denen die Methoden auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht wurden, sind meist theoretisch konstruiert (z.B. per Zufallsgenerator, vgl. Kolisch und Drexl, 1997). Dabei werden viele, in realen Produktionsumgebungen auftretenden Besonderheiten nicht berücksichtigt.

Ein weiterer Schwachpunkt vieler Methoden ist die Dauer der Lösungsberechnung. Da die zu entwickelnde Methode zur operativen Steuerung und damit auch zur Störungsbehandlung eingesetzt werden soll, darf auch bei großen Problemen eine Rechenzeit von zwei bis drei Minuten nicht überschritten werden. Ein Großteil der Verfahren benötigt für solche Einsatzfälle deutlich mehr Zeit.

Die zu entwickelnde Methode soll der Planer bei der operativen Produktionssteuerung nutzen. Dazu müssen mit einem Modell zwei – aus Steuerungssicht völlig unterschiedliche – Aufgabenstellungen gelöst werden: Zum einen ist das die vorausschauende Planung vor Montagestart mit vorgegebenen Zielen und großem Handlungsspielraum. Darüber hinaus erfolgt aber auch eine Feinsteuerung während der Montage, wenn aufgrund von Störungen und Produktionsverschiebungen bestehende Pläne ungültig geworden sind. Keiner der analysierten Ansätze bietet diese Option.

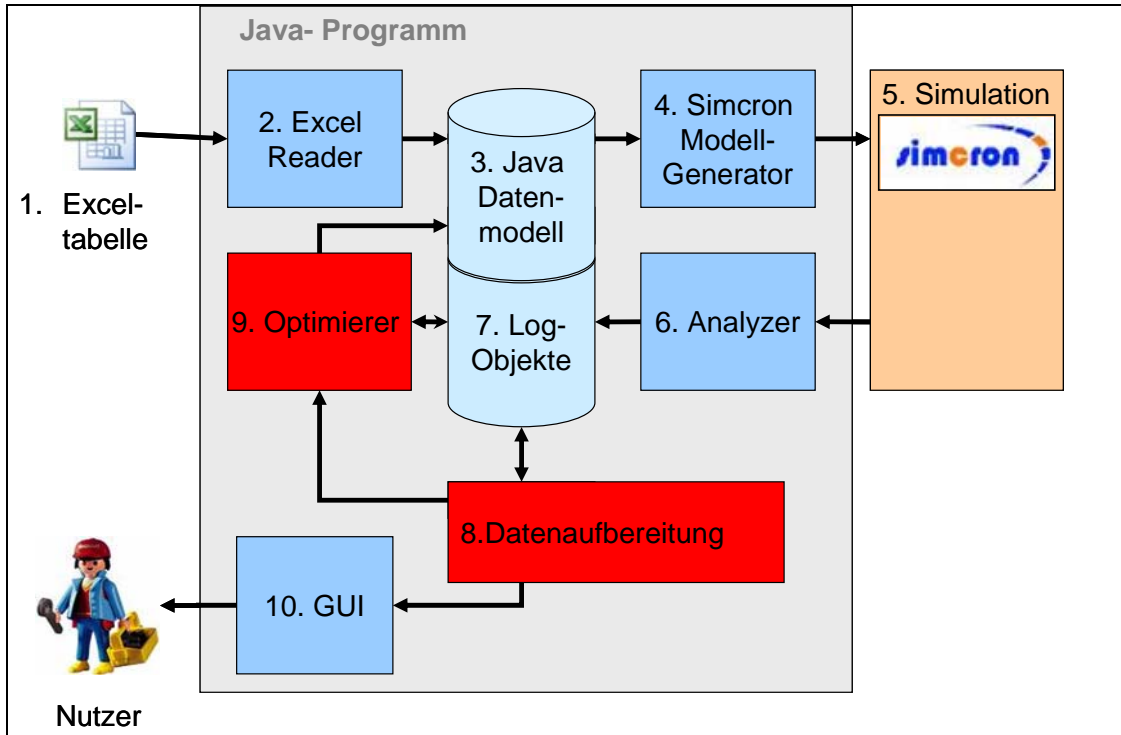
Der aktuelle Entwicklungsstand professioneller Fertigungsleitstände und Netzplan-Scheduler wurde gründlich untersucht (u.a. der Project Scheduler V. 8, vgl. Scitor, 2007). Eine von Siemer (2004) durchgeführte Marktstudie zu Fertigungsleitständen belegt, dass ein Tool mit den oben beschriebenen Funktionalitäten derzeit international nicht verfügbar ist. Die analysierten Systeme arbeiten prinzipiell mit fixen (diskret und nichtalternativ) Prozessparametern und können damit das o.g. Problem nicht lösen. Gleiches gilt für netzplantechnikbasierte Scheduler, die meist als „Projektmanagement-Systeme“ angeboten werden (vgl. Maroto, 1994; Kolisch, 1997; Mellentien und Trautmann, 2001).

Auch die Recherche zur Anwendung spezieller Montageplanungssysteme lieferte keine zufrieden stellenden Ergebnisse. Existierende Ansätze und Tools sind primär auf eine stücklistenbasierte Kapazitätsplanung mittels fixer Zeitbausteine ausgerichtet und verfügen nicht über echte Optimierungsfunktionen. Stellvertretend sei das Montageplanungssystem HSmont für die Zeitermittlung, Zeitkalkulation und Montageplanung genannt (HSmont, 2007), welches jedoch innovative Ansätze, wie z.B. „Selbstlernerneffekt“, „Flexibles Zuschlagssystem“ oder „Integration beliebiger Planungslogiken“ enthält.

Im Juni 2006 wurde ein interdisziplinäres, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Projekt zur „Adaptiven Logistik“ gestartet, das in Teilprojekten die beschriebene Problemstellung behandelt. In diesem Verbundprojekt wird die Koordination und Synchronisation der Abläufe in Logistik und Produktion bei der auftragbezogenen Einzel- und Kleinserienmontage durch Verfahren der adaptiven Planung und Steuerung des Materialflusses u.a. auf Basis modularer Multiagentensysteme untersucht (Adaptive Logistik, 2007). Bisherige Veröffentlichungen zu diesem Projekt (Schuh et al., 2006 sowie Weigert, 2006) lassen jedoch keinen konkreten Lösungsansatz bezüglich der hier geschilderten Problematik erkennen.

## 3 LÖSUNGSANSATZ DER SIMULATIONSBASIERTEN HEURISTIK

### 3.1 STRUKTURELLER AUFBAU



**Bild 11:** Struktureller Systemaufbau

**Bild 11** zeigt den strukturellen Aufbau der simulationsbasierten Heuristik. Die Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten werden vom Excelreader (2) in eine Java Datenstruktur, dem Javamodell (3) eingelesen. Das Java Datenmodell gewährt Marta II einfachen Zugriff zu diesen Informationen. Vor dem Start der Modellgenerierung (4) erfolgt die Suche der Simulationseinstellungen im Javamodell (3) durch den Optimierer (9). Es werden Änderungen am Modell vorgenommen. Der Optimierer initialisiert die LogObjekte(7) und speichert die Simulationseinstellungen im LogObjekt (7). Der Analyzer importiert die Simulationsrohdaten und speichert diese in LogObjekten.

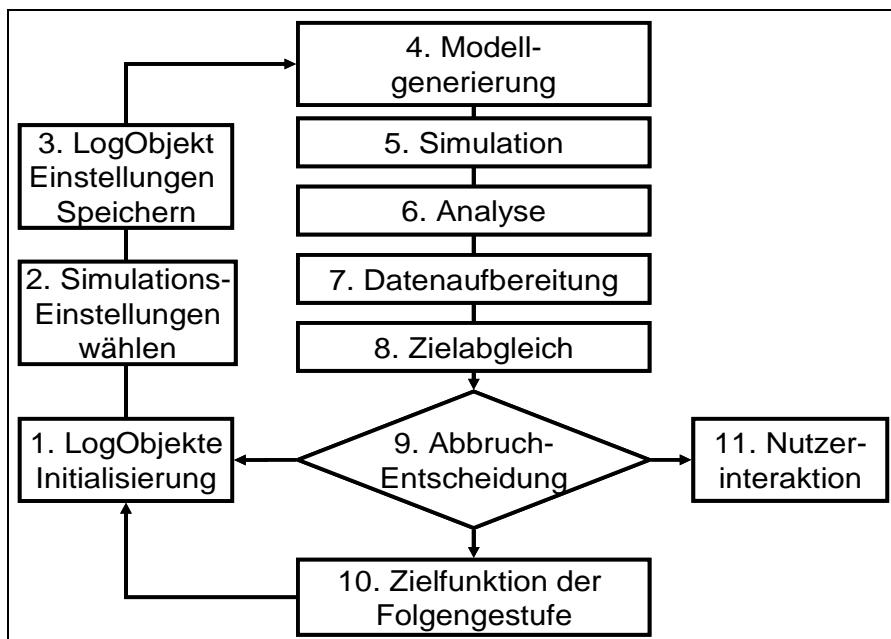
Aus dem Java Datenmodell wird mithilfe des Modellgenerators (4) ein Simulationsmodell erzeugt. Die Simulation erfolgt unter Simcron, einem leistungsfähigen, diskreten, ereignisorientierten Simulator, siehe [Simcron]. Die Simulationssoftware „Simcron Modeller“ ist Eigentum der Simcron GmbH und wurde nicht im Rahmen dieses Projekts entwickelt. Alle Vorgänge werden vom Simcron Simulator zeitlich eingeplant. Die Ergebnisse der Simulation stehen durch den Analyzer (6) in Java zur Verfügung. Die Datenaufbereitung (8) berechnet sämtliche relevanten Performanceparameter für die manuelle und automatische Planbewertung. Die Werte werden in den LogObjekten gespeichert. Der Optimierer berechnet mithilfe der Performancekennwerte den Zielfunktionswert und trifft eine Abbruchentscheidung. Ist die vom Optimierer getroffene Abbruchentscheidung negativ, nimmt der Optimierer im Rahmen der Suche neue Simulationseinstellungen vor. Der gesamte Optimierungszyklus startet erneut. Der Optimierungszyklus nach dem Prinzip „Suchen und Bewerten“ ist trotz der Vielzahl neuer Module im Strukturplan von Marta II erkennbar.

### 3.2 FUNKTIONSWEISE UND ABLAUF DES VERFAHRENS

Die Steuerung des Optimierungszyklus und die Funktionalität der einzelnen Module stehen im Mittelpunkt dieses Abschnitts. Das Ziel ist einen detaillierten Eindruck über den Ablauf und die Zusammenhänge des gesamten Programms zu erhalten. Weiterhin findet eine differenzierte Betrachtung der drei Stufen statt.

#### 3.2.1 Ablauf und Datenfluss

Bei der Optimierung in Marta II arbeiten viele Module zusammen. Die Module Modellgenerator zur Erstellung des Simulationsmodells, die Simulation zur Berechnung des Produktionsplans und der Analyzer zum Datenimport müssen nacheinander gestartet werden. Die Ergebnisse des einen Moduls benötigen vollständige Daten des Vorgängermoduls. Es ist erforderlich die Simulationseinstellungen und die Simulationsbewertung in den Ablauf zu integrieren. Die LogObjekte müssen verwaltet werden und Nutzerinteraktionen wird ermöglicht. In **Bild 12** ist der detaillierte Ablauf aus Sicht der Optimierung im Programmablaufplan dargestellt.



**Bild 12:** Programmablaufplan

#### 3.2.2 Konzept und Umsetzung der Ablaufsteuerung

In folgenden Abschnitten werden die in **Bild 12** dargestellten Module nacheinander beschrieben. Es werden Zweck und Zusammenhänge erläutert.

#### 3.2.3 Verwaltung der LogObjekte

Für die Informationsgewinnung aus einem Simulationslauf ist es erforderlich, auf Strukturen zurückzugreifen, die für einen Simulationslauf sämtliche Simulationseinstellungen und Simulationsergebnisse speichern. Diese Datenstrukturen sind in Marta II als LogObjekte bezeichnet. Sie sind an das Modul „Analyzer“ geknüpft, welches die Simulationsrohdaten in die LogObjekte schreibt. Die Datenaufbereitung fügt ebenfalls Performanceparameter einer höheren Abstraktionssicht in die LogObjekte ein. Jeder Ressource, jedem Auftrag, jedem Vorgang sind genauso viele LogObjekte zugeordnet, wie es Simulationsläufe gibt. Für jeden Simulationslauf gibt es zusätzlich ein RunLog, das den Simulationslauf insgesamt charakterisiert.

### 3.2.4 *Verändern der Simulationseinstellung*

Nachdem die LogObjekte initialisiert sind hat der Optimierer vor Simulationsstart die Möglichkeit, die Simulationseinstellungen zu verändern (siehe **Bild 12**, Punkt 2). Alle Änderungen an den Simulationseinstellungen werden auch an den LogObjekten gespeichert. Ändert beispielsweise eine Methode die Bereitstellungszeit, so ist die geänderte Bereitstellungszeit im aktuellen LogObjekt gespeichert (siehe **Bild 12**, Punkt 3). Die Simulationseinstellungen unterscheiden sich in Modelländerungen und Suchalgorithmen. Modelländerungen beinhalten die Änderung der Rahmenbedingungen für die Suche und Bewertung, zum Beispiel eine nutzerbedingte Rahmenterminänderung, oder das Weglassen von Personalbeschränkungen im Simulationsmodell. Die Suchalgorithmen dienen der Optimierung des Produktionsplans bezüglich des Zielfunktionswerts. Sie basieren auf den Simulationseinstellungen und Performanceparametern der vorangegangenen Simulation. Nur bei Stufenübergängen dient der beste Simulationslauf der Vorgängerstufe als Datenbasis. Die jeweilige Stufe bestimmt die Suchalgorithmen und die Modelländerungen. Die Simulationseinstellungen unterscheiden sich funktionell im Setzen von Bereitstellungszeiten, Modusauswahl und verfügbarer Mitarbeiterkapazität.

### 3.2.5 *Planbewertung*

Die Planbewertung bzw. der Abgleich mit der Zielfunktion finden statt, nachdem alle Performancekennwerte in den LogObjekten vorliegen (**Bild 12**, Punkt 8). Hierbei wird ermittelt, wie sehr der Produktionsplan der Zielfunktion entspricht. Der Zielfunktionswert dient dazu, verschiedene Produktionspläne miteinander zu vergleichen, den besseren Plan auszuwählen und ein performancebasiertes Abbruchkriterium bereitzustellen. Für die drei Stufen ist eine differenzierte Betrachtung der Zielfunktion erforderlich.

### 3.2.6 *Zyklusende*

Die letzte Aktion im Simulationszyklus ist die Abbruchentscheidung (**Bild 12**, Punkt 9). Hier wird entschieden ob ein neuer Optimierungszyklus gestartet werden soll, ob Nutzerinteraktion erforderlich ist oder ob die Stufe erfolgreich abgeschlossen ist. Wird im Anschluss ein neuer Zyklus gestartet, fängt der Algorithmus erneut an, die Nummer des Simulationslaufs zu setzen, LogObjekte zu initialisieren, Einstellungen vorzunehmen, usw.

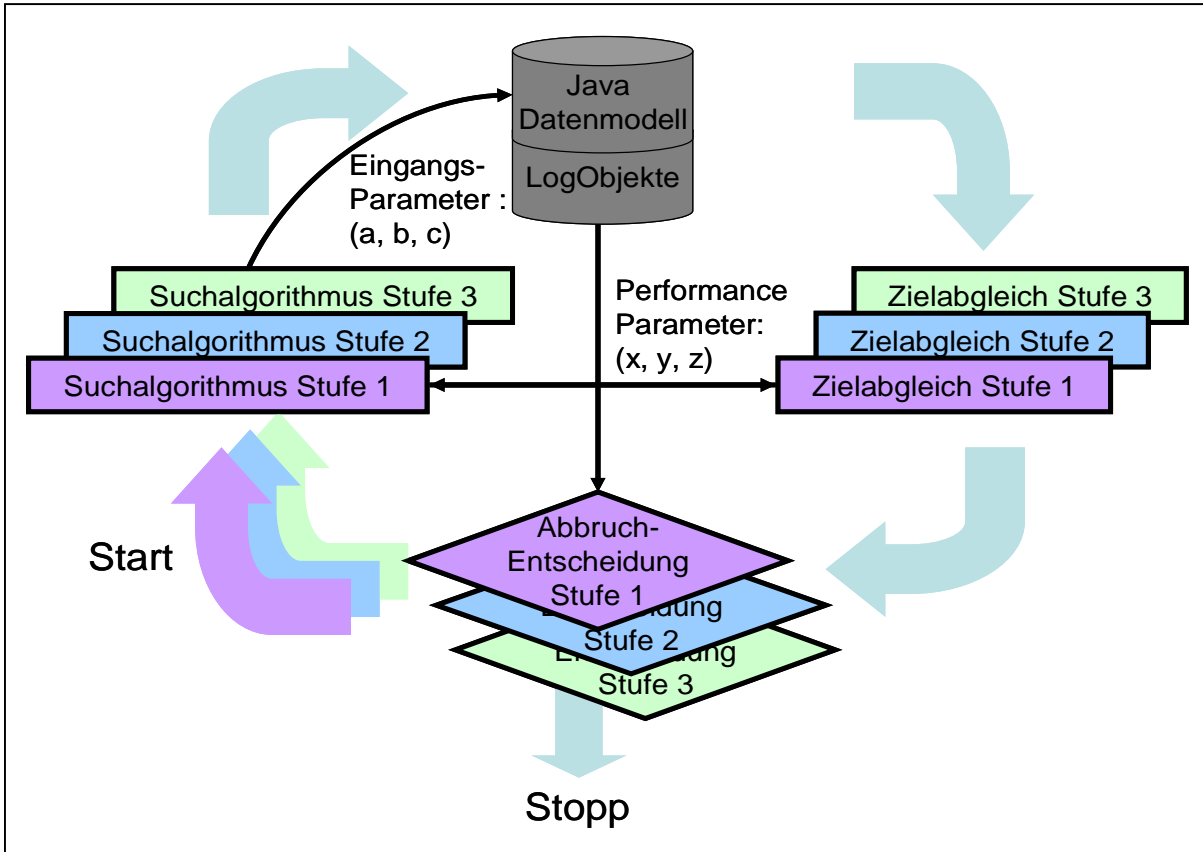
### 3.2.7 *Nutzerinteraktion und Datenausgabe*

Nach Beendigung der Planbewertung und Entscheidung über das Zyklusende besteht die Möglichkeit der Nutzerinteraktion. Die Interaktion ist abhängig von der Bewertung des Produktionsplans und davon in welcher der drei Stufen die Optimierung sich gerade befindet. Ist bereits in der ersten Stufe aufgrund von Verletzungen der Nebenbedingungen kein gültiger Plan entstanden, so besteht die Möglichkeit über Nutzerinteraktion die Restriktionen zu lockern und Modelländerungen vorzunehmen. Auf ein erfolgreiches Abschließen der dritten Stufe folgt die Visualisierung des Gesamtplans für den Nutzer. Zurzeit ist die Datenausgabe in der Datenaufbereitung implementiert. Die Ausgabe der Performanceparameter und Simulationsrohdaten in Form von Textfiles ermöglicht das Testen der gewählten Optimierungsalgorithmen. Im späteren Verlauf sollte die Zwischenausgabe des Produktionsplans nach jeder Stufe erfolgen. Die Idee ist, eine subjektive Performanceverbesserung zu erzielen. Der Nutzer bekommt die Möglichkeit die einzelnen Programmschritte und Ergebnisse nachzuvollziehen.

## 3.3 FUNKTIONSWEISE DES VERFAHRENS

Die Realisierung der drei Stufen spiegelt sich im Wesentlichen in den drei Submodulen des Optimierers wider (vgl. **Bild 13**) - der Zielfunktion, dem Abbruchkriterium und den Simulationseinstellungen. Je nach Stufe ist eine andere Zielstellung, nämlich die der jeweiligen Stufe

implementiert. Das Abbruchkriterium variiert, da unterschiedliche Zielstellungen unterschiedliche Rechenintensität, Konvergenz und Abbrucheigenschaften besitzen. Die Simulationseinstellungen sind unterteilt in Suchalgorithmen und Modelländerungen und variieren von Stufe zu Stufe. In der ersten Stufe sind noch keine Simulationsdaten verfügbar, was verschiedene Initialisierungsstrategien erforderlich macht. In den Folgestufen sind ebenfalls andere Suchstrategien von Interesse, z.B. Mitarbeitersenkung und Bedarfsglättung.



**Bild 13:** Stufendifferenzierter Ablauf

In **Bild 13** sind die Zusammenhänge dieser Submodule des Optimierers dargestellt. Der Ablauf ist durch die dicken Pfeile, der Datenfluss wird durch die dünnen Pfeile dargestellt. Gestartet wird mit der Suche nach Simulationseinstellungen. Die Simulationseinstellungen werden im Java Datenmodell gespeichert. Auf die Darstellung der Simulation wurde bewusst verzichtet. Die Simulation generiert aus dem Java Datenmodell mit den Simulationseinstellungen den Produktionsplan und füllt die Daten in die LogObjekte. Hier werden auch die Performanceparameter gespeichert. Die Zielfunktion ermittelt aus den Performanceparametern die Güte des Produktionsplans. Nach der Abbruchentscheidung folgt der nächste Zyklus derselben Stufe oder es schließt sich ein Stufenübergang an oder die Optimierung stoppt mit der Nutzerinteraktion. Innerhalb einer Stufe bleiben Simulationseinstellungen erhalten und die Suchalgorithmen verbessern iterativ immer den letzten Produktionsplan. Dadurch ist sichergestellt, dass keine Information verloren geht. Bei dem Stufenübergang dient der beste Produktionsplan der Vorgängerstufe als Basis der Verbesserung. Gegebenenfalls werden zusätzlich Modelländerungen vorgenommen.

Die größte Bedeutung in der Optimierung haben die Suchalgorithmen zur Festsetzung der Simulationseinstellungen. Hier steckt die meiste Intelligenz. Aus den Performanceparametern der vorangegangenen Simulation sind die Einstellungen für die Folgesimulation festzusetzen. Ein Simulationslauf generiert keinen guten Produktionsplan, wenn die Simulations-

einstellungen nicht optimal gewählt werden. Bezüglich der Dimensionen sei erwähnt, dass über 100 verschiedene variable Eingangsgrößen (**Bild 13**) für einen Standard-Anwendungsfall (ca. 30 Ressourcen und 2000 Vorgänge) sinnvoll belegt werden müssen. Die gleiche Anzahl Performanceparameter sind dafür auszuwerten. Dementsprechend hoch sind der zeitliche Aufwand und die zu verarbeitende Datenmenge. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass bei Stufenübergängen parallel zu den Suchalgorithmen auch Modelländerungen stattfinden.

Zielfunktion und Abbruchkriterium haben gegenüber den Suchalgorithmen eine eher untergeordnete Bedeutung. Die Zielfunktion dient dem Planvergleich. Ebenso kann der Zielfunktionswert für ein performanceabhängiges Abbruchkriterium verwendet werden. Dementsprechend intelligent muss die Zielfunktion gestaltet werden. Aus reiner Implementierungssicht stellt die Realisierung der Zielfunktion allerdings keine große Herausforderung dar. Das Abbruchkriterium steht aufgrund der festen Zeitbegrenzung ebenfalls nicht im Zentrum des Interesses. Ein gut ausgeklügeltes Abbruchkriterium wird Zeit einsparen bei sofortigem Finden eines sehr guten Plans oder bei sehr schlechten Ergebnissen etwas mehr Zeit für die Generierung eines akzeptablen Produktionsplans einräumen. Allerdings sind die zeitlichen Performanceanforderungen an das Programm so festgesetzt, dass generell sehr wenig Spielraum hierfür besteht.

### 3.4 OPTIMIERUNGsalgorithmen

Durch vielfältige Einstellungen für die Simulation ist es möglich, sehr viele verschiedenartige Produktionspläne zu generieren. Es ist die Aufgabe der Optimierung nach Simulationseinstellungen zu suchen, die einen Produktionsplan hervorbringt, der die jeweilige Zielfunktion bestmöglich erfüllt. Da für Marta II enge Zeitschranken gesetzt sind, ist es unbedingt erforderlich, aus den gegebenen Informationen intelligente Rückschlüsse zu ziehen, um die jeweilige Zielstellung schnell zu erreichen.

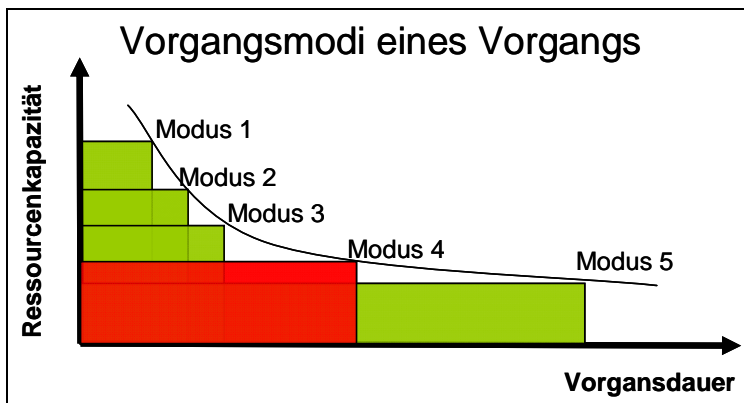
Die drei Stufen, in die sich die Optimierung untergliedert, treffen die Auswahl von Suchalgorithmen und Modelleinstellungen. Während beispielsweise die erste Stufe mit maximaler Mitarbeiteranzahl gestartet werden soll, ist das Ziel der zweiten Stufe die untere Mitarbeiterkapazitätsgrenze zu ermitteln.

Als Datengrundlage für den Suchalgorithmus dienen die Performanceparameter aus der vorherigen Simulation. Da die Simulationseinstellungen auf den Performanceparametern der Vorgängerstufe basieren, die wiederum auf den Simulationseinstellungen des Vorgängers basieren usw. wird über mehrere Zyklen hinweg eine Kette gebildet. Dabei haben selbst die Simulationseinstellungen des ersten Zyklus Einfluss auf den nach mehreren Zyklen erstellten Produktionsplan. Es geht keine Information der Vorgängerstufen verloren. Die Suchalgorithmen müssen nicht nur den letzten erfolgreichen Simulationslauf einbeziehen, sondern ebenfalls alle nicht erfolgreichen Optimierungszyklen.

Die Ausnahme bilden Stufenübergänge und der erste Simulationslauf. Für den ersten Simulationslauf ist eine Entscheidung nötig, wie die Simulationseinstellungen initialisiert werden. Bei Stufenübergängen dient nicht der letzte Simulationslauf, sondern der beste Simulationslauf der Vorgängerstufe als Datengrundlage. Der Grund ist, dass in jeder Stufe in eine andere Richtung optimiert wird, da die Stufenziele unterschiedlich sind. Das Optimum der Vorgängerstufe dient als Basis für die Folgestufe. Die gewonnenen Informationen der Vorgängerstufe werden an die Folgestufe weitergereicht.

Die Auswahl des Vorgangsmodus spiegelt den Mitarbeiterbedarf wider. Es wird angegeben, wie viel Personal für die Bearbeitung eines Vorgangs benötigt wird. Die Mitarbeiterkapazität gibt an, wie viele Mitarbeiter maximal für die Produktion zur Verfügung stehen. Für die Bearbeitung eines Vorgangs stehen mehrere Vorgangsmodi zur Auswahl. Ein Vorgangsmodus

unterscheidet sich von anderen Vorgängen in der Anzahl der eingesetzten Mitarbeiterressourcen und in der benötigten Vorgangsdauer (**Bild 14**). Bereits in der Optimierung fällt die Entscheidung darüber, welcher Vorgangsmodus (im Bild rot) in der Simulation eingeplant wird.



**Bild 14:** Vorgangsmodi

In Abhängigkeit der drei Stufen lassen sich folgende Probleme formulieren:

- Erste Stufe: Initialisierung der Vorgangsmodi
- Zweite Stufe: Senkung der benötigten Ressourcenkapazität eines Vorgangs
- Dritte Stufe: Mitarbeiterressourcenbedarf mit dem Angebot glätten

Zur dritten Stufe ist anzumerken, dass die Bedarfsglättung aufgrund von Modellungenauigkeit noch nicht implementiert ist. Ein Ansatz zur Lösung der dritten Stufe ist, dass das Mitarbeiterangebot durch den Optimierer bzw. das Produktionsplanungs- und Steuerungssystem vorgegeben wird und die Auswahl des Vorgangsmodus vom Simulator gewählt und somit an das Ressourcenangebot angepasst wird. Die Realisierung der ersten und zweiten Stufe wird im folgenden Abschnitt erklärt.

### 3.4.1 Erste Stufe: Initialisierung der Vorgangsmodi

Die Anforderung für die Initialisierung ist, dass der Vorgang mit der Maximalanzahl an Mitarbeitern zu starten ist. Die Idee hierfür ist, die obere Grenze zu finden und sich langsam an die untere Grenze heranzutasten. Dabei soll mit unrealistisch hohem Ressourcenaufwand die Machbarkeit des Produktionsplans zunächst geprüft werden. Dennoch stehen andere Initialisierungsvarianten der Vorgangsmodi zur Auswahl:

- Modus mit der kürzesten Prozesszeit (=Ressourcemaximum)
- Modus mit der längsten Prozesszeit (=Ressourceminimum)
- Das erstes Element in der Liste der Vorgangsmodi
- Der Modus mit den geringsten Auftragsstunden (= Anzahl der benötigten Mitarbeiter multipliziert mit der Zeitdauer der Belegung)
- Der Modus mit den geringsten Ressourcenstunden (vgl. Auftragsstunden, erweitert auf alle benötigten Ressourcen)

Bei der Initialisierung werden alle Modi eines Vorgangs durchsucht und in Abhängigkeit zur oben beschriebenen Initialisierungsvariante verglichen. Der beste Modus eines Vorgangs (bzgl. Initialisierungsvariante) wird „aktiv“ gesetzt. Der „Active“ Modus eines Vorgangs ist derjenige, welcher dem Simulator tatsächlich übergeben wird. Alle anderen stehen in der Simulation nicht zur Auswahl. Aktuell wird die erste Stufe mit dem Modus mit der kürzesten Prozesszeit initialisiert. Das erste Listenelement zu wählen ist ebenso denkbar, da alle Vor-

gangsmodi aufsteigend nach Prozesszeit geordnet sind. Dies hat aber den Nachteil, dass der Algorithmus abhängig von der Korrektheit der Datenbank ist.

Aus Optimierungs- und Performancesicht ist es wenig optimal gleich mit der ungünstigen Kombination (dem Ressourcenmaximum) zu starten und sich langsam dem Optimum (Ressourcenminimum) zu nähern. Sinnvoller ist es, andere Initialisierungsvarianten in Betracht zu ziehen.

### 3.4.2 Zweite Stufe: Senken der Personalressourcen

Der größte Unterschied zur ersten Stufe besteht darin, dass bei der ersten Stufe keine Information aus den Vorgängerzyklen vorliegt, bei der zweiten Stufe hingegen schon. Beim Stufenübergang dient der beste Zyklus der Vorgängerstufe als Datenbasis. Somit ist keine erneute Initialisierung notwendig. Bei Stufenübergängen finden lediglich Modelländerungen statt. Bei der Suche werden Änderungen relativ zu den Einstellungen des besten Simulationslaufs der Vorgängerstufe vorgenommen. Beim Stufenübergang von der ersten zur zweiten Stufe entfällt die Auswahl des besten Simulationslaufs, da in der ersten Stufe nur ein Zyklus durchgeführt wird.

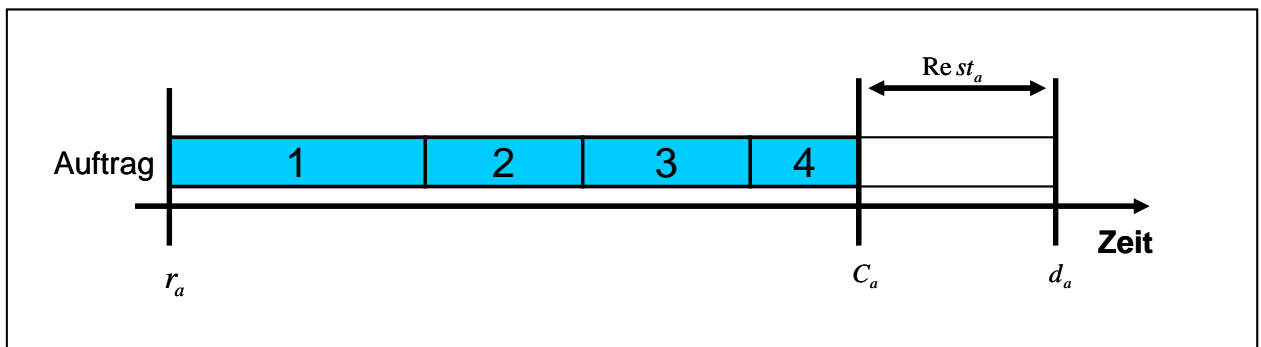
In Stufe zwei werden Vorgänge gewählt, die weniger Mitarbeiterressourcen benötigen und längere Bearbeitungszeiten haben. Die Frage dabei ist, nach welcher Strategie die Vorgänge ausgewählt werden und wie stark der Mitarbeiterbedarf gesenkt wird.

Für das Senken der Personalressourcen wurden drei Suchregeln umgesetzt und analysiert. Sie basieren auf folgenden Prinzipien:

- Restzeitverteilung
- Auslastungsglättung
- Auslastungsbasierte Restzeitverteilung

#### Personalressourcenminimierung durch Restzeitverteilung

Ein Hauptziel der Optimierung ist es, die Restzeit  $Rest_a$ , die Zeit vom Fertigstellungstermin  $C_a$  bis zum Liefertermin  $d_a$  zu minimieren (vgl. **Bild 15**). Daraus ergibt sich die erste Strategie zur Senkung des Mitarbeiterbedarfs. Aufträge mit großer Restzeit werden iterativ Mitarbeiter entzogen, wodurch jeder einzelne Vorgang dieses Auftrages mehr Zeit benötigt. Die Restzeit wird dabei Schritt für Schritt minimiert und gleichmäßig auf alle Vorgänge des Auftrags verteilt. Umgekehrt werden den Aufträgen, die ihren Liefertermin überschreiten (negative Restzeit), mehr Mitarbeiter zugeordnet.



**Bild 15:** Restzeit

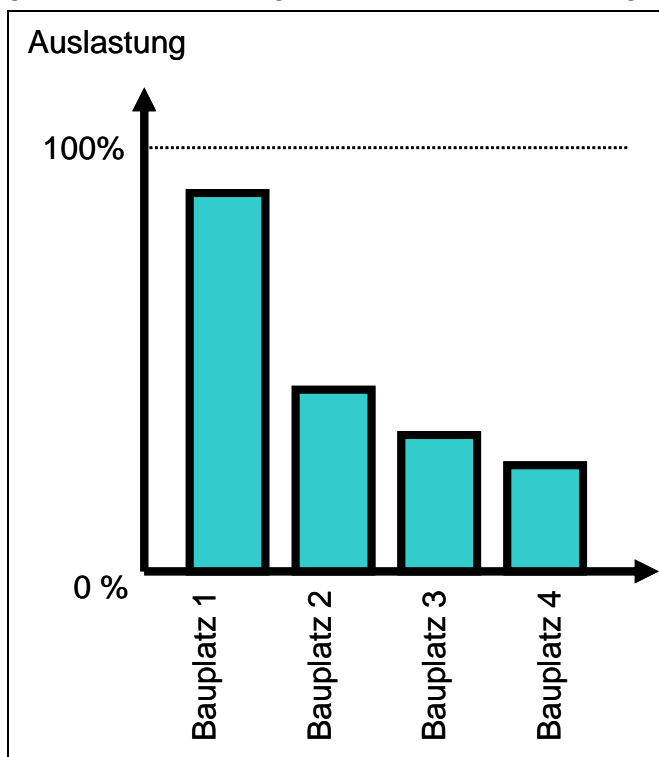
Zuerst wird die Restzeit  $Rest_a$  und die Durchlaufzeit  $C_a - r_a$  des Auftrags ermittelt. Anschließend erfolgt die Berechnung der prozentualen Anteile einzelner Vorgänge an der Durchlaufzeit. Entsprechend dieser Anteile wird die Restzeit auf die Vorgänge verteilt. Ein

Vorgang mit einem bestimmten Anteil an der Durchlaufzeit wird um genau diesen Anteil bzgl. der Restzeit erhöht. Da Vorgänge nur in diskreten Schritten geändert werden - den Vorgangsmodi - ist generell eine Abweichung enthalten. Es wird der Vorgangmodus ausgewählt, der die geringste Abweichung zur angestrebten Vorgangsdauer hat.

#### Personalsenkung durch Auslastungsglättung

Die zweite Strategie ist, die Auslastung auf den Bauplätzen gleichmäßig zu verteilen. Einen wesentlichen Einfluss auf die Bauplatzauslastung hat die Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter. Ein Beispiel zeigt **Bild 16**: Bauplatz 1 ist hoch ausgelastet, weil lange Vorgänge Bauplatz 1 beanspruchen. Bauplatz 4 ist gering ausgelastet, weil kurze Vorgänge über Bauplatz 4 laufen. Die Idee ist, nun Vorgänge auf Bauplatz 1 mit mehr Mitarbeitern und Vorgänge auf Bauplatz 4 mit weniger Mitarbeitern auszustatten. Es sinken insgesamt die Durchführungszeiten der Vorgänge auf Bauplatz 1 und somit die Auslastung (bei gleichbleibender Vorgangszahl). Auf Bauplatz 4 hingegen steigt die Auslastung aufgrund längerer Fertigungszeiten.

Diese Strategie zielt auf einen gleichmäßigen Fertigungsablauf ab. Überauslastungen und hohe Bestände vor den höchstausgelasteten Bauplätzen werden verhindert. Ebenso werden große Unterbrechungen (Leerlaufzeiten) auf zu gering ausgelasteten Bauplätzen minimiert.



**Bild 16:** Unterschiedliche Ressourcenauslastung

Nach der Simulation werden alle Bauplätze aufsteigend nach Auslastung geordnet. Die Vorgänge auf gering ausgelasteten Bauplätzen werden in ihrer Durchführungszeit verlängert. Bei negativer Restzeit werden die Prozesszeiten auf hoch ausgelasteten Bauplätzen verkürzt. Dieser Suchalgorithmus ist in der Schrittweite parametrierbar. Die Parametrierung beinhaltet wie viele Bauplätze berücksichtigt werden und um wie viel Plätze im Ranking der Prozesszeit die Modi auf diesen Bauplätzen gesenkt werden. In der aktuellen Version erfolgt die Ressourcensenkung auf den drei höchstausgelasteten Bauplätzen um jeweils einen Platz im Prozesszeit-Ranking.

Das Ranking hat den Vorteil, dass alle Vorgangsmodi in Beziehung zueinander gesetzt werden. Die Optimierung kann dann durch die Rankingzahl sehr gut erkennen, ob der Vor-

gangsmodus ein Kriterium gut oder weniger gut erfüllt (verglichen mit den zur Auswahl stehenden Vorgangsmodi). Werden bei der Optimierung Vorgangsmodi verändert, bedeutet das, dass Vorgangsmodi gewählt werden, die einige Schritte im Ranking vor oder hinter dem aktuell ausgewählten Vorgangsmodus stehen.

Personalsenkung durch auslastungsbasierte Restzeitverteilung

Die dritte Strategie setzt sich aus der Kombination der beiden oben beschriebenen Strategien zusammen. Bei jedem Auftrag wird die Restzeit individuell verteilt, allerdings nicht gleichmäßig auf alle Vorgänge, sondern abhängig von der Auslastung der Bauplatzressource eines Vorgangs. Vorgänge dieses Auftrags auf Bauplätzen mit geringer Auslastung der Bauplatzressource werden gemäß Schema Mitarbeiter entzogen (vgl. **Bild 17**). Die Durchführungszeit dieser Vorgänge wird erhöht. Vorgängen auf Bauplätzen mit hoher Auslastung werden nur geringfügig Mitarbeiter entzogen. Einem Vorgang eines Auftrages mit geringer Restzeit, also mit kurzer Zeit bis zum Liefertermin werden nur geringfügig Mitarbeiter entzogen. Vorgänge auf Bauplätzen mit geringer Auslastung und großer Restzeit werden verstärkt Mitarbeiter entzogen. Sollte die Restzeit negativ sein, werden Mitarbeiter zu den Vorgängen eines Auftrags hinzugefügt, bevorzugt auf hoch ausgelasteten Bauplätzen.

		Bauplatzauslastung	
		Geringe Auslastung	Hohe Auslastung
Auftragsrestzeit	Große Restzeit	Hoher Mitarbeiterentzug	Geringer Mitarbeiterentzug
	Geringe Restzeit	Geringer Mitarbeiterentzug	Keine Änderung

**Bild 17:** Schema Vorgangsänderung

Der Restzeit wird ermittelt und die Bauplätze werden nach der Auslastung sortiert. Zur Ressourcenminimierung werden die Vorgänge auf gering ausgelasteten Bauplätzen in der Durchführungszeit verlängert. Die Veränderung geschieht über vorher definierte Anteile an der Restzeit. Die Parametrierung des Suchalgorithmus beinhaltet, auf wie vielen Bauplätzen Vorgänge geändert werden. Ebenfalls enthalten ist, um wie viel Prozent der Restzeit die Vorgänge in der Durchführungszeit erhöht werden. Aufgrund der Eigenschaft diskreter Vorgänge wird der Vorgangsmodus ausgewählt, der die geringste Abweichung zur angestrebten Vorgangsdauer hat. Aktuell werden die Vorgänge auf 3 Bauplätzen um jeweils 33% der Restzeit geändert. Der Algorithmus hat großes Verbesserungspotential durch exaktere Parametrierung bzw. dynamische Veränderung der zu verteilenden Restzeit auf unterschiedlich ausgelasteten Bauplätzen. Durch die bessere Verteilung werden das Konvergenzverhalten und die Plangüte verbessert.

Alle drei Strategien (Restzeitverteilung, Auslastungsglättung, auslastungsbasierte Restzeitverteilung) wurden erfolgreich implementiert. Je nach Optimierungsziel sind diese Methoden beliebig parametrierbar, erweiterbar oder austauschbar. Aktuell wird die zweite Stufe nach dem Prinzip der auslastungsbasierten Restzeitverteilung optimiert.

### 3.4.3 Zielfunktion

Die Planbewertung (Zielfunktion) beinhaltet die Auswahl und Gewichtung der Performanceparameter, die den generierten Produktionsplan bewerten. Das Ergebnis der Zielfunktion stellt zusätzlich ein verwertbares Abbruchkriterium zur Verfügung. Für die Erstellung der Zielfunktion ist eine sinnvolle Auswahl der entscheidenden Parameter zu treffen. Die Erstellung der Zielfunktion orientiert sich an der zu generierenden Aussage der jeweiligen Stufe.

Die Zielfunktion hat keinen Einfluss auf die Simulationseinstellungen. Hierfür ist der durch die Zielfunktion generierte Kennwert viel zu abstrakt und bietet keine differenzierte Betrachtung der vielen unterschiedlichen Einstellungen (Bereitstellungszeiten, Vorgangsmodi, Mitarbeiteranzahl).

#### Anforderung Zielfunktion

In der ersten Stufe ist die Gültigkeit von Interesse. Die Frage, ob ein gültiger Plan mit maximalem Ressourcenaufwand überhaupt möglich ist, wird hierbei beantwortet. Gerade bei Überlastung der Linie hat diese Information eine besondere Bedeutung.

Die zweite Stufe ermittelt das Mitarbeiterminimum. Es wird berechnet, wie viele Mitarbeiter minimal nötig sind, um alle Aufträge innerhalb der Termin- und Restriktionsgrenzen zu erfüllen.

Die dritte Stufe dient der Bedarfsglättung. Es werden der Produktionsplan und das Mitarbeiterprofil ermittelt, bei dem geringer Leerlauf entsteht.

Nebenkriterien wie niedrige Bestände, wenig Bauplatzwechsel der Mitarbeiter, Orientierung der Vorgangsstart- und -endtermine an den Schichtwechselerminen sind von Interesse. Diese Kriterien müssen spätestens in Stufe 3, in der Zielfunktion bzw. den Simulationseinstellungen mit sinnvoller Gewichtung einfließen.

#### Konkrete Zielfunktion

Die erste Stufe dient der Ermittlung der kürzesten Durchlaufzeit. Sie enthält den Test, ob alle Rahmentermine eingehalten sind. Wenn alle Restriktionen erfüllt sind, ist die Simulation erfolgreich.

Zielfunktion erste Stufe:

$$\text{Minimum}(DLZ_a) \text{ und } d_a - C_a \geq 0 \text{ für } \forall A$$

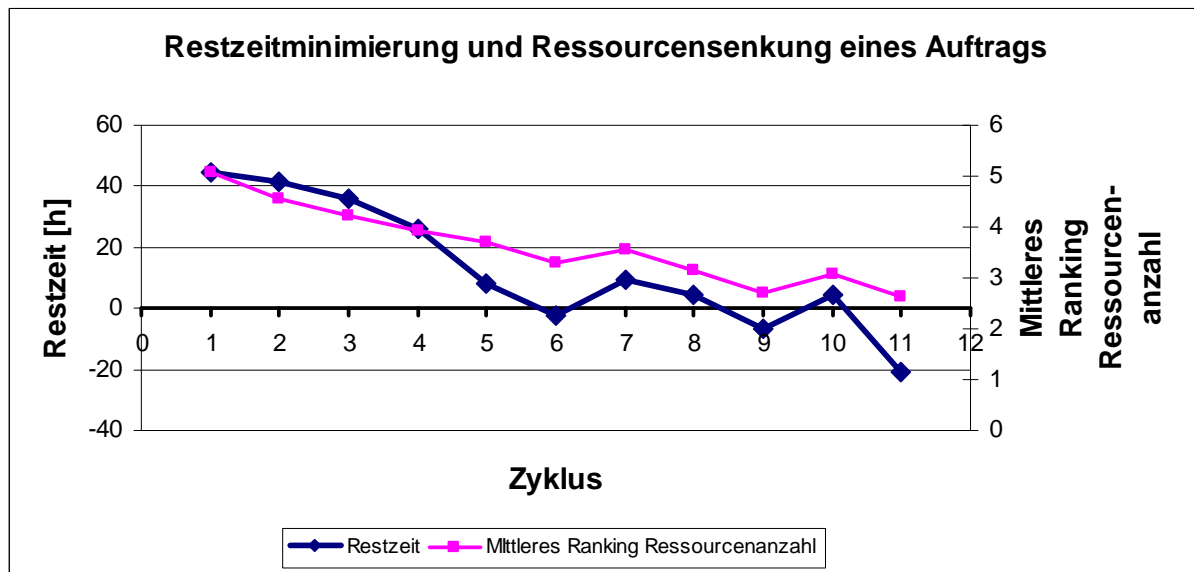
Die Zielfunktion in der zweiten Stufe testet, ob die Simulation erfolgreich verlaufen ist (Analog zur ersten Stufe). Es wird ermittelt, ob die mittlere Restzeit und somit die Mitarbeiteranzahl minimal ist.

Zielfunktion zweite Stufe:

$$\text{Minimum} \left( \frac{\sum_{a \in A} \text{Rest}_a}{|A|} \right)$$

#### Analyse Zielfunktion

In **Bild 18** ist das Ergebnis der Zielfunktion aufgetragen. Für die erste Stufe mit Zyklus 1 erfolgt der Test, ob die Rahmentermine eingehalten wurden. Da die Restzeit positiv ist und kein Rahmentermin verletzt wird, ist die Zielfunktion der ersten Stufe erfüllt. In der zweiten Stufe werden kontinuierlich die Mitarbeitermengen der Vorgänge gesenkt. Je weniger Mitarbeiter eingesetzt werden desto geringer ist die Restzeit. Hierzu dient der Vergleich der mittleren Rankings der Ressourcenanzahl aller Vorgänge (violett) mit der Restzeit des Auftrags (blau).



**Bild 18:** Analyse der Zielfunktion

Von den erzeugten Produktionsplänen in der zweiten Stufe hat der zehnte Zyklus den besten Plan hervorgebracht. Die Zielfunktion wählt diesen als besten Plan, da die Restzeit minimal ist. Die Restzeit ist nicht negativ. Es tritt keine Verletzung der Rahmentermine auf.

### 3.4.4 Abbruchkriterium

Der Optimierer muss ein geeignetes Abbruchkriterium haben, um zu bewerten, wann die Zielsetzung der jeweiligen Stufe erreicht ist und keine weiteren Simulationszyklen mehr erforderlich sind.

#### Auswahl Abbruchkriterien

Als Abbruchkriterium stehen mehrere Varianten zur Auswahl. Sie gliedern sich in ergebnisabhängige Abbruchkriterien (abhängig von Performancegrößen eines generierten Produktionsplans) und aufwandsabhängige Kriterien (z. B. Rechenzeit und Zyklusanzahl). In Anlehnung an Marta II werden nachfolgende Varianten mit Vor- und Nachteilen kurz erläutert.

#### *Feste Zyklusanzahl*

Der Abbruch erfolgt nach einer fest definierten Anzahl von Simulationsläufen. Die Anzahl der Zyklen wird dem Programm vor der Optimierung als Parameter übergeben. Der Vorteil ist, dass der Abbruch garantiert wird. Die geforderten Zeitgrenzen werden stets eingehalten. Weiterhin ist dieses Abbruchkriterium einfach zu implementieren. Es ist geeignet für Test und Analysen der Optimierungsalgorithmen aufgrund gleicher Testbedingungen.

Der Nachteil dabei ist, dass ein positives Ergebnis nicht garantiert wird. Ebenso ist die Zyklusanzahl ein Parameter, der auf Erfahrung basiert und von Fall zu Fall nicht optimal ist.

#### *Festes Zeitlimit*

Ein festes Zeitlimit entspricht dem Abbruchkriterium mit fester Zyklusanzahl, wobei hier die Anzahl der Zyklen durch die Zeitdauer ersetzt wird. Vor- und Nachteile sind vergleichbar mit denen der festen Zyklusanzahl. Bei schwankender Zyklusdauer erfolgt mit einem festen Zeitlimit eine noch exaktere Einhaltung der zeitlichen Anforderungen.

#### *Relative Performanceverbesserung*

Der Abbruch erfolgt, wenn die relative Performanceverbesserung zwischen den Zyklen unter einen bestimmten Schwellwert absinkt. Vorteilhaft ist, dass dieses Abbruchkriterium einen Produktionsplan mit gutem Aufwand- Nutzen- Verhältnis liefert. Der Nachteil ist der unbe-

kannte Rechenaufwand bzw. die nicht abschätzbare Rechenzeit. Es besteht die Gefahr eines Abbruchs beim Erreichen von einem lokalen Optimum.

### *Absolutes Performancekriterium*

Der Optimierungszyklus bricht ab, wenn ein oder mehrere vorher festgelegte Performancekennwerte erreicht werden. Der Vorteil ist, dass das Abbruchkriterium stark erfolgsorientiert ist. Es sind mehrere Performanceparameter einbeziehbar. Die Optimierung endet erst wenn der Plan die Performancegrenzen erfüllt. Der Nachteil ist, dass eine aufwendige Parametrierung dieser Schwellwerte erforderlich ist. Die Parameter basieren auf Erfahrungswerten, können sich aber von Fall zu Fall bezüglich ihres Erfolgs stark unterscheiden. Weiterhin wird nicht gezielt nach Plänen gesucht, die die Performancekriterien übertreffen. Der Rechenaufwand bzw. die Rechenzeit sind nicht abschätzbar.

### *Gültigkeit*

Der Abbruch erfolgt nach Erzeugung eines gültigen Plans. Werden keine internen Restriktionen verletzt, so ist der Plan gültig. Das Kriterium der Gültigkeit ist ein Spezialfall des absoluten Performancekriteriums. Der Vorteil ist, dass erfolgsorientiert nach einem gültigen Plan gesucht wird. Die Gültigkeit stellt ein einfaches Performancekriterium dar. Nachteil ist, dass der Produktionsplan keine weiteren Kriterien berücksichtigt. Die Rechenzeit ist nicht abschätzbar.

### *Kombination mehrerer Kriterien*

Die Kombination der Abbruchkriterien dient dazu, die Vorteile von den oben beschriebenen Abbruchkriterien zu vereinen. So wird sichergestellt, dass die gegebenen Zeitgrenzen genutzt werden, aber auch die Performancegrößen Einfluss haben. Von Vorteil ist, dass die Zeitgrenzen im hohen Maße garantiert sind und dennoch die Performancekriterien berücksichtigt werden. Der Nachteil ist, dass aufgrund fest vorgegebener Zeitgrenzen der Nutzen minimal ist.

### Konkrete Implementierung

Für die Implementierung wurde eine feste Zyklusanzahl ausgewählt. Der Grund ist, dass in der aktuellen Phase des Projekts eine feste Zyklusanzahl gleichbleibende Testbedingungen garantiert. Fehlverhalten und Konvergenz zwischen verschiedenen Optimierungsläufen sind vergleichbar und reproduzierbar. Es lassen sich Performancetests und Speichertests sehr gut durch eine Veränderung der Zyklusanzahl realisieren.

Für die erste Stufe erfolgt exakt ein Durchlauf. Anschließend wird die Zielfunktion - die Gültigkeit des Plans - ermittelt. Ist die Zielfunktion erfüllt, wird die Optimierung der zweiten Stufe mit neuer Zielfunktion begonnen. Ist die Zielfunktion nicht erfüllt, folgt zukünftig die Nutzerinteraktion zum Anpassen der Restriktionen.

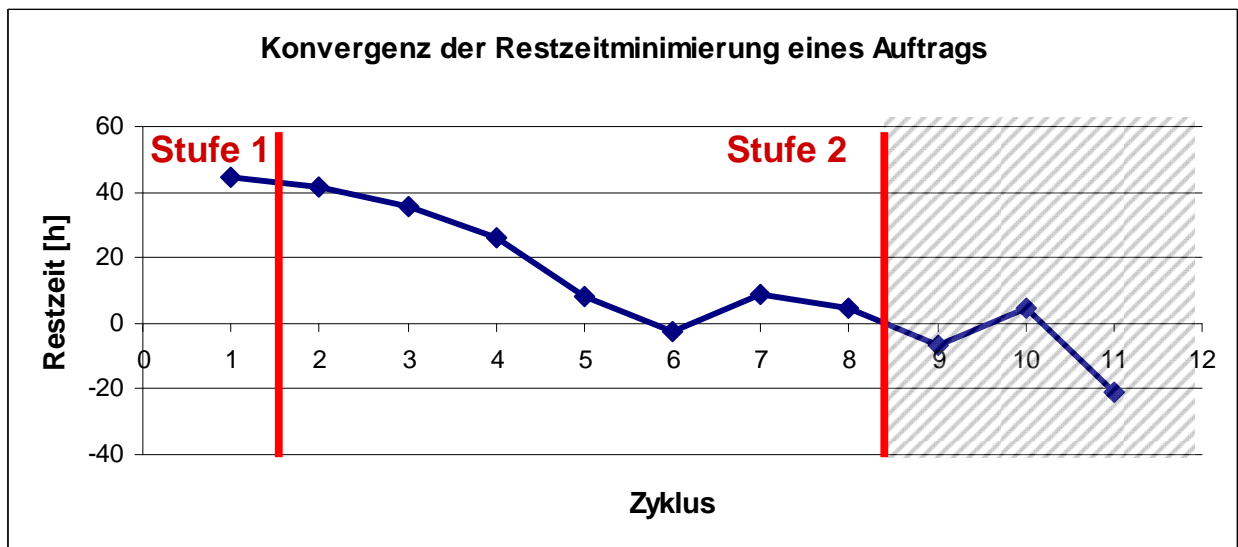
In der zweiten Stufe ist eine feste Zykluszahl mit einem Abbruch nach 7 Zyklen implementiert. Somit ist sichergestellt, dass gleichbleibende Bedingungen für Implementierung und Test vorliegen. Die Zyklusanzahl ist so gewählt, dass aussagekräftige Daten nach kurzer Zeit vorliegen.

Für eine zukünftige Implementierung ist eine feste Zyklusanzahl in Kombination mit einem performanceabhängigen Abbruch von Vorteil. Der Grund ist, dass das fertige Tool feste Zeitgrenzen erfüllen muss. Die Berechnung darf nicht länger als 3-5 Minuten dauern. Die Einbeziehung von performancerelevanten Kriterien innerhalb maximaler und minimaler Zyklusgrenzen erlaubt einen Abbruch, wenn ein günstiger Produktionsplan bereits vorzeitig vorliegt.

### Analyse Abbruchkriterium

In **Bild 19** sind die Grenzen für den Abbruch der ersten Stufe nach einem Zyklus und der zweiten Stufe nach weiteren sieben Zyklen aufgetragen (Abbildung analog zu **Bild 18**). Am Beispiel ist erkennbar, dass bereits nach wenigen Zyklen der Algorithmus konvergiert. Eine Restzeit nahe der Null wird erreicht und ein Abbruch kann erfolgen. Das Konvergenzverhalten variiert, weil es von vielen Faktoren u. a. der Güte der Simulationseinstellungen, dem Auftragsvolumen und von dem konkreten Produktionsplan abhängig ist.

Der Abbruch für die zweite Stufe geschieht bereits nach dem achten Zyklus. Der ursprünglich beste Produktionsplan aus dem zehnten Zyklus steht nicht mehr zu Auswahl. Bei einem Abbruch nach dem achten Simulationszyklus wählt die Zielfunktion den achten Zyklus der im Vergleich zu seinen Vorgängerzyklen den besten Produktionsplan mit der geringsten Restzeit hervorgebracht hat. Der Produktionsplan des achten Zyklus ist minimal schlechter als der des zehnten Zyklus (was in der Grafik nicht mehr erkennbar ist). Das Abbruchkriterium hat Einfluss auf die Menge der bei der Zielfunktion vergleichbaren Produktionspläne.



**Bild 19:** Abbruchkriterium

Insgesamt wird für 8 Zyklen eine Rechenzeit von 2:49 Minuten benötigt. Die Rechenzeit liegt über der Erwartungshaltung. Für Implementierung, Test und Parametrierung der Optimierung kommt der Abbruch nach 20 Zyklen (ca. 7 Minuten). Damit kann das Verhalten der Optimierungsalgorithmen beobachtet werden, nachdem die Performanceparameter einen Konvergenzradius erreichen.

### 3.5 BEWERTUNG DER SIMULATIONSBASIERTEN HEURISTIK

Um die Ergebnisse der Analyse bewerten zu können, müssten sie unabhängig voneinander getestet werden. Diese Testläufe werden in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben. Nachfolgend werden die Experimente und Ergebnisparameter entsprechend der bereits vorgestellten Optimierungsstufen näher erläutert.

#### 3.5.1 Experimente Stufe 1

Die Modelle von drei realen Montagesystemen bilden die Grundlage der Experimente zum Verfahrenstest. Jedes dieser Montagesysteme besteht dabei aus:

- mindestens sechs bis maximal 18 Aufträgen in einem Planungszeitraum,
- mit durchschnittlich 40 bis 60 Vorgängen, wovon mindestens ein Drittel der Vorgänge jeweils 4 bis teilweise sogar 18 Vorgangsmodi aufweisen und mindestens ein Viertel der Vorgänge dazu noch Betriebsmittelalternativen besitzen,

- außerdem gibt es mindestens 20 limitierte Betriebsmittel sowie mindestens zehn Qualifikationsgruppen.

Für alle Montagemodelle gibt es jeweils zwei Produktionsszenarien mit:

- geringer Auftragsmenge und wenig Personal sowie
- vielen Aufträge und mehr Personal.

Mit Hilfe dieser Szenarien werden nun in der ersten Stufe exemplarisch die Untersuchungen der Prioritätsregeln für die:

- Auftragsregeln und
- Betriebsmittelregeln

exemplarisch vorgestellt. Ziel der Analyse in der ersten Stufe ist es, eine Regelkombination herauszufinden, bei der:

- die Durchlaufzeit der Aufträge minimal und demzufolge
- die Restzeit der Aufträge maximal wird.

In **Bild 20** sind die Ergebnisse zu den Untersuchungen der Auftragsregeln aufgeführt. Die Werte beziehen sich auf die durchschnittliche Höhe der Restzeit pro Auftrag. Das jeweils beste Ergebnis ist grau markiert.

Durchschnittliche Restzeit pro Auftrag in der 1.Stufe								
		FIFO	LIFO	ERD	EDD	CR	SPT	LPT
Modell	1a	188,0 h	180,5 h	186,3 h	186,2 h	186,8 h	184,2 h	182,6 h
Modell	1b	121,3 h	112,8 h	117,5 h	117,4 h	118,1 h	119,7 h	114,3 h
Modell	2a	108,0 h	103,8 h	105,3 h	105,2 h	105,9 h	107,7 h	105,3 h
Modell	2b	71,1 h	67,9 h	67,4 h	67,4 h	66,8 h	71,8 h	64,4 h
Modell	3a	235,2 h	231,7 h	229,9 h	230,0 h	230,4 h	236,4 h	230,3 h
Modell	3b	216,5 h	213,2 h	212,9 h	212,9 h	213,2 h	217,3 h	212,6 h

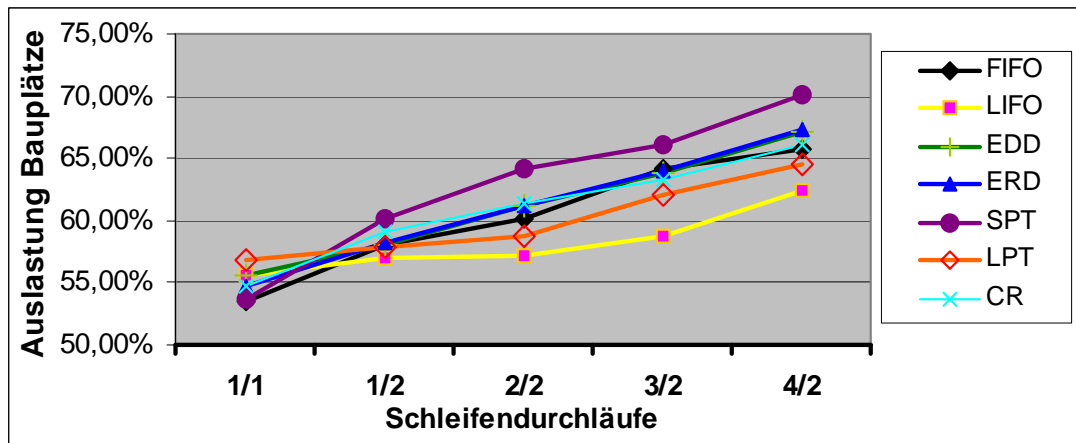
**Bild 20:** Experimente zu den Jobauswahlregeln der ersten Stufe

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Regeln sind nicht groß. An dieser Stelle werden die Grenzen realer Modelldaten sichtbar, denn es wird deutlich, dass teilweise zu strenge Vorgaben gegeben sind, um deutliche Effekte zu verzeichnen.

Bei den Modellen 1a, 1b und 2a weist die FIFO-Regel die besten Ergebnisse auf. Demgegenüber wurden bei den Modellen 2b 3a und 3b mit der SPT-Regel die höchsten Restzeiten pro Auftrag erzielt. Die daraus resultierende Restzeitdifferenz vom besten zum schlechtesten Ergebnis beträgt bei allen Modellen nur durchschnittlich 6,4 Stunden.

Bei der Einsteuerung mit LIFO gab es Überholungen der Aufträge und daraus resultierende Wartezeiten, welche die Restzeit negativ beeinflussen. Zudem ist auffällig, dass die EDD- und die ERD-Regel nahezu identische Werte aufweisen. Das zeigt, dass die genutzten Modelle aufgrund der Vorgaben des übergeordneten PPS-Systems bei der Ein- und Aussteuerung der Aufträge identische Reihenfolgen besitzen. Ähnlich verhält es sich bei der CR-Regel.

Um die Auswirkungen der verschiedenen Regeln besser untersuchen zu können, wird in **Bild 21** die Veränderung der Kennwerte über mehrere Optimierungsschleifen aufgezeigt. Dazu werden für die einzelnen Regeln die Entwicklung der durchschnittlichen Bauplatzauslastung des Modells 2b dargestellt.

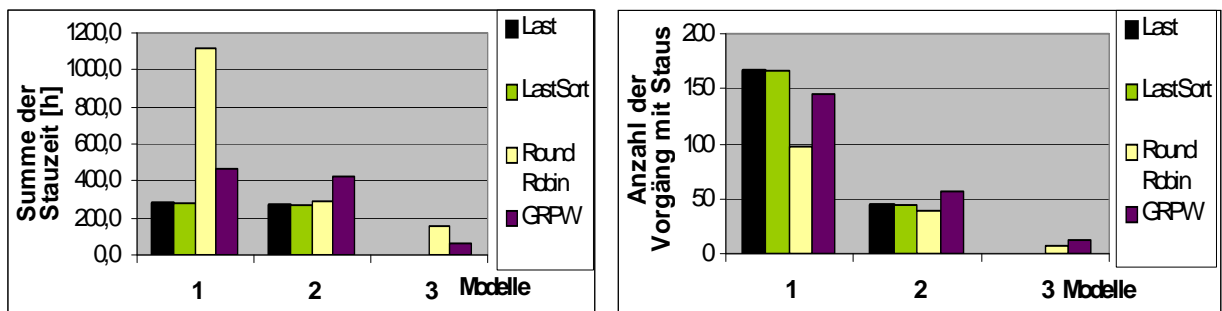


**Bild 21:** Entwicklung der Auftragsregeln über mehrere Schleifen

Während in der ersten Schleife die minimale Durchlaufzeit angestrebt wird, besteht in den folgenden vier Durchläufen der zweiten Stufe das Ziel der maximalen Auslastung. Aus diesem Grund weist zum Beispiel die SPT-Regel zu Beginn einen niedrigen Wert auf (53,6 Prozent), der dann aber nach vier Durchläufen mit ihr die höchste Auslastung (70,16 Prozent) erreicht hat.

Bei der Analyse der Betriebsmittelregeln ergaben sich die folgenden Kennlinien (vgl. **Bild 22**). Dabei ist für jedes Modell zum einen die Summe an Stauzeiten aller Vorgänge und zum anderen die Menge an Staus im Planungszeitraum aufgeführt. Aufgrund der Charakteristika der realen Montagemodelle konnten dabei bestimmte Regeln nicht angewendet werden. Beispielsweise lässt sich die SPT-Regel nicht nutzen, da in den Montagssystemen nur homogen parallele Bauplätze vorliegen und somit die Vorgangszeiten bei Betriebsmittelalternativen gleich sind. Daher wurden folgende Regeln eingesetzt:

- Lastorientierte Verteilungsregel
- Lastorientiert-sortierte Verteilungsregel
- Round Robin
- GRPW-Regel



**Bild 22:** Experimente zu den Betriebsmittelregeln der ersten Stufe

Bei allen drei Modellen (in Szenario a) weisen die lastorientierte und die lastorientiert-sortierte Verteilungsregel die besten Ergebnisse auf. Im dritten Modell konnten mit ihnen alle eventuellen Staus verhindert werden. Bei beiden Regeln sind dabei die Werte identisch.

Demgegenüber treten bei Round Robin hohe Stauzeiten auf. Besonders auffällig ist dabei das Ergebnis von Modell 1. Bei der Betrachtung der Anzahl der Staus zeigt sich, dass diese hohen Stauzeiten aber insgesamt aus nur wenigen Staus resultieren. Beim Modell eins gibt

es sogar fast 70 Staus weniger. Kommt es nicht zu solchen Verklemmungen, lassen sich auch mit dieser Regel gute Ergebnisse erzeugen (zum Beispiel im zweiten Modell).

Auch die Regel mit der von Außen vorgegebenen Reihenfolge erweist sich als zu inflexibel. Durch sie entstehen durchschnittlich 60 Prozent längere Stauzeiten gegenüber der Lastverteilung.

In **Bild 23** ist die Rechenzeit der einzelnen Programmteile dargestellt. Bei den einzelnen Szenarien ist die Zeit jeweils gleich.

	Einlesen der Eingangsdaten	Optimierungsschritt	Bewertungsschritt			Summe pro Schleife
			Simulationsmodell erstellen	Simulation	Auswertung	
<b>Modell 1</b>	6,00 s	3,80 s	2,00 s	20 s	1,2 s	<b>33,00 s</b>
<b>Modell 2</b>	0,70 s	1,70 s	0,40 s	3,9 s	0,8 s	<b>7,50 s</b>
<b>Modell 3</b>	0,60 s	1,90 s	0,93 s	5 s	0,87 s	<b>9,30 s</b>

Pentium Core Duo Rechner mit 2\*2,8 GHz und 3 GByte RAM

**Bild 23:** Rechenzeit der Modelle

Es zeigt sich, dass das Modell 1 wesentlich schwieriger zu simulieren ist als die anderen beiden Modelle. Die Modelle zwei und drei unterscheiden sich in ihrer Rechenzeit kaum. Aufgrund der Rechenzeit lässt sich die Maximalzahl der Schleifendurchläufe abschätzen. Beispielsweise können bei drei Minuten Gesamtrechenzeit mit den Modellen zwei und drei 19, mit dem Modell eins hingegen nur fünf Durchläufe ausgeführt werden.

### 3.5.2 Experimente Stufe 2

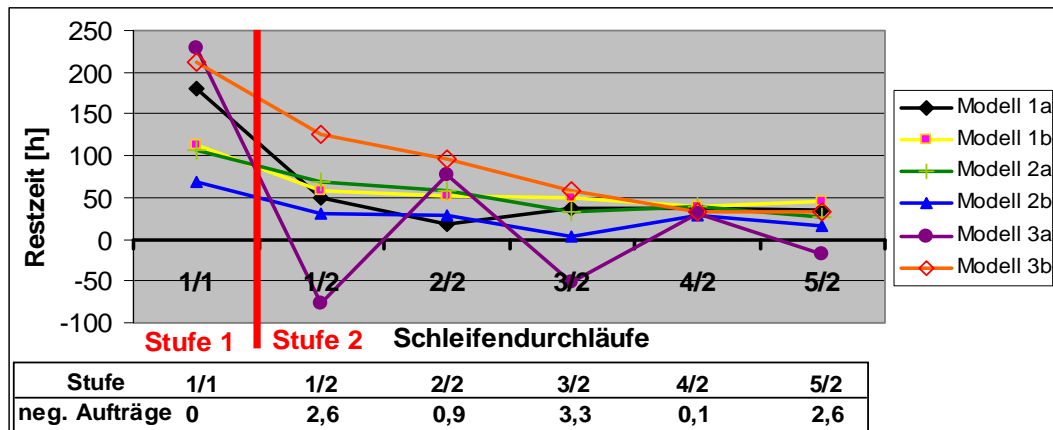
Im Folgenden werden die wesentlichen Testergebnissen der Analysen zu den in diesem Unterpunkt besprochenen Personalverteilungsmethoden vorgestellt. Sie basieren alle auf den im Experimente der ersten Stufe beschriebenen Modellen. Auf deren Grundlage werden nacheinander die Lösungsqualitäten:

- der auslastungsbasierten Verteilungsmethode,
- der Restzeitverteilung und
- der auslastungsbasierten Restzeitverteilung

vorgestellt. Bei allen Untersuchungen der zweiten Stufe besteht das Ziel, die Restzeit aller Aufträge durch möglichst wenige Schleifendurchläufe auf ein Minimum zu senken. Eine minimale Restzeit impliziert die maximale Streckung der Vorgangsdauer und damit verbunden den minimalen Bedarf an Mitarbeiterressourcen.

Um dieselbe Ausgangsbasis für die vergleichenden Analysen zu gewährleisten, bleiben die Auswahlregeln unverändert. Die Aufträge werden durch die SPT-Regel, Weg- und Betriebsmittelalternativen durch die lastorientierte Verteilungsregel gewählt.

In **Bild 24** sind die Ergebnisse der auslastungsbasierten Verteilung für die sechs Modelle dargestellt. Die Kennlinien beziehen sich auf die Entwicklung der durchschnittlichen Restzeit pro Modell. In der darunter liegenden Tabelle ist zudem die mittlere Anzahl von Aufträgen mit negativer Restzeit angegeben. Die negative Restzeit bedeutet eine Überschreitung der Rahmenendtermine, so dass die Stufe nicht beendet werden kann. Nach fünf Durchläufen würde die Berechnung der zweiten Stufe spätestens abgebrochen werden, da die hohe Rechenzeitbeschränkung nicht mehr Durchläufe zulässt. Bei jedem Modell wurde aber bis dahin mindestens eine gültige Lösung erzeugt.



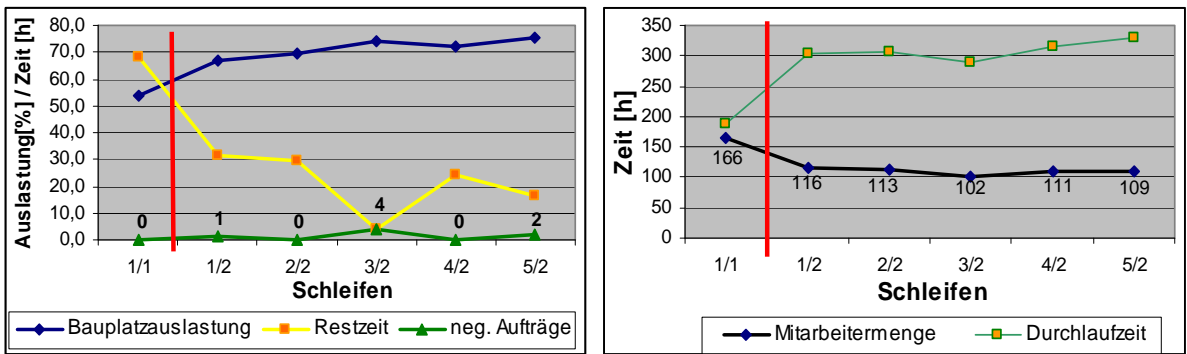
**Bild 24:** Experimente zur auslastungsbasierten Restzeitverteilung

Bei allen Modellen (mit Ausnahme des Modells 3a) sinkt die Restzeit pro Auftrag kontinuierlich – in den ersten drei Durchläufen durchschnittlich um 31 Prozent –. Spätestens ab der dritten Schleife flacht der Kurvenverlauf ab (sie sinkt dann nur noch um durchschnittlich 8 Prozent).

Bei den Modellen 1a, 1b sowie vor allem 3a ist bei einigen Schleifen ein Anstieg der Restzeit festzustellen. Besonders auffällig sind dabei die großen Restzeitschwankungen im Modell 3a. Dieser Anstieg resultiert aus der Tatsache, dass durch eine zu große Restzeitverteilung einige Aufträge Terminüberschreitungen aufweisen. Deshalb musste bei den betroffenen Aufträgen die Vorgangsdauer in der darauf folgenden Stufe wieder verkürzt werden, was den Anstieg der Restzeit erklärt. Treten bei der erneuten Senkung wiederum Terminverzögerungen auf, kommt es zu starken Schwingungen. Aufgrund der Dämpfungsfunktion verringern sie sich nach jedem Durchlauf.

Nach dem vierten Durchlauf ist bei allen Modellen spätestens das Ergebnis gefunden. Dann liegen bei den Aufträgen keine Terminüberschreitungen mehr vor. Der Wert von 0,1 bei den Terminüberschreitungen entstammt dem Modell 1a, das schon in der dritten Stufe alle Aufträge positive Werte aufwies und durch die Restzeitsenkung nun wieder einen negativen Auftrag erzeugte. Die durchschnittliche Restzeit pro Auftrag beträgt nach dieser Schleife 34 Stunden, das einer durchschnittlichen Restzeitverringerung gegenüber der ersten Stufe auf 25 Prozent bedeutet. Bei einigen Modellen kann die Verteilung in dieser Stufe schon nach der zweiten Schleife beendet werden, allerdings liegt das durchschnittliche Niveau der Restzeit dann bei 56 Stunden pro Auftrag. Dies entspricht nur einer durchschnittlichen Senkung der Restzeit gegenüber der ersten Stufe auf 41 Prozent.

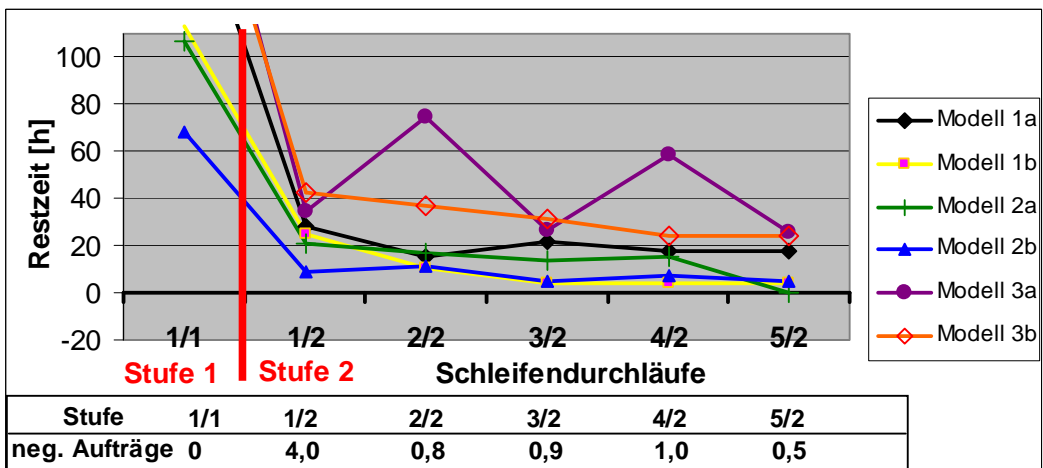
In den folgenden Kennlinien von **Bild 25** sind für ein Modell die durchschnittliche Restzeit und Bauplatzauslastung sowie die Entwicklung der durchschnittlichen Durchlaufzeit pro Auftrag und Gesamtzahl der benötigten Mitarbeiter im Montagesystem gegenübergestellt.



**Bild 25:** Kennwerte eines Modells

Bei der Betrachtung dieser Kennlinien fällt auf, dass die Bauplatzauslastung ab dem zweiten Durchlauf der zweiten Stufe weniger stark ansteigt. Das zeigt, dass es bei hoher Auslastung eine erneute Steigerung immer schwieriger zu ermitteln ist. Vom dritten zum vierten Durchlauf sinkt sie bei diesem Modell sogar leicht. Diese Verminderung hängt mit Terminüberschreitungen einiger Aufträge zusammen, denn dadurch müssen die Vorgangsdauern wiederum verkürzt werden. Dies zeigt ebenfalls negative Auswirkungen bei der Durchlaufzeit der Aufträge sowie der benötigten Personalmenge des Montagesystems.

In **Bild 26** sind die Ergebnisse unter Anwendung der Methode der Restzeitverteilung dargestellt. Die Restzeitwerte der Modelle in der ersten Stufe sind nicht nochmals dargestellt, da sie identisch zu denen der auslastungsbasierten Verteilung sind. In der Tabelle steht wieder die durchschnittliche Zahl der Aufträge mit Terminüberschreitungen.



**Bild 26:** Experimente aller Modelle zur Restzeitverteilung

Die Kennlinien der Modelle (mit Ausnahme des Modells 2b und 3a) sinken exponentiell. Vor allem zu Beginn der zweiten Stufe ist ein starker Abfall zu verzeichnen. Schwankungen ergeben sich bei den Modellen 2b und vor allem wieder bei dem Modell 3a. Bei fünf von sechs Modellen liegen mit dem dritten Durchlauf der zweiten Stufe keine Terminüberschreitungen mehr vor. Nur das Modell 3a zeigte Terminverzögerungen. Dort werden fünf Durchläufe benötigt. Nach dem dritten Durchlauf der zweiten Stufe ergibt sich eine durchschnittliche Restzeit von 21 Stunden. Dies entspricht einer Senkung gegenüber der ersten Stufe auf 22 Prozent.

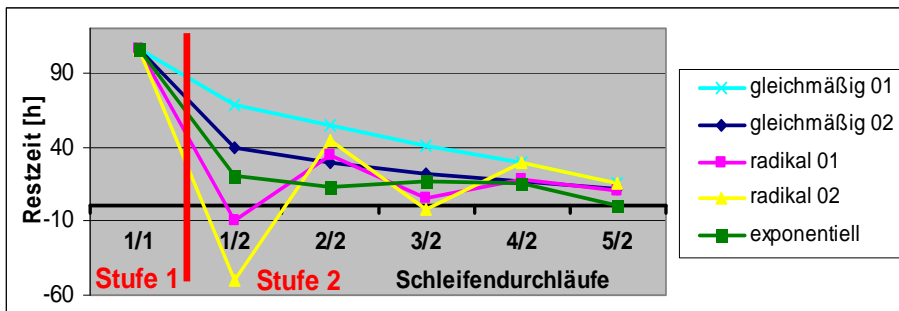
Um die Auswirkungen der verschiedenen Einstellmöglichkeiten der einzelnen Verteilungsmethoden aufzuzeigen, werden in **Bild 27** vier Kennlinien der Restzeitverteilung aufgeführt. Sie sind alle vom gleichen Modell. Die Einstellparameter beziehen sich auf:

- die Menge der Aufträge, die pro Schleife verändert werden sowie
- die Höhe der verteilten Restzeit (Reduzierung der Restzeit durch Sicherheitspuffer).

In mehreren Experimentreihen wurden verschiedene Ansätze der Restzeitverteilung getestet. Beispielhaft sind folgende Restzeitverteilungsarten dargestellt:

- eine gleichzeitige Senkung der Restzeit von einem Viertel der Aufträge mit einem Sicherheitspuffer von 10 Prozent (Modell gleichmäßig 01)
- eine gleichzeitige Verringerung der Restzeit von der Hälfte der Aufträge mit einem Sicherheitspuffer von 10 Prozent
- eine Senkung der Restzeit von einem Viertel der Aufträge ohne Sicherheitspuffer (Modell radikal 01)
- eine Verminderung der Restzeit bei der Hälfte der Aufträge ohne Sicherheitspuffer (Modell radikal 02)

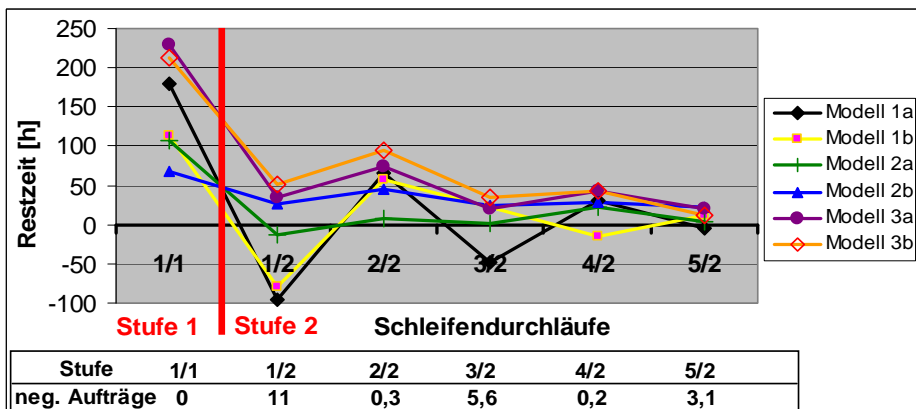
Daraufhin wurde eine optimale Einstellung gesucht, die mit der exponentiellen Kennlinie (Modell exponentiell) verdeutlicht wird. Diese Einstellung variieren allerdings bei jedem Modell. Beim vorliegenden müssen pro Durchlauf knapp ein Drittel der Aufträge verändert werden. Der Sicherheitspuffer beträgt dabei 4 Prozent.



**Bild 27:** Experimente zum Vergleich der Verteilungsalgorithmen

Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem der Sicherheitspuffer eine wichtige Stellgröße ist, um die Radikalität der Absenkung zu beeinflussen. Wird dieser zu klein gewählt, treten große Restzeitschwankungen auf. Über die Menge an modifizierten Aufträgen wird die Geschwindigkeit der Restzeitsenkung bestimmt. Das Problem bei einer zu radikalen Senkung der Restzeiten ist, dass negative Restzeiten entstehen und daraufhin starke Schwankungen, die eine Verteilungsprognose erschweren.

Abschließend sind in **Bild 28** die Kennlinien der auslastungsbasierten Restzeiterteilung für die Modelle dargestellt.



**Bild 28:** Experimente zur auslastungsbasierten Restzeitverteilung

Auffällig ist, dass nahezu alle Modelle starke Restzeitschwankungen aufweisen. Dies zeigt, dass eine parallele Berücksichtigung von Auslastungs- und Restzeitkennwerten schwerer zu beherrschen ist.

Diese Verteilungsmethode benötigt in der Regel vier Durchläufe in der zweiten Stufe, um bei der Terminverspätung sowie der Höhe der Restzeit für alle Modelle (mit Ausnahme vom Modell 1b) akzeptable Werte zu erzielen. Im zweiten Durchlauf werden zwar nur wenige Terminverspätungen erzeugt, die durchschnittliche Restzeit aber liegt noch bei 59 Stunden. Dagegen beträgt die Restzeit nach der vierten Schleife nur noch durchschnittlich 29 Stunden pro Auftrag. Dies entspricht einem Niveau von 15 Prozent gegenüber der ersten Stufe. Bemerkenswert sind dabei die Ergebnisse des Modells 3a, denn dort wird schon nach dem dritten Durchlauf eine Restzeit von 20 Stunden erreicht.

Als Ergebnis dieser umfangreichen Untersuchungen stellte sich für die Mehrzahl der Modelle die exponentielle Restzeitverteilungsmethode als die beste Möglichkeit dar, um schnell und zuverlässig die Mitarbeitermenge pro Vorgang zu senken. Eine Ausnahme bildet dabei das Modell 3a, wo nur mit der auslastungsbasierten Restzeitverteilung gute Ergebnisse erzeugt wurden. Zudem zeigt sich, dass die auslastungsbasierte Verteilung mit steigender Bauplatzauslastung weniger Möglichkeiten zur Restzeitverminderung (und damit weiterer Auslastungsverbesserung) findet. Somit ist diese Verteilungsmethode nicht zu empfehlen.

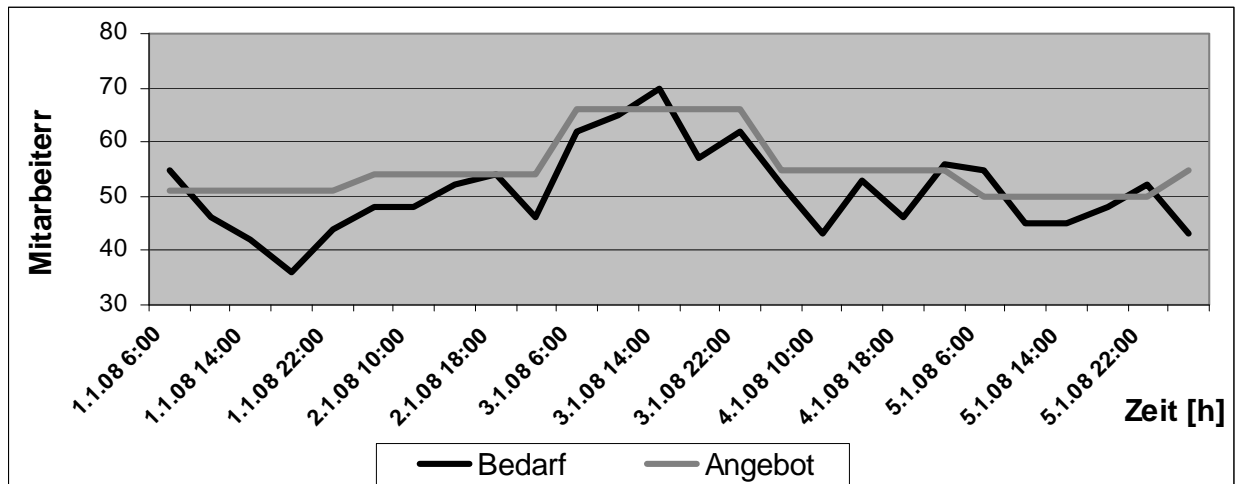
Aufgrund der Ergebnisse der verschiedenen Verteilungsalgorithmen kann zudem die Höhe des Abbruchkriteriums bestimmt werden. Sie variiert allerdings deutlich in Abhängigkeit von der Modellausprägung und der verwendeten Verteilungsmethode. In **Bild 29** ist diese Variation an zwei Modellen beispielhaft dargestellt. Die Prozentwerte beziehen sich auf die Senkung der Restzeit gegenüber der ersten Stufe. Die grau unterlegten Felder zeigen dabei den Durchlauf an, bei dem keine Terminüberschreitungen mehr vorliegen.

Verteilungs- algorithmen	1. Stufe			2. Stufe					
	Ø Restzeit	Ø Restzeit	Restzeitreduzier-	Ø Restzeit	Restzeitreduzier-	Ø Restzeit	Restzeitreduzier-	Ø Restzeit	Restzeitreduzier-
		1. Durchlauf	ung zur 1. Stufe	2. Durchlauf	ung zur 1. Stufe	3. Durchlauf	ung zur 1. Stufe	4. Durchlauf	ung zur 1. Stufe
auslastungsbasierte	180	50,0	27,8%	18,9	10,5%	36,7	20,4%	40,8	22,7%
Restzeit	180	28,0	15,6%	15,0	8,3%	22,0	12,2%	18,0	10,0%
ausl. Restzeit	180	-96,3	-53,5%	64,8	36,0%	-48,1	-26,7%	30,0	16,7%
auslastungsbasierte	113	68,7	60,8%	67,5	59,7%	32,7	28,9%	31,4	27,8%
Restzeit	113	24,9	22,0%	10,7	9,5%	4,2	3,7%	4,2	3,7%
ausl. Restzeit	113	25,5	22,6%	45,8	40,6%	23,9	21,2%	19,8	17,6%

**Bild 29:** Experiment zum Abbruchkriterium

Es zeigt sich, dass bei beiden Modellen mit der Restzeitverteilungsmethode die besten Ergebnisse erzeugt werden. Für diese Methode kann der Grenzwert für die Restzeitsenkung auf unter 91 Prozent gegenüber der Stufe eins gestellt werden. Bei der auslastungsbasierten Restzeitverteilung sollte ein Abbruch bei einem Grenzwert von 82 Prozent erfolgen. Bei der auslastungsbasierten Verteilung liegt er sogar schon bei 72 Prozent.

Bei der Betrachtung der Personalverteilung des gesamten Montagesystems nach der 2. Stufe resultiert folgendes Ergebnis (vgl. **Bild 30**).



**Bild 30:** Personalverteilung eines Modells nach Stufe 2

Aufgrund der Suche nach der minimalen Menge an benötigten Mitarbeiterressourcen schwankt der Gesamtbedarf noch sehr stark.

## 4 MODELLIERUNG DER FALLBEISPIELPROZESSE UND ERGEBNISSE DER SIMULATIONSUNTERSUCHUNGEN

Im Rahmen von Kapitel 4 sollen die Ergebnisse des Forschungsprojektes näher erläutert werden.

### 4.1 BEABSICHTIGTE UMSETZUNG DER ANGESTREBTEN FORSCHUNGSERGEBNISSE

Der Transfer der Forschungsergebnisse erfolgte unmittelbar über die Praxispartner und die Projektdokumentation. Zur Durchführung des Projektes wurde ein projektbegleitender Ausschuss mit zehn Unternehmen gebildet. Alle Mitglieder erfüllen dabei die zuvor spezifizierte Problemcharakteristik in ihren Montagesystemen. Er umfasst:

- Koenig & Bauer AG, Radebeul
- TRUMPF Sachsen GmbH, Neukirch
- Profiroll Technologies GmbH, Bad Dübau
- Ligmatech Automationssysteme GmbH, Lichtenberg
- Niles-Simmons Industrieanlagen GmbH, Chemnitz
- StarragHeckert GmbH, Chemnitz
- SIEMENS AG Power Generation, Görlitz
- WEMA-Glauchau GmbH, Glauchau
- tisoware Ges. f. Zeitwirtschaft mbH, Dresden
- simcron GmbH, Dresden
- Elbe Flugzeugwerke GmbH (EADS-EFW), Dresden

Den Unternehmen lag ein Entwurf dieses Forschungsantrages vor. Sie unterstützen die Zielstellung ganz ausdrücklich und möchten die angestrebten Forschungsergebnisse im eigenen Hause umsetzen. Damit übernehmen Sie für die Verbreitung der Forschungsergebnisse eine wichtige Rolle.

Bei ausgewählten Unternehmen wurde zunächst für repräsentative Produkttypenreihen eine Prozessanalyse durchgeführt. Auf dieser Basis entstanden die Fallbeispiele, anhand derer die neue Methodik zur Montagesteuerung entwickelt, getestet und bewertet wurde. Die Entwicklung erfolgte also anhand realer Praxisbeispiele, die Bewertung auf Grundlage exakt definierter, messbarer Zielkriterien.



Strukturkriterien		Merkmalsausprägungen bei Auftragsfertigung				
1	Auftragsauslöseart	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen	Produktion auf Bestellung mit Rahmenaufträgen	Kundenanonyme Vor-/ kundenauftragsbezogene Endproduktion	Produktion auf Lager	
2	Erzeugnisspektrum	Erzeugnisse nach Kundenspezifikationen	Typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten	
3	Erzeugnisstruktur	Mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur		Mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur	Geringteilige Erzeugnisse	
4	Ermittlung des Erzeugnis-/ Komponentenbedarfs	Bedarfsorientiert auf Ergebnisebene	Teilw. erwartungsteilw. bedarfsorientiert auf Komp.ebene	Erwartungsorientiert auf Komp.ebene	Erwartungsorientiert auf Erzeugnisebene	Verbrauchsorientiert auf Erzeugnisebene
5	Auslösung des Sekundärbedarfs	Auftragsorientiert		Teilw. auftragsorientiert/ teilw. periodenorientiert	Periodenorientiert	
6	Beschaffungsart	Weitgehender Fremdbezug		Fremdbezug in größerem Umfang	Fremdbezug unbedeutend	
7	Bevorratung	Keine Bevorratung von Bedarfspositionen	Bevorratung von Bedarfspositionen auf unteren Strukturebenen	Bevorratung von Bedarfspositionen auf oberen Strukturebenen	Bevorratung von Erzeugnissen	
8	Produktionsart	Einmalproduktion	Einzel- und Kleinserienproduktion	Serienproduktion	Massenproduktion	
9	Ablaufart in der Fertigung	Werkstattfertigung	Inselfertigung	Reihenfertigung	Fließfertigung	
10	Ablaufart in der Montage	Standplatzmontage	Gruppenmontage	Reihenmontage	Fließmontage	
11	Produktionsstruktur	Produktion mit großer Tiefe		Produktion mit mittlerer Tiefe	Produktion mit geringer Tiefe	
12	Kundenänderungseinfluss während der Fertigung	Änderungseinflüsse in größerem Umfang		Änderungseinflüsse gelegentlich	Änderungseinflüsse unbedeutend	
13	Abstimmung des Materialflusses	Kontinuierliche Produktion			Diskontinuierliche Produktion	
14	Anzahl der Endprodukte	Einproduktproduktion			Mehrproduktproduktion	
15	Anzahl der Fertigungsstufen	Einstufige Produktion			Mehrstufige Produktion	

**Bild 32:** Typologie und Merkmalsausprägungen eines Fallbeispiels (in Anlehnung an: Eversheim und Dobberstein, 1996)

Zuzuordnen ist dieses Produktionssystem der Auftragsproduktion. Jeder Auftrag wird entsprechend der gewünschten Kundenspezifikation angefertigt und montiert. Das Produktionssystem ist daher als Einzelfertigung bzw. Einmalproduktion zu bezeichnen. Der Kundenänderungseinfluss ist dementsprechend hoch. Die Montage erfolgt als ungetaktete Standplatzmontage, d.h. ortsunveränderlich auf einer fest definierten Fläche. Als ungetaktet wird in diesem Zusammenhang die Montage ohne einheitlichen Produktionstakt, d.h. ohne einen vorgegebenen, zeitlich identischen Rhythmus pro zu verrichtendem Arbeitsgang, bezeichnet (vgl. Loedding, 2008). Die Materialbeschaffung und -bereitstellung erfolgt auftragsorientiert und diskontinuierlich, wobei ein erheblicher Anteil fremdbezogen wird. Die Eigenfertigung beruht weitestgehend auf dem Prinzip der Werkstattfertigung und ist in den angrenzenden Fabrikhallen angesiedelt. Eine Bevorratung erfolgt lediglich für Kleinteile und auftragsunspe-

zifische Verbrauchsgüter. Die Erzeugnisstruktur ist mehrteilig und komplex und bedarf mehrerer Stufen bis zur Endmontage.

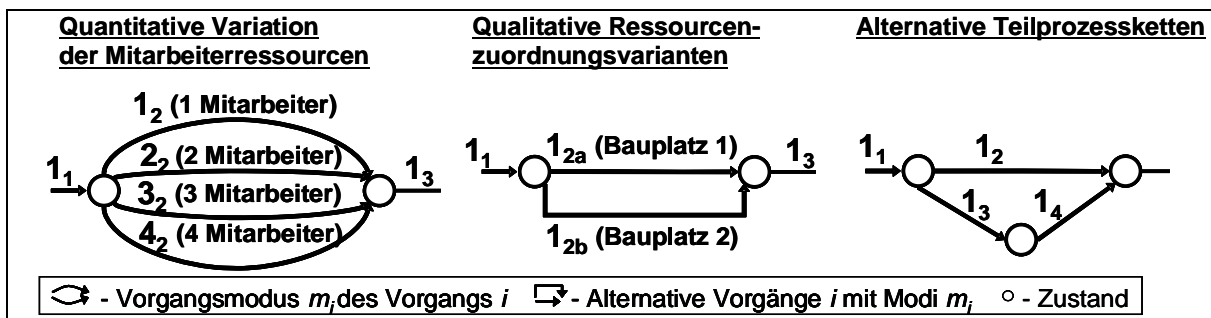
### 4.3 BESCHREIBUNG VON MONTAGE-PROZESSMODELLEN

Ein geeignetes Mittel zur Darstellung von Prozessen und Abläufen stellt die Netzplantechnik dar. Sie umfasst laut DIN 69900 (1987) „auf Ablaufstrukturen basierende Verfahren zur Analyse, Beschreibung, Planung, Steuerung und Überwachung von Abläufen, wobei Zeit, Kosten, Ressourcen und weitere Größen berücksichtigt werden können.“ Sie dient der Planung und Kontrolle komplexer Problemstellungen und bietet durch die Abbildung in Form von Graphen die Möglichkeit, alle notwendigen Informationen in Bezug auf Zeit-, Ablauf-, Kapazitäts- und Technologierestriktionen in übersichtlicher Weise zu veranschaulichen. Netzpläne bestehen aus Vorgängen und Ereignissen sowie aus Reihenfolgebedingungen, die sich aus technologischen oder wirtschaftlichen Beschränkungen ergeben. Bezüglich der Darstellungsart lassen sich zwei Arten von Netzplänen unterscheiden, die Vorgangspfeil- und die Vorgangsknotennetze.

In Vorgangsknotennetzplänen (VKN) werden die Vorgänge durch Knoten und die Anordnungsbeziehung zwischen den Knoten durch Pfeile symbolisiert. Hingegen repräsentieren die Pfeile in Vorgangspfeilnetzplänen (VPN) die Vorgänge, die die Knoten miteinander verknüpfen. Die Knotenpunkte stellen Ereignisse (Zustände) dar.

Das für die simulationsbasierte Heuristik erforderliche Modell basiert auf VPN und bildet die gesamte Produktstruktur sowie den zeitlichen und technologischen Montageprozess mit allen Alternativen ab (vgl. Schwarze, 2001). Jeder Produktionsauftrag wird als eigenständiges Projekt mit spezifischen Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten sowie einem spezifischen Netzplan definiert.

Die universelle Notation im VPN ermöglicht die Modellierung beliebiger Montagemodelle bei theoretisch unbegrenzter Variation der Prozessparameter, wie z.B. Ressourcenzuordnungsalternativen. Aufgrund der Vielfältigkeit der Abbildungsmöglichkeiten wird nachfolgend auf die Unterscheidung alternativer Prozessabläufe in der Netzplannotation näher eingegangen (vgl. **Bild 33**).



**Bild 33:** Unterscheidung alternativer Prozessabläufe in der Netzplannotation

Es werden drei Arten von Vorgangsalternativen unterschieden:

- 1 Quantitative Variation der Mitarbeiterressourcen,
- 2 qualitative Ressourcenzuordnungsvarianten und
- 3 alternative Teilprozessketten.

Die Modellierung (Visualisierung) alternativer Mitarbeitermengen-zuordnungen erfolgt mittels paralleler Vorgänge - so genannter *Vorgangsmodi* (vgl. Salewski et al., 1997). Diese stehen disjunkt zueinander, d.h. es darf jeweils nur eine Alternative gewählt werden. Jeder Modus besitzt eine diskrete Vorgangsdauer in Abhängigkeit von der zugeordneten Personalressour-

cenmenge. Zur eindeutigen Identifizierung werden die Vorgangsmodi nach dem Kriterium Dauer numerisch aufsteigend geordnet.

Alternative Zuordnungen technischer Ressourcen wie Montageplätze, Transport-, Puffer- oder Hilfsmittel sowie qualitative Mitarbeiteralternativen (Qualifikationsarten) werden ebenfalls mittels alternativer Vorgänge visualisiert. Letztere können dann wiederum *Modi* aufweisen. Zur Systematisierung und Identifizierung derartiger Alternativen werden die Vorgangsnummern um spezielle Buchstaben ergänzt, so dass jede Alternative eine eigene schnell identifizierbare Vorgangskennzeichnung besitzt (vgl. Hartmann, 1999). Die Darstellung alternativer Teilprozessketten erfolgt durch Nutzung unterschiedlicher Vorgangspfade (Wegalternativen).

Neben der Netzplannotation existiert zudem ein umfangreiches, an den praktischen Problemen orientiertes System von Restriktionen. Es besteht aus:

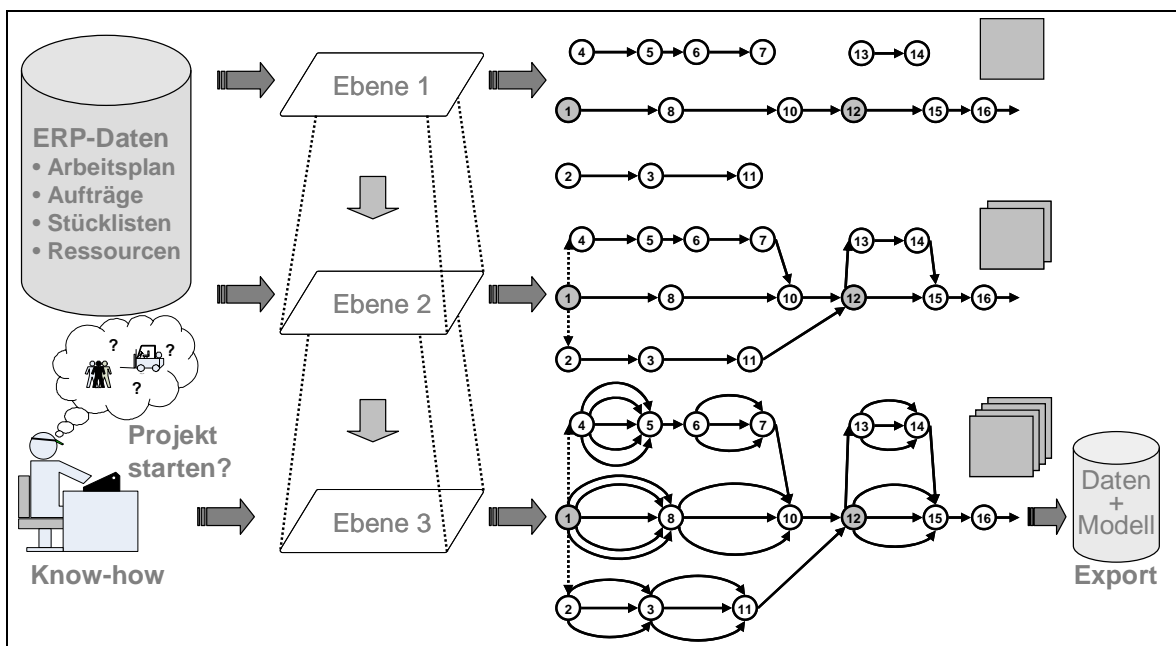
- einem Zeitrestriktionssystem für alle Arten von Terminschränken und Ressourcenverfügbarkeits-Kalendern,
- einem Kapazitätsrestriktionssystem für Ressourcenlimitierungen sowie
- einem Regelsystem, um spezielle Prozessbedingungen, wie Maximalabstände von Vorgängen, Pufferbelegungen und Prioritäten, aufzunehmen.

Schwerpunkt stellt hier insbesondere die Abbildung verschiedener Personalstrukturen (Arbeitsgruppen und Qualifikationen) sowie Arbeitszeitmodelle dar, da gerade in der Einzel- und Kleinserienfertigung hochflexible Gruppenarbeitsmodelle mit unternehmensspezifischer Ausprägung vorzufinden sind.

### Methodik der Prozessmodellierung

Für alle im Rahmen des Forschungsprojektes analysierten Fallbeispiele wurde ein Netzplanmodell entsprechend diesen Ausführungen erstellt. Dazu war es erforderlich, die realen Abläufe zu analysieren und in ihren Abfolgen und Variationsmöglichkeiten aufzunehmen. Dabei konnte festgestellt werden, dass keines der untersuchten Fallbeispielunternehmen über ein adäquates Montagemodell bzw. die dazu erforderliche Datenbasis verfügt. Die in der Praxis vorgefundenen Montagemodelle bilden den Prozessablauf meist nur als Folge sequentieller Arbeitsplanschritte (Arbeitsgänge) auf Basis deterministischer Daten ab. Die komplexen Zusammenhänge und das dynamische Systemverhalten, d.h. tatsächlich vorhandene zahlreiche Alternativen und variierende Ablaufbeziehungen – ein wesentlicher Optimierungsstellhebel – werden nicht erkannt bzw. nicht in geeigneten Modellen abgebildet. Die tägliche Dynamik erfordert darüber hinaus die ständige Aktualisierung des Datenraumes. Demzufolge waren zur Erstellung der Netzpläne grundlegende Untersuchungen und eine Aufnahme sämtlicher Prozesse notwendig.

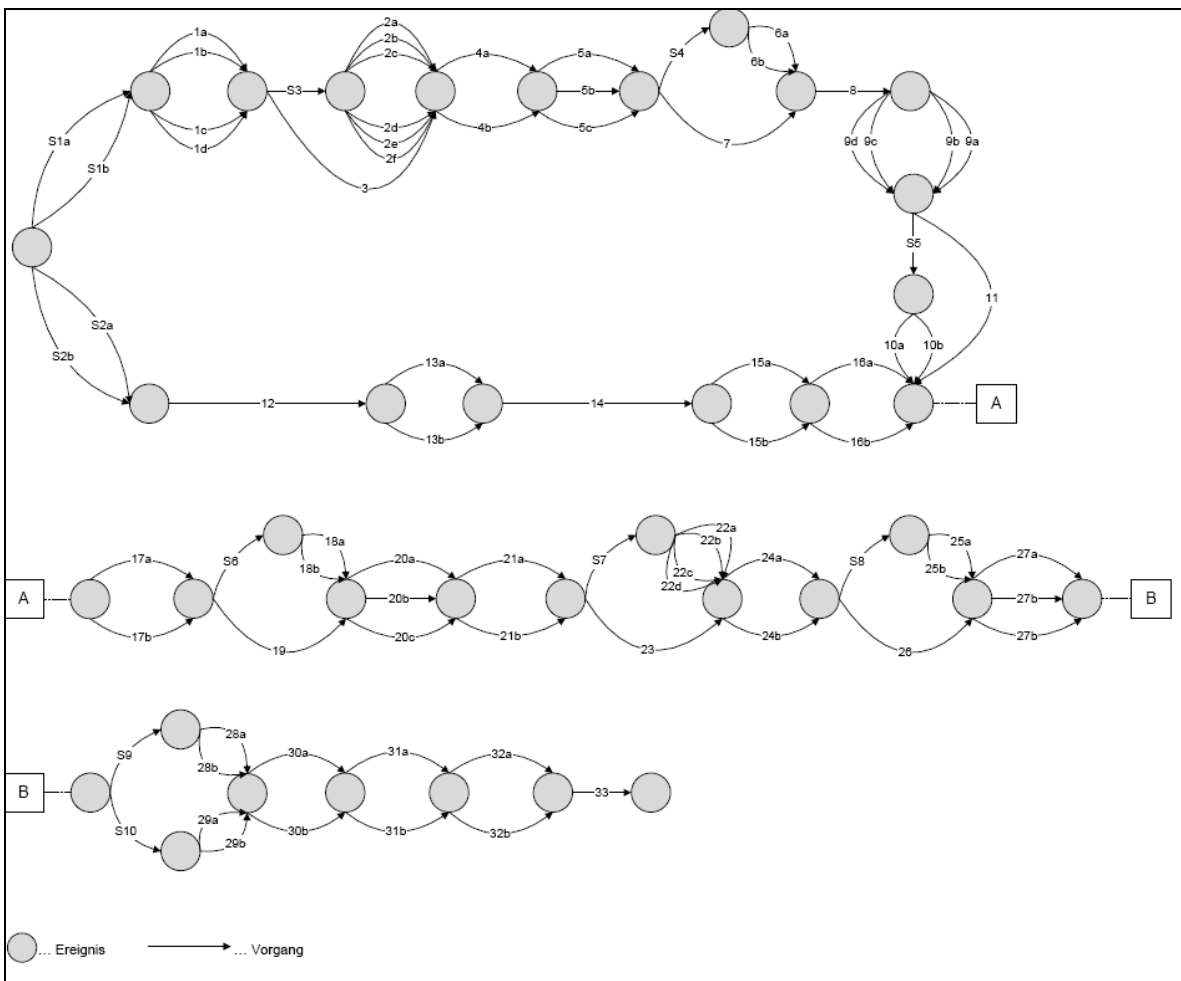
Es empfiehlt sich eine Top-Down-Vorgehensweise um das Prozess- und Datenmodell schrittweise zu editieren und zu detaillieren (vgl. **Bild 34**).



**Bild 34:** Vorgehensweise der Prozessmodellierung

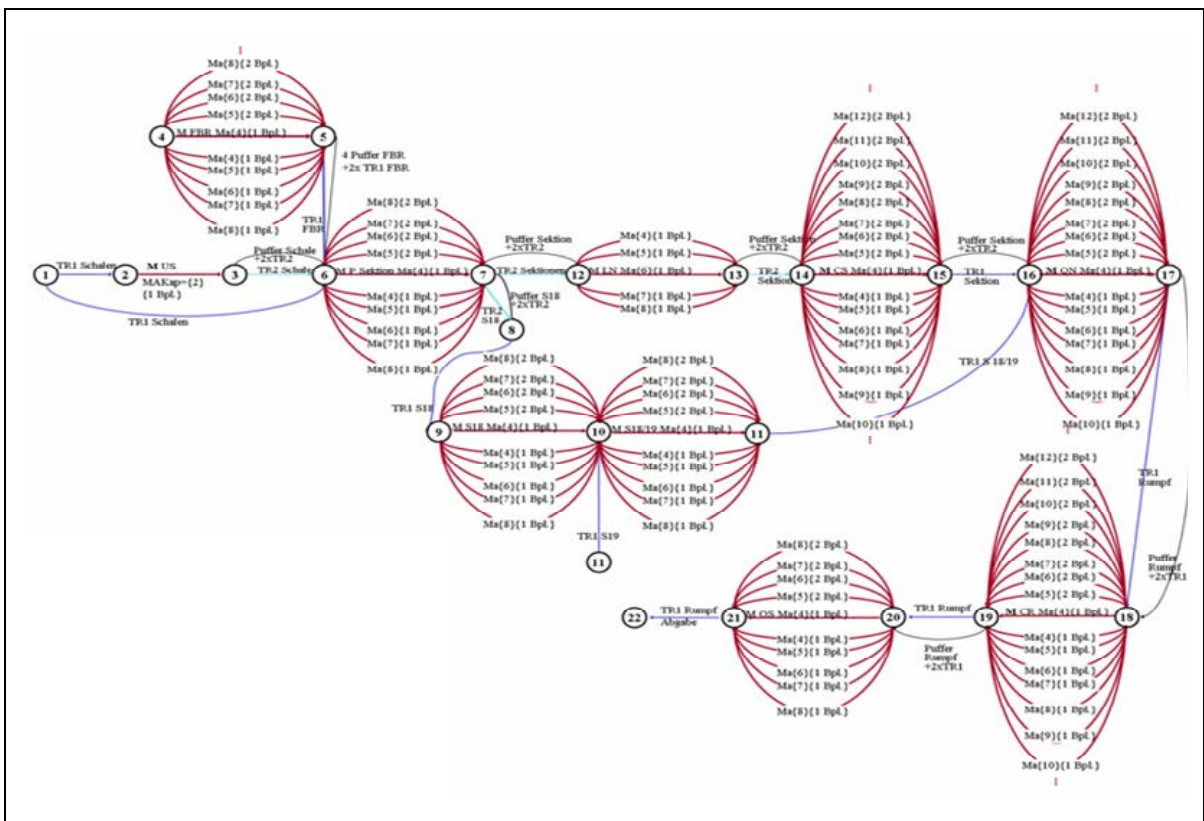
Ausgangspunkt ist die Erstellung eines groben Netzplanes auf Basis vorhandener Planungsdaten (Ebene 1). Darauf aufbauend sollten alle technologischen Ablaufbeziehungsvarianten und -alternativen der einzelnen Vorgänge erfasst werden. Den letzten Schritt bildet die Erfassung sowohl der qualitativen als auch quantitativen Ressourcenzuordnungs-Varianten.

Zur Untersuchung der Fallbeispiele wurden die Prozessmodelle, über eine definierte Datenschnittstelle bzw. -tabelle erfasst und aufbereitet. Darin enthalten sind alle für die Durchführung der Simulationen erforderlichen Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten. **Bild 35** zeigt einen vollständigen, alternativen Prozessgraphen für die Endmontage eines Fallbeispiels.



**Bild 35:** Prozessgraph eines Fallbeispiels

**Bild 36** zeigt einen Beispielnetzplan einer Großbaugruppe. Insbesondere durch die Variation der Mitarbeiterressourcen pro Arbeitsschritt, dargestellt durch rote Vorgangspfeile (bis zu 16 spezifische Mitarbeiterzuordnungsvarianten je Vorgang), resultieren etwa  $10^{10}$  Montagevarianten, also theoretisch mögliche Wege durch den Prozessgraphen. Typischerweise werden 5 bis 6 solcher Baugruppen gleichzeitig montiert. In Summe ergeben sich demnach  $10^{60}$  mögliche Planungsvarianten für das Gesamtsystem.

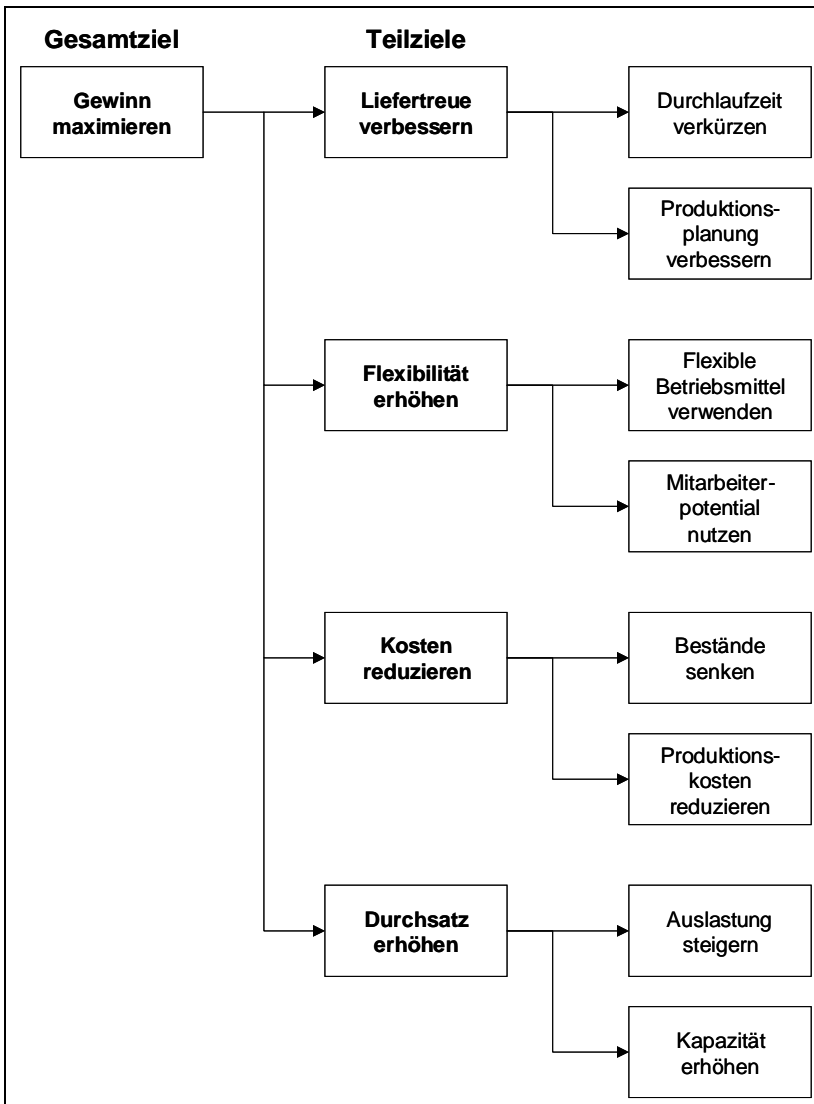


**Bild 36:** Beispielnetzplan einer Großbaugruppe

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass Netzpläne ein hilfreiches Mittel zur verständlichen Veranschaulichung und zur eindeutigen Festlegung des gesamten Montageprozesses bezüglich seiner gegenseitigen Abhängigkeiten und logischen Abfolge darstellen. Der Verlauf sollte in dem Maß detailliert werden, wie es die Planungsgenauigkeit erfordert. Durch diese feine Unterteilung wird eine effiziente Zeitschätzung und Terminfestlegung für Einzelvorgänge und den Gesamtdurchlauf ermöglicht.

#### 4.4 OPTIMIERUNGSZIELE UND RESTRIKTIONEN DER FALLBEISPIELE

Ein weiteres wesentliches Modellierungsproblem besteht in der Abbildung der operativen Planungs- und Steuerungsziele. Resultierend aus der übergeordneten Unternehmenszielsetzung, der Maximierung des Gewinns, bestehen mehrere Unterziele, die teilweise konkurrierend zueinander stehen (vgl. **Bild 37**).



**Bild 37:** Optimierungsziele der Planung und Steuerung komplexer Montageprozesse

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden in den Fallbeispielunternehmen die spezifischen Zielkennzahlen, Zielfunktionen sowie Restriktionen für die Optimierungsheuristik unter Beachtung betriebswirtschaftlicher Aspekte untersucht und spezifiziert. Neben den dargestellten, übergeordneten Zielen ergaben sich in Abhängigkeit von der Unternehmenssituation und unter Berücksichtigung jeweiliger Problemschwerpunkte unternehmensspezifische individuelle Ausprägungen und Kombinationen der zuvor genannten Bewertungskriterien.

Beispiele unternehmensspezifischer Optimierungszielstellungen sind:

- Aufzeigen des Einsparungspotentiales durch Prozessparallelisierungen,
- Identifizierung von Engpassressourcen,
- Einhaltung der Taktzeiten,
- Maximalausbringung mit verfügbaren Ressourcen,
- Optimierung der in- und externen Materialbereitstellung sowie
- Verbesserung der Flächenbelegung und Auftragseinplanung.

Die Implementierung realer Montageprozesse in ein Optimierungsmodell erfordert die Berücksichtigung aller relevanten Einflussfaktoren. Sämtliche Faktoren, die den Lösungsraum

eingrenzen, wurden in Form von Restriktionen aufgenommen. Prozessbestimmende Nebenbedingungen der Fallbeispiele sind:

- Kapazitäts-,
- Reihenfolge- und
- Terminrestriktionen.

#### 4.5 SIMULATIONSERGEBNISSE – POTENTIALE UND EFFEKTE

Das folgende Kapitel dient der Vorstellung der erzielten Simulationsergebnisse des Forschungsprojektes.

##### Validierung der Fallbeispielprozesse

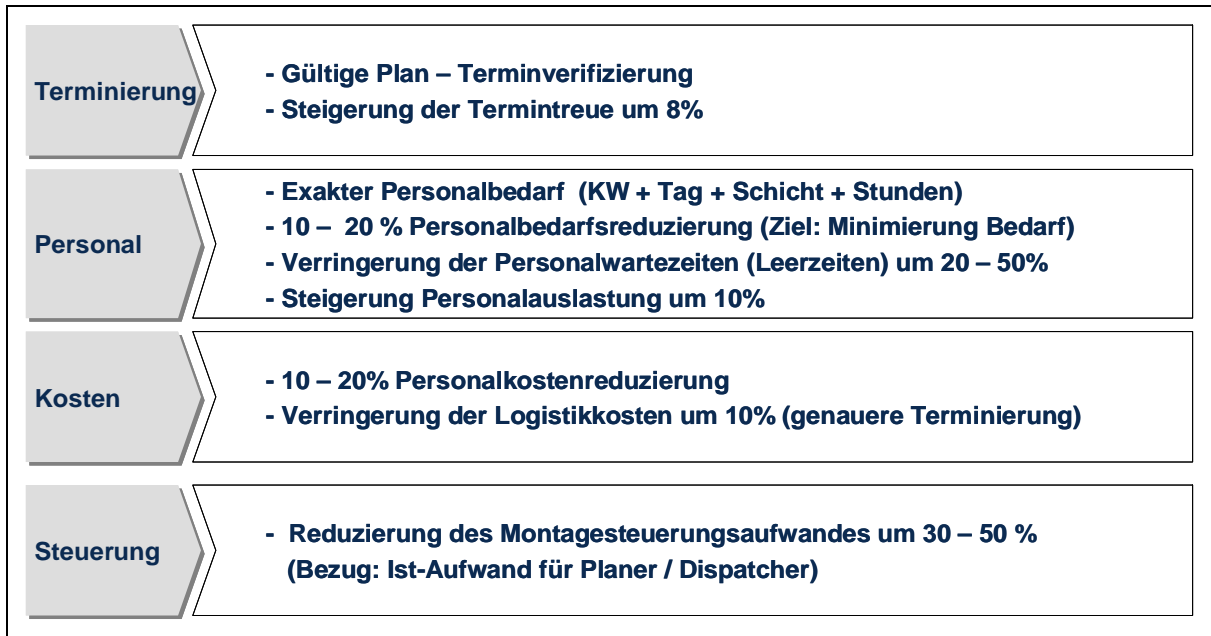
Für alle Fallbeispiele war es zunächst erforderlich eine Überprüfung der Prozessmodelle auf Übereinstimmung zum realen Montageprozess durchzuführen. Die Validierung erfolgte dabei anhand der Kriterien:

- Einhaltung der Durchlaufzeit,
- Bestätigung des prognostizierten kritischen Weges und Einhaltung vorgegebener Rahmentermine sowie
- Plausibilitätskontrolle der Abhängigkeitsbeziehungen im Netzplan.

Alle Simulationsversuche der erstellten Prozessmodelle bestätigten die realen Montageprozesse.

##### Potentiale und Effekte

**Bild 38** gibt eine Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und die resultierenden Verbesserungspotentiale im Vergleich zu realen Ist-Planungsdaten der Fallbeispiele wieder.



**Bild 38:** Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Das System wurde als Softwaretool erstellt und anhand der Industriefallbeispiele erprobt. Die Untersuchungsergebnisse weisen, im Vergleich mit den realen Ist-Planungsdaten, Produktivitätssteigerungen von bis zu 20% aus. Diese resultieren insbesondere aus dem verringerten Personaleinsatz zur Bewältigung der Montagearbeiten (10 bis 20%). Ferner wird der Grad der Liefertermineinhaltung um bis zu 8% verbessert, da der Produktionsplan auf Basis tatsächlich vorhandener Kapazitäten bereits vor Produktionseinlastung verifiziert werden

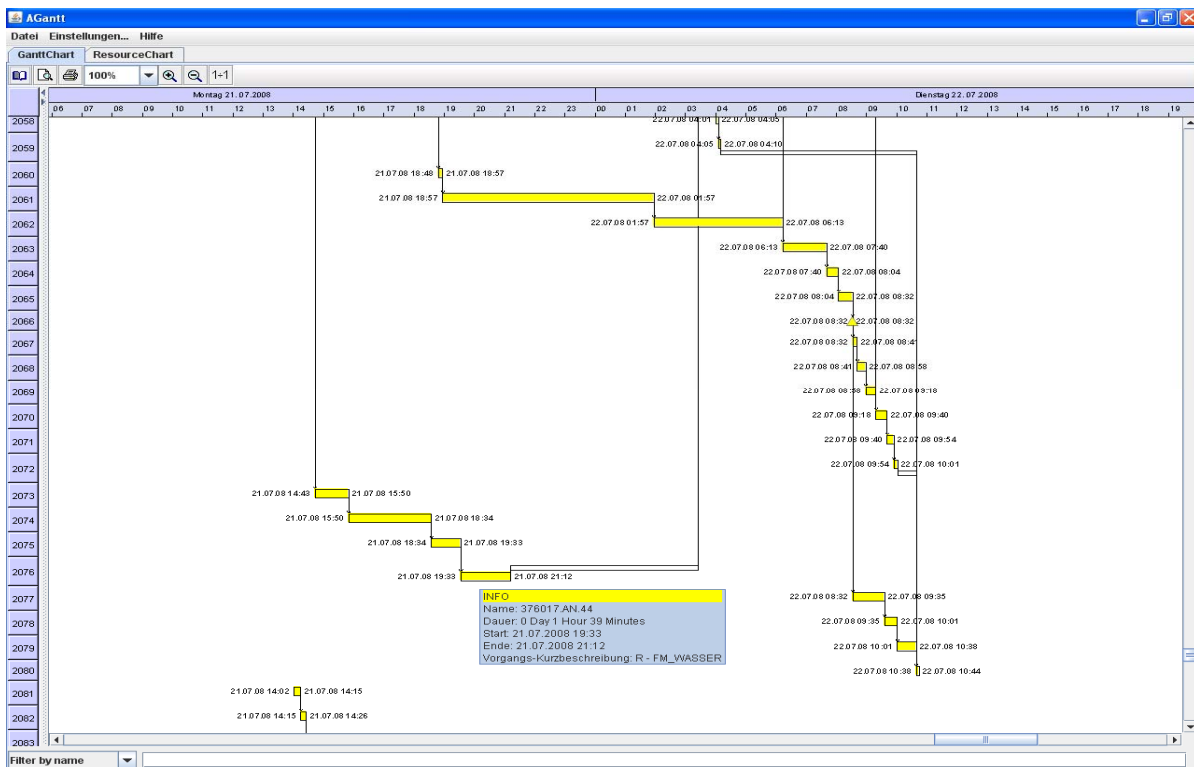
kann. In Bezug auf den Ist-Aufwand für Planer und Dispatcher wird von einer Reduzierung von 30 bis 50% ausgegangen.

Ein weiteres Potential besteht in der Senkung der Durchlaufzeiten, was damit gleichzeitig auch zu einer Verringerung der Materialbestände führt. Die zeitdiskrete Simulation und Visualisierung des Montagefortschritts schafft letztendlich auch die Voraussetzungen für die weitere Optimierung der Montagelogistik, d.h. „Just-in-time“- und „Just-in-sequence“-Bereitstellungskonzepte für Großbauteile und -baugruppen lassen sich tatsächlich effektiv realisieren.

Ergebnisvisualisierung

Dem Anwender der simulationsbasierten Heuristik stehen verschiedene Ergebnisvisualisierungen zur Verfügung. Ein Gantt-Diagramm „Termine“ stellt alle Aufträge eines betrachteten Planungszeitraumes dar und enthält hinsichtlich der einzelnen Montagevorgänge Informationen zu (vgl. **Bild 39**):

- Start- und Endterminen,
- Dauern und
- technologischen und zeitlichen Abhängigkeitsbeziehungen.



**Bild 39:** Ergebnisvisualisierung mittels Gantt-Diagramm „Termine“

Darüber hinaus erhält der Anwender in einem Gantt-Diagramm „Ressourcen“ detaillierte Informationen über den Ressourceneinsatz des optimalen Produktionsplanes (vgl. **Bild 40**). Für jede Ressourcengruppe ermöglicht diese Art der Ergebnisvisualisierung exakte Aussagen zum tatsächlichen Bedarf (z.B. benötigte Anzahl an Mitarbeitern der Qualifikation A). Anhand eines Belastungsdiagrammes wird die Abweichung zwischen Ressourcenbedarf und -angebot dargestellt. Der Bereich unterhalb der roten Linie kennzeichnet die Verfügbarkeit der einzelnen Ressourcen. Für grüne Flächen gilt demnach, dass der Bedarf durch die verfügbaren Ressourcen gedeckt werden kann. Demgegenüber visualisieren rote Bereiche Ressourcenunterdeckungen.



Bild 40: Ergebnisvisualisierung mittels Gantt-Diagramm „Ressourcen“

#### 4.6 ABSCHLIEßENDE BEWERTUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES

Bild 41 zeigt den Erfüllungsgrad der simulationsbasierten Heuristik hinsichtlich der in Kapitel 2.4 erläuterten Anforderungen an moderne PPS-Konzepte. Um komplexe Montageprozesse möglichst effizient gestalten und die Flexibilität der Abläufe optimal nutzen zu können, gilt es vorhandene Potentiale auszuschöpfen und gegebenenfalls zu erhöhen. Voraussetzungen hierfür sind einerseits die Entkopplung von Material- und Informationsflüssen und andererseits die Vervollständigung der Prozessmodelle. Durch Bereitstellung von Montagenetzplänen, die sämtliche Ablaufalternativen abbilden, und dem Einbeziehen der in- und externen Materialbereitstellung bietet der vorgestellte Lösungsansatz die Chance zur zielgerichteten Nutzung dieser Freiheitsgrade. Diese resultieren insbesondere aus Möglichkeiten zur Parallelbearbeitung und einer flexiblen Zuordnung notwendiger Ressourcen.

Die geplanten Arbeitspakete des Forschungsprojektes (vgl. Kap. 1.5) konnten erfüllt werden, waren aber mit einem Mehraufwand im Vergleich zu dem geplanten zeitlichen Ablauf und Mitarbeiterereinsatz verbunden. Zur Lösung des Problems erfolgte ein kostenneutraler Einsatz von Studenten im Rahmen von zwei Diplomarbeiten und einer großen Belegarbeit bei Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses. Die durchgeführte Erprobung und Leistungsbewertung des Lösungskonzeptes anhand der Fallbeispiele zeigte jedoch eindrucksvoll, dass die im Forschungsantrag prognostizierten Potentiale und Effekte bei Anwendung der entwickelten Methode (bzw. des Simulators) tatsächlich resultieren.

Anforderungen	Erfüllungsgrad
▶ Gestaltungs- und Änderungsflexibilität	●
▶ Reaktionsvermögen auf Störungen	◐
▶ Zeitadäquate Verteilung begrenzter Ressourcen	●
▶ Planungssicherheit	◐
▶ Komplexitätsgerechte Gestaltung (dynamisch)	◐
▶ Steigerung der Termintreue	●
▶ Abbildung variabler Personalstrukturen	●
▶ Anwendbarkeit auf beliebige Montagestrukturen	●
▶ Berücksichtigung aller Wirkungsbeziehungen	●
▶ Beachtung Restriktionen/ Nutzung der Potentiale	◐
▶ Ausgleich von Arbeitsmengenschwankungen	●
▶ Anwendungsgerechte einfache Handhabung	◐
▶ Kurze Berechnungsdauer	●
▶ Vermeidung von Ressourcenverschwendung	◐
▶ Verringerung der Komplexität	◐
▶ Lösungsgüte	◐

Erfüllungsgrad: ○ sehr gering   ◑ gering   ◒ mittel   ◓ hoch   ● sehr hoch

**Bild 41:** Erfüllungsgrad der Anforderungen

Abschließend ist festzustellen, dass die angestrebten Ergebnisse und Ziele des Forschungsvorhabens erreicht wurden.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND RESULTIERENDER FORSCHUNGSBEDARF

### Zusammenfassung

Die ständig wiederkehrende Aufgabe für die Unternehmen, sich im Wettbewerb gegen die Konkurrenz zu behaupten und den individuellen Kundenwünschen gerecht werden zu müssen, wächst zunehmend. Die Forderungen nach einem großen Variantenreichtum und hoher Flexibilität führen zu einer immensen Steigerung der Komplexität der Montageabläufe. In Anbetracht der derzeit unsicheren Weltwirtschaftslage und der Schwierigkeit, Prognosen zur Marktentwicklung, den Absatzraten und den Anforderungen abzugeben, denen sich die Unternehmen zukünftig stellen müssen, sind eine hohe innerbetriebliche Flexibilität sowie eine schnelle Reaktionsfähigkeit auf sich dynamisch verändernde Bedingungen ausschlaggebende Wettbewerbsfaktoren. Um diesen Herausforderungen erfolgreich begegnen zu können, ist eine leistungsfähige Produktionsplanung und -steuerung unerlässlich.

Im Rahmen des AiF-Forschungsprojektes 15522: „Heuristik zur Steuerung komplexer Montagesysteme mit flexibler Ressourcenzuteilung und -leistung und begrenzter Ressourcenkapazität“ (Kurztitel: MontageSteuerung) wurde ein simulationsbasierter Lösungsansatz entwickelt. Auf Basis realer Planungsdaten bestehender Montagesysteme (Fallbeispielprozesse) erfolgte die Untersuchung und Bewertung diverser Planungsszenarien anhand logistischer Kenngrößen wie der Durchlaufzeit, der Auslastung von Ressourcen sowie der Ausbringungsmenge.

Durch die Berücksichtigung der dynamischen Zusammenhänge sowie sämtlicher Ressourcen- und Prozessalternativen können Ergebnisse erzielt werden, die durch bestehende Lösungsansätze aufgrund ihrer statischen Betrachtungsweise oder einer zu hohen Berechnungsdauer nur eingeschränkt möglich sind. Anhand konkreter Fallbeispiele konnte gezeigt werden, dass die simulationsbasierte Heuristik zu plausiblen Ergebnissen führt und ein effizientes Hilfsmittel für die Anwendung in der Planung und Steuerung komplexer Montageprozesse darstellt.

Die Neuartigkeit des Ansatzes besteht in einer allgemeinen Modellierungsmethodik für beliebige Montagesysteme auf der Basis von Netzplänen in Verbindung mit einem speziellen heuristischen Algorithmus. In mehreren Iterationsschleifen wird das automatisch generierte Simulationsmodell schrittweise editiert. Es erfolgt die Ermittlung einer Planvariante, die alle definierten Zielfunktionen und Nebenbedingungen maximal erfüllt. Im Ergebnis resultieren daraus Produktivitätssteigerungen von bis zu 20%, kürzere Durchlaufzeiten, eine verbesserte Liefertermintreue, eine „Glättung“ der Ressourcenauslastung sowie eine bessere operative Störungsbeherrschung. Durch die erhöhte Transparenz und die verbesserte Verständlichkeit der Wirkbeziehungen gelingt es ferner, mögliche Engpässe zu vermeiden und zielgerichtete Entscheidungen auf Basis verbesserter Informationsgrundlage zu treffen.

### Forschungsbedarf

Insbesondere in den Themenschwerpunkten Prozessmodellierung sowie Datenerhebung und -systematisierung konnte ein erheblicher zusätzlicher Forschungsbedarf festgestellt werden, um alle notwendigen Voraussetzungen für eine praxisrelevante Nutzung des Lösungskonzeptes zu schaffen. Die Anwendung der entwickelten simulationsbasierten Heuristik erfordert die exakte, vollständige und problemspezifische Abbildung des realen Systems in einem adäquaten Prozessmodell unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen. Dabei wurde deutlich, dass sowohl die Spezifizierung und Systematisierung der das Montagemodell beschreibenden sehr großen Parametermenge als auch die Ermittlung der konkreten strategischen und operativen Steuerungszielparameter und -regeln Expertenwissen erfordern und

enorm aufwändig sind. Ferner sind notwendige Daten zur Anwendung eines simulationsbasierten Lösungskonzeptes nur eingeschränkt in den unternehmensspezifischen PPS-Systemen vorhanden und müssen somit zuvor unter hohem Zeitaufwand manuell erfasst werden. Die in der Praxis vorgefundenen Montagemodelle bilden den Prozessablauf meist nur als Folge sequentieller Arbeitsplanschritte (Arbeitsgänge) auf Basis deterministischer Daten ab. Die komplexen Zusammenhänge und das dynamische Systemverhalten, d.h. tatsächlich vorhandene zahlreiche Alternativen und variierende Ablaufbeziehungen – ein wesentlicher Optimierungsstellhebel – werden nur unzureichend erkannt bzw. nicht in geeigneten Modellen abgebildet. Die tägliche Dynamik erfordert darüber hinaus die ständige Aktualisierung des Datenraumes.

Die Erstellung der Prozessmodelle bzw. -graphen für die Fallbeispiele erforderte durchschnittlich 4 Monate bei einer anschließenden Rechenzeit für die Optimierung von wenigen Minuten. Bisher steht vor allem kleinen und mittleren Unternehmen kein ausreichend praxisrelevantes, den produkt-, prozess- und auftragsspezifischen Anforderungen gerecht werdendes Assistenzsystem zur graphenbasierten Modellierung ihrer komplexen Montagesysteme zur Verfügung.

Notwendig ist ein Lösungskonzept, das in geeigneter Form die Verschiedenartigkeit der Montagesysteme, die unternehmensspezifischen Zielsetzungen und Restriktionen und etablierte Steuerungsalgorithmen und -regeln gleichermaßen berücksichtigt. Mittels adäquater Referenzmodelle und praxisingerechter Dateneditoren zur Erhebung und Systematisierung aller notwendigen Daten wird die zur effizienten Anwendung der simulationsbasierten Heuristik erforderliche Detailtreue (Datengranularität) mit minimalem Aufwand sichergestellt.

Diesbezüglich ergeben sich nachfolgende Forschungsziele:

- 1 Definition von Referenzmodellen, um die Vielfalt der Montagesysteme zu erfassen und gleichzeitig den Bearbeitungsaufwand zu begrenzen. Hierfür ist eine Analyse und Systematisierung der Wirkungszusammenhänge zwischen:
  - o den prozessbeschreibenden Merkmalen,
  - o den unternehmensspezifischen Zielfunktionen und Restriktionen,
  - o der Prozessmodellierung und
  - o geeigneter Steuerungsregeln bzw. -algorithmen notwendig.
- 2 Entwicklung und Definition einer zweistufigen Datenstruktur mit a) statischen (Stamm-) Daten und b) häufig variierenden (Bewegungs-) Daten.
- 3 Identifikation und Integration von einfachen Stellhebeln für häufig zu ändernde Daten.
- 4 Entwicklung praxisrelevanter Datenmodelle und -editoren für alternative, variantenreiche Montageprozesse.
- 5 Schaffung einer allgemeingültigen Beschreibungssprache für die hochdynamische, variantenreiche Montage als Basis für weitere Softwareanwendungen.

---

## LITERATURVERZEICHNIS

Adaptive Logistik: Homepage zum Förderprojekt. Förderstelle: Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderträger: Forschungszentrum Karlsruhe, Bearbeiter: WZL der RWTH Aachen et al., [www.adaptive-logistik.de](http://www.adaptive-logistik.de) , 22.02.2007

Andreasen, M.M.; Kähler, S.; Lund, T.: *Montagegerechtes Konstruieren*. Berlin: Springer Verlag, 1985

Alcaraz, J.; Maroto, C.; Ruiz, R.: Solving the multi-mode resource constraint project scheduling problem with genetic algorithms. In: *Journal of the Operations Research Society* 2003

Baar, T.; Brucker, S.; Knust, S.: Tabu-search algorithms for resource-constrained project scheduling problems. In: Voss, S.; Martello, S.; Osman, I.; Roucairol, C.: *Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998, S. 1-8

Balas E.: Project Scheduling with Resource Constraints. In: *Beale E.M.L. (Ed.): Applications of Mathematical Programming Techniques*. London: Hodder Arnold, 1971, S. 187-200

Boctor, F.F.: Some efficient multi-heuristics procedures for resource-constrained project scheduling. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 49 (1990), S. 3-13

Boctor, F.F.: Heuristics for scheduling projects with resource restrictions and several resource-duration modes. In: *International Journal of Production Research*, Bd. 31 (1993), Nr. 11, S. 2547-2558

Buddhakulsomsiri, J.; Kim, D.S.: Priority rule-based heuristic for multi-mode resource-constrained project scheduling problems with resource vacations and activity splitting. In: *European Journal of Operational Research*, Bd.178, Nr 2, (2007), S. 374-390

Bouleimen, H.; Lecocq, H.: A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode versions. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 149 (2003), S. 268-281

Blum, C.; Aguilera, M. J. B.; Roli, A.; Samoel, M.: *Hybrid Metaheuristics - An Emerging Approach to Optimization*. Berlin: Springer Verlag, 2008

Cohen, S.; Roussel, J.: *Strategisches Supply Chain Management*. Berlin: Springer Verlag, 2006

Demeulemeester, E.; Herroelen, W.: A branch-and-bound procedure for a multiple resource-constrained project scheduling problem. In: *Management Science*, Bd. 38 (1992), S. 1803-1818

DIN 69900 (1987): Projektmanagement - Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe, Teil 1, 1987

DIN 8593 (2003): *Fertigungsverfahren Fügen.*, 2003

Domschke, W.; Drexl, A.: *Einführung in Operations Research*. Berlin: Springer Verlag, 2005

Drexl, A.; Grünewald, J.: Nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling. In: *IIE Transaction*, Bd. 25 (1993), Nr. 5, S. 74-81

Evers, K.: *Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage*. Hannover: Universität, Dissertation, 2002

Eversheim, W.; Dobberstein, M.: Ausprägungen der Produktionsplanung und -steuerung, Abschnitt 14.3 In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Betriebshütte - Produktion und Management*, Teil 2. 7., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1996.

Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik – Grundlagen*. Band 1., 3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1996

Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik - Fertigung und Montage*. Band 4., 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1989

Fischer, W.; Dittrich, L.: *Materialfluß und Logistik – Optimierungspotentiale im Transport- und Lagerwesen*. Berlin: Springer Verlag, 1997

Flemming, V.; Klemkow, E.; Majohr, M.; Rose, O.; Völker, M.: *Simulationsbasierte Untersuchung alternativer Gruppenarbeitskonzepte in der Flugzeugmontage*. In: Wenzel, S. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik*, Kassel, 2006, S. 193-202. – Vortrag zur 12. ASIM-Fachtagung: „Simulation in Produktion und Logistik“, 26.-27.09.2006, Kassel

Friedrich, D.: *Simulation in der Fertigungssteuerung*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1998

Gildemeister: *GILDEMEISTER-Produktionswerk ausgezeichnet – DECKEL MAHO Seebach GmbH siegt beim Wettbewerb „Beste Fabrik“*. – Pressemitteilung, [www.gildemeister.de/Presse](http://www.gildemeister.de/Presse), 24.01.2007

Gottschalk, S.; Schuh, G.: *Komplexitätsoptimale Gestaltung manueller Serienmontage*. In: *wt Werkstattstechnik online*, Heft 9 5 (2006), S. 587-591

Grundig, C.-G.: *Fabrikplanung, Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. 3., neu bearbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2009

Gubitz, K.-M.: *Computergestützte Produktionsplanung – Datenmanagement und Informationsverarbeitung in PPS-Systemen*. Heidelberg: Physica-Verlag, 1994

Hartberger, H.: *Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme*. München: Technische Universität, Dissertation, 1991

Hartmann, S.: *Project scheduling under limited resources*. Berlin: Springer Verlag, 1999

Hartmann, S.; Drexl, A.: *Project scheduling with multiple modes: A comparison of exact algorithms.*, Kiel: Universität, 1997. – Technischer Bericht Nr. 430

Herhold, R.; Schneider, H.; Völker, M.: *Getaktete Druckturm-Fließmontage*. Dresden: Steinbeis-Transferzentrum Produktionstechnik und Entsorgungslogistik, 2006. Projektabschlussbericht, Dresden 2006

HSi: *HSmont – Zeitermittlung für Montageprozesse*. Erfurt: HSi Innovative Organisationssysteme GmbH. – Montageplanungstool, [www.montagekalkulation.de](http://www.montagekalkulation.de), 22.02.2007

Kiener, S.; Maier-Scheubeck, N.; Weiß, N.; Obermaier, R.: *Produktions-Management - Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung*. 8., vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Oldenbourg Verlag, 2006

Klein, R.; Scholl, A.: *Scattered branch and bound: An adaptive search strategy applied to resource-constrained project scheduling*. Darmstadt: Technische Universität, 1998. – Arbeitspapier

Klein, R.; Scholl, A.: *Optimally solving the generalized resource-constrained project scheduling problem*. Darmstadt: Technische Universität, 1998. – Arbeitspapier

Kolisch, R.: *Resource allocation capabilities of commercial project management systems – Resource management boots up the market stock exchange*. Kiel: Universität, 1997. – Technical Report

Kolisch, R.; Drexl, A.: Local Search for nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling. In: *IIE Transaction*, Bd. 29 (1997), S. 987-999

Koether, R. (Hrsg.): *Taschenbuch der Logistik*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2008

Kohler, U.: *Simulationsbasierte Planung und Reorganisation in der Produktion*. In: Virtuelle Produktion, Ablaufsimulation. Seminarbericht 46. München: Herbert Utz Verlag, 1999

Kolisch, R.; Padman, R.: *An integrated survey of project scheduling – Models, algorithms, problems and applications*. Kiel: Universität, 1997. – Arbeitspapier

Kosturiak, J.; Gregor, M.: *Simulation von Produktionssystemen*. 1. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1995

Luczak, H.; Eversheim, W.: *Produktionsplanung und -steuerung - Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 2., korrigierte Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1999

Loedding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. 2., erweiterte Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2008

Maroto, C.; Tormos, P.: Project Management: an Evaluation of Software Quality. In: *International Transactions of Operations Research*, Bd. 1 (1994), Nr. 2, S. 209-221

Meinberg, U.; Gröblichhoff, B.: *Die Flexibilisierung von Montagelinien reduziert Produktionskosten*. In: *Logistik für Unternehmen*, Bd. 20 (2006), Nr. 10, S. 70-73

Mika, M.; Waligóra, G.; Weglarz, J.: Simulated annealing und tabu search for multimode resource-constrained project scheduling with positive cash flows and different payment models. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 164 (2005), Nr. 3, S. 639-668

Mellentien, C.; Trautmann, N.: Resource Allocation with Project Management Software. In: *OR Spektrum*, Bd. 23 (2001), Nr. 3, S. 383-394

Mingozzi, A.; Maniezzo, V.; Ricciardelli, S.; Bianco, L.: An exact algorithm for project scheduling with resource-constraints based on a new mathematical function. In: *Management Science*, Bd. 44 (1998), S. 714-729

Mönch, L. *Agentenbasierte Produktionssteuerung komplexer Produktionssysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006

Muckelberg, E.: „Kitting“-Verfahren ergänzt Kanban-Prinzip. In: *Logistik für Unternehmen*, Bd. 20 (2006), Nr. 10, S. 51-53. – Rede (auszugsweise) zum 50. Jubiläum von Toyota Gabelstapler im Werk Ancenis

Özdamar, L.: A genetic algorithm approach to a general category project scheduling problem. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews*, Bd. 29 (1999), Nr. 1, S. 44-59

Özdamar, L.; Ulusoy, G.: A local constraint based analysis approach to project scheduling under general resource constraints. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 79 (1994), S. 287-298

Patterson, J.H.; Slowinski, R.; Talbot, F.B.; Weglarz, J.: An algorithm for a general class of precedence and resource-constrained scheduling problems. In: Slowinski, Roman (Hrsg.); Weglarz, Jan (Hrsg.): *Advances in Project Scheduling*. Elsevier (1989), S. 3-28 (Studies in Production and Engineering Economics 9)

- 
- Salewski, F.; Schirmer, A.; Drexl, A.: Project scheduling under resource and mode-identity constraints. In: *European Journal of Operational Research* Bd. 102 (1997), S. 88-110
- Scitor: *Project-Management Software PROJECT SCHEDULER Version 8.0*. SCITOR GmbH, www.scitor.com, 27.02.2007
- Seeliger, G.; Neu, S.: *Produktionssysteme, Abschnitt 10.1*. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Betriebshütte - Produktion und Management*, Teil 2., 7., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1996
- Schuh, G.; Gottschalk, S.; Höhne, T.; Welter, T.; Hille, P.: *Dezentrale Montagesteuerung im variantenreichen Maschinen- und Anlagenbau*. In: *wt Werkstattstechnik online*, Heft 5 6 (2008), S. 391-396
- Schuh, G.; Gottschalk, S.; Harre, J.: *Dedicated Flexibility - Komplexitätsgerechte Gestaltung der Serienmontage*. In: *Industrie Management*, Band 22, Heft 2 5 (2006), S. 21-25
- Schuh, G.; Kampker, A.; Höhne, T.: Adaptive Logistik – Selbststeuerung in Fertigung und Montage. In: *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 5 (2006), S. 321-324
- Schulz, M.: *Diskrete Simulation und moderne heuristische Verfahren zur Entscheidungsunterstützung in der Fertigungssteuerung*. Dresden: Technische Universität, Dissertation, 1998
- Siemer, T.: *Konzipierung eines Bereichsleitsystems für die Montage von Flugzeugrumpfsystemen*. Dresden: Technische Universität, Diplomarbeit, 2004
- Schwarze, J.: *Netzplantechnik*. 8. Auflage. Berlin: Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, 2001
- Slowinski, R. Soniewicki, B.; Weglarz, J.: DSS for multiobjective project scheduling. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 79 (1994), S. 220-229
- Sommer, S.: *Taschenbuch automatisierte Montage- und Prüfsysteme -Qualitätstechniken zur fehlerfreien Produktion*. München: Carl Hanser Verlag, 2008
- Speranza, M.G.; Vercellis, C.: Hierarchical models for multi-project planning and scheduling. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 64 (1993), S. 312-325
- Sprecher, A.: *Solving RCPSP efficiently at modest memory requirements*. Kiel: Universität, 1997. – Arbeitspapier
- Talbot, F.B.: *Resource-constrained project scheduling with time-resource trade-offs: The nonpreemptive case*. In: *Management Science*, Bd. 28 (1982), Nr. 10, S. 1197-1210

Traenkner, J.-H.: *Entwicklung eines prozess- und elementorientierten Modells zur Analyse und Gestaltung der technischen Auftragsabwicklung von komplexen Produkten*. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation, 1990

Vanhoucke, M.; Demeulemeester, E.; Herroelen, W.: On Maximizing the Net Present Value of a Project Under Renewable Resource Constraints. In: *Management Science*, Bd. 47 (2001), Nr. 8, S. 1113-1121

VDI 3633: *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen*. 1996

Völker, M.; Majohr, F.; Carl, S.; Rose, O.: *Ein innovatives Konzept zur Optimierung der Montageorganisation und -logistik für kundenspezifische Maschinen, Anlagen und Fahrzeuge*. In: 4. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik an der Technischen Universität Chemnitz 9 (2008), S. 141-149

Weigert, G.: Theorie und Praxis der simulationsgestützten Ablaufplanung. In: *Simulation in Produktion und Logistik 2006*. Erlangen: SCS Publishing House, 2006, S. 253-262 – Tagungsband zur 12. ASIM Fachtagung, Kassel, 26.-27.09.2006

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 6., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2008

Wiendahl, H.-H.; Wiendahl, H.-P.; Cieminski, G. von: *Stolpersteine der PPS - Symptome, Ursachen, Lösungsansätze*. In: *wt Werkstattstechnik online*, Heft 99 (2005), S. 717-725

Wildemann, H.: *Innovation in der Produktionswirtschaft - Produkte, Prozesse, Planung und Steuerung*. 1. Auflage. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag, 1998

Weihrauch, K.; Keller, G.: *Produktionsplanung und -steuerung mit SAP - Einführung in die diskrete Fertigung und die Serienfertigung mit SAP PP*. 1. Auflage. Bonn: Galileo Press, 2001

Wuttke, C. C.: *Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen in der Produktionslogistik*. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, Dissertation, 2000

Zäpfel, G.; Braune, R.: *Moderne Heuristiken der Produktionsplanung am Beispiel der Maschinenbelegung*. 1. Auflage. WiSo-Kurzlehrbücher: Reihe Betriebswirtschaft; Vahlen Verlag, 2005

Zenner, C.: *Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung*. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, Dissertation, 2006

---

**Liste der unveröffentlichten Diplom- und Belegarbeiten des Forschungsprojektes**

Kokot, E.: *Simulationsbasierte Heuristik zur optimierten Planung und Steuerung komplexer Montageprozesse am Beispiel der kundenspezifischen Turbinenmontage*. Dresden: Technische Universität, Diplomarbeit, 2009

Hillgruber, K.: *Simulationsbasierte Heuristik zur optimierten Planung und Steuerung komplexer Montageprozesse am Beispiel der kundenspezifischen Flugzeugumrüstung*. Dresden: Technische Universität, Diplomarbeit, 2009

Siebert, R.: *Simulationsbasierte Heuristik zur optimierten Planung und Steuerung komplexer Montageprozesse am Beispiel der kundenspezifischen Montage von Laserschneidmaschinen*. Dresden: Technische Universität, Große Belegarbeit, 2009

**Liste der Veröffentlichungen des Forschungsprojektes**

Völker, M.; Majohr, F.; Carl, S.; Rose, O.: Ein innovatives Konzept zur Optimierung der Montageorganisation und -logistik für kundenspezifische Maschinen, Anlagen und Fahrzeuge. In: 4. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik an der Technischen Universität Chemnitz 9 (2008), S. 141-149

Völker, M.; Carl, S.; Rose, O.: Simulationsbasierte Personaleinsatzplanung für komplexe Montagesysteme. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 58 (2009) Heft 1 - 2, S. 39 – 44

Schmidt, T.; Rose, O.; Völker, M.; Carl, S.: Optimierte Planung und Steuerung komplexer Montageprozesse. *wt Werkstattstechnik online*, Jahrgang 99 (2009) H. 4, S. 232 - 238

Carl, S.: Neuer Lösungsansatz für die Planung und Steuerung der Montage variantenreicher Maschinen, Anlagen und Fahrzeuge. Vortrag zum Logistics Competence Day Dresden 2009 der Bundesvereinigung für Logistik (BVL) e.V. an der TU Dresden, 16.04.2009