

Simulation und Optimierung einer Variantenfließlinie - ein Fallbeispiel einer Montage von Portalwaschanlagen

Simulation and Optimisation of a Mixed-model Line – a Case Study of the Assembly of Gantry Washing Systems

Lothar März, STREMLER AG, Lindau (Germany), lothar.maerz@stremeler.de
Jörg Mielke, WashTec Cleaning Technology GmbH, Augsburg (Germany),
jmielke@washtec.de

Abstract: In car wash machine manufacturing, the assembly line is highlighted by product diversity and workforce flexibility. The main challenge of operational control is to schedule assembly tasks to workstations by taking workforce availability and qualification into consideration. To help planner to better analyse, plan and evaluate the assembly line, in this paper a framework is developed in which simulation and optimization are applied. Particularly, a simulation-based optimization approach is used to reduce excessive overload peaks for workstations. At last, an example of application from an industrial partner is given to show feasibility and applicability of the framework.

1 Personaleinsatzplanung in sequenzierten Montagelinien

Jedes Unternehmen muss sich der Herausforderung stellen, Spitzenleistung zu global wettbewerbsfähigen Preisen anzubieten. In allen Branchen spielt neben Technologie und Qualität der Kundenservice eine zunehmende Rolle zur Differenzierung des eigenen Leistungsangebots gegenüber der Konkurrenz.

Um die Anforderungen wirtschaftlich erfolgreich erfüllen zu können, bedingt es einerseits eine hohe Innovationsfähigkeit und ausgeprägte technische Kompetenz. Andererseits gelingt die langfristige Behauptung im globalen Wettbewerb nur, wenn die hochentwickelten Produktionskompetenzen so flexibel wie möglich und gleichzeitig kostenoptimal eingeplant und gesteuert werden können. Aufgrund der arbeitsintensiven Produktionsstruktur und der niedrigen Automatisierung sind in Montagelinien von Waschanlagenherstellern die Mitarbeiter nach wie vor die wesentlichen Produktionsressourcen. Um die hohen Arbeitskosten am Standort Deutschland im Griff zu halten, ist eine hohe Arbeitsflexibilität notwendig.

Ziel ist es, das ständig wechselnde Produktionsprogramm mit so wenig wie möglich Mitarbeitern zu bewältigen (März et al. 2010). Die Mitarbeiterflexibilität drückt sich beispielsweise darin aus, über Taktgrenzen zu driften oder als Springer innerhalb eines Taktes zu einer anderen Station zu wechseln, um dort anfallende Engpasssituationen zu vermeiden. Driften bedeutet, dass Mitarbeiter nachfolgenden Aufträgen entgegengehen bzw. in die nächste Station folgen.

Springer lassen sich in interne und externe Springer unterscheiden. Externe Springer sind nicht in der Linie eingeplant und unterstützen in Überlastfällen die Mitarbeiter einer Station, um die dort anfallenden Tätigkeiten innerhalb des vorgegebenen Taktes auszuführen (Becker und Scholl 2006). Der Mitarbeiter gleicht hierbei die wechselnden Prozesszeitanforderungen über den Taktzeiten aus. In der Praxis des Personaleinsatzes in der Montage kommt es zudem vor, dass Mitarbeiter im Laufe eines Taktes an mehr als einer Station Tätigkeiten verrichten können. Dies kommt immer dann vor, wenn an der Stammstation genug freie Kapazität vorhanden ist, um einen der zugewiesenen Mitarbeiter an einer anderen (Springer-)Station tätig werden zu lassen. In diesem Fall gleicht der interne Springer die unterschiedlichen Prozesszeitanforderungen zum gleichen Takt über zwei verschiedenen Stationen aus.

Eine weitere Einflussgröße bei der Austaktung der Linien stellen die Qualifikationen der Mitarbeiter dar. Somit stellt sich dem Planer die tägliche Aufgabe, die Reihenfolge der Anlagen in Abhängigkeit vom Personalantritt, den Qualifikationen und den Prozesszeitanforderungen je Anlage so vorzunehmen, dass die Prozesszeitanforderungen je Takt und Station weitgehend ausgeglichen sind und sowohl Unterauslastungen als auch Überlastfälle vermieden werden.

Tatsächlich lässt sich aufgrund der hohen Prozesszeitspreizung der Anlagen beobachten, dass vielfach Überlastfälle vorliegen, die durch eine effiziente Reihenfolgeplanung hätten vermieden werden können. Voraussetzung hierzu ist die genaue Voraussagbarkeit der Auswirkungen des Mitarbeiterverhaltens unter Berücksichtigung der Möglichkeiten zur Arbeitsflexibilität (Driften, Springen zwischen Stationen, Zuordnung der Mitarbeiter zu Stationen, etc.).

Die Simulation hat sich zur Unterstützung der Planung von Montagelinien in den letzten Jahren als Stand der Technik etabliert (Pinedo 2007). Die Simulation dient dazu, verlässliche Vorhersagen des dynamischen Verhaltens der Mitarbeiter für den Zeitraum einer Lieferwoche zu erstellen. Speziell zur Vorhersage des Verhaltens eines jeden Mitarbeiters wird jeder einzelne Prozessschritt den Mitarbeitern zugewiesen und die Prozessdauer anhand der Qualifikation berechnet. Somit erhält der Planer eine klare Übersicht über den Arbeitsablauf in Abhängigkeit der anliegenden Auftragssequenz.

Allerdings bewertet die Simulation lediglich ein Planungsszenario, eine Verbesserung der Planungslösung ermittelt sie nicht. Dahingehend ist die Simulation ein sehr effizientes Werkzeug, um die Auswirkungen von Sequenzen auf die Auslastung der Mitarbeiter und den Bedarf an externen Springern zu bewerten. Die Sequenzierung einer komplexen Montagelinie ist ein kombinatorisches Optimierungsproblem, welches bedauerlicherweise ein NP-schweres Problem ist, welches nicht in kurzer Laufzeit mit klassischen Lösungsalgorithmen wie beispielsweise mit Dispatching-Regeln gelöst werden kann. Ein vielversprechender Ansatz zur Lösung dieser Aufgabe ist die simulationsbasierte Optimierung (Law und McComas 2002).

Die grundlegende Idee der simulationsbasierten Optimierung ist es, verschiedene Szenarien zu simulieren, zu bewerten und zu vergleichen, um anschließend durch regelbasierte Konfiguration neue Szenarien zu kreieren. Die Grundidee dieser Iterationen ist die Generierung von machbaren Lösungen. Beispielsweise wurde die meta-heuristische Methode der genetischen Algorithmen (GA) in Kombination mit Simulation mehrfach erfolgreich in verschiedenen Industrien angewendet, um Reihenfolgeprobleme zu lösen (Werner 2011).

Die in diesem Beitrag vorgestellte Anwendung dient neben der Personaleinsatzplanung und Sequenzoptimierung auch zur Abtaktung der Linie (Abb. 2).

Personaleinsatzplanung	Sequenzoptimierung	Abtaktung der Linie
<ul style="list-style-type: none"> — Auswirkungen einer Abweichung im Personalantritt — Überprüfen der Anpassung des Personaleinsatzes — Erkennen von Schwankungen im Programm — Überprüfen der Anpassung des Personaleinsatzes — Erkennen von Variantenspitzen in einer Schicht — Überprüfen der Anpassung des Springereinsatzes <p>► Dynamische Kapazitätsanalysen zur kurzfristigen Sicherstellung der Produktivität</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Minimierung der Überlastfälle je Takt und Arbeitsstation bzw. Reduktion der Einsatzzeiten von Springern — Anpassen der Reihenfolge der Aufträge anhand vorgegebener Zielkriterien — Festlegen des Auftragsumfangs <p>► Simulationsgestützte Optimierung der Auftragsreihenfolgen zur Erhöhung der Produktivität</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Erkennen von permanenter Überlast in Stationen — Verschieben von Arbeitsinhalten von einer Station in die andere — Verändern des Personaleinsatzes — Anpassen der Taktzeit oder von Prozesszeiten <p>► Dynamische Kapazitätsanalysen zur langfristigen Erhöhung der Produktivität</p>

Abbildung 1: Anwendungsfelder der simulationsgestützten Linienoptimierung

Diese drei Anwendungsfelder lassen sich anhand der Fristigkeit ihres Planungseinsatzes unterscheiden: die Personaleinsatzplanung setzt auf eine gegebene Sequenz und überprüft im Falle eines abweichenden Personalantritts die Auswirkungen und bewertet mögliche alternative Personalzuordnungen. Die Sequenzoptimierung läuft im Vorfeld ab und minimiert den Bedarf an Mitarbeitern und Springern. Die Abtaktung fällt in den Aufgabenbereich der Arbeitsplanung und hat zum Inhalt, die Prozessbausteine so auf Stationen und Mitarbeitergruppen zu verteilen, dass trotz Variantenvielfalt eine möglichst gleichmäßige Auslastung der Mitarbeiter möglich wird.

Der Beitrag fokussiert in der Folge auf die Sequenzoptimierung. Hierzu werden zunächst in Abschnitt 2 der Abbildungsumfang und die Simulation des Personaleinsatzes vorgestellt. Im Abschnitt 3 wird die Methodik zur Sequenzoptimierung erläutert. In Abschnitt 4 werden die Ergebnisse vorgestellt. Der Beitrag endet mit einem Ausblick.

2 Montagestruktur und Personaleinsatz

Die sequenzierte Produktionslinie bei WashTec umfasst Vormontage- als auch Endmontagestationen. Insgesamt werden an 23 Stationen im Takt die Portalanlagen in hoher Produktvarianz montiert. Die Struktur der Montage ist in Abbildung 2 aufgezeigt. Die Stationen werden in 17 Taktzyklen durchlaufen, d.h. die Vormontagen eines Auftrages laufen teilweise parallel zu den Tätigkeiten in der Hauptmontage. Die Taktzeit variiert je nach Auftragslage zwischen 45 und 55 Minuten.

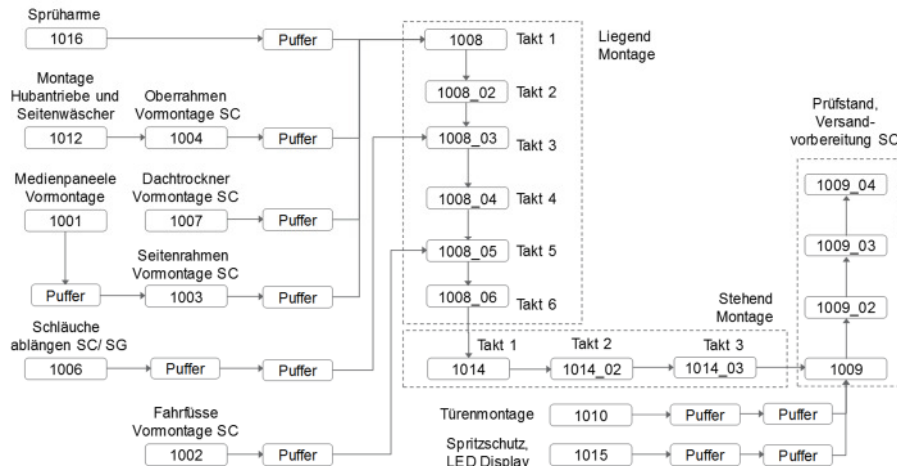


Abbildung 2: Abbildungsumfang des sequenzierten Montagebereichs

Die Mitarbeiter sind den Stationen zugeordnet und verfügen über eine stationsabhängige Qualifikation. Eine Qualifikation von 100% bedeutet, dass der Mitarbeiter die Prozesse in der im Arbeitsplan hinterlegten Zeit bearbeiten kann. Wenn der Mitarbeiter eine Qualifikation von 50% aufweist, dann benötigt er für die gleiche Tätigkeit die doppelte Zeit. In der Mitarbeiterqualifikationsmatrix sind die Qualifikationsgrade eines jeden Mitarbeiters für jede Station hinterlegt.

Die Mitarbeiter können driften. Driften bedeutet, dass die Mitarbeiter im Falle von Überlast des nachfolgenden Auftrags diesem entgegengehen können (Vorarbeit) oder in den nächsten Taktzyklus nacharbeiten. Das Driftvermögen kann im Simulationsmodell in Abhängigkeit der Taktzeit je Station hinterlegt werden. Beispielsweise bedeutet ein Driftvermögen von +0,5 Taktzeit, dass die an dieser Station zugeordneten Mitarbeiter bei einer Taktzeit von beispielsweise 50 Minuten insgesamt pro Person 25 Minuten nacharbeiten können.

Mitarbeiter können zudem als Springer fungieren. In der Praxis des Personaleinsatzes in der Montage kommt es vor, dass Mitarbeiter im Laufe eines Taktes an mehr als einer Station Tätigkeiten verrichten. Dies kommt immer dann vor, wenn an der Stammstation genug freie Kapazität vorhanden ist, um einen der zugewiesenen Mitarbeiter an einer anderen (Springer-)Station tätig werden zu lassen. Der potentielle Springer-Mitarbeiter muss dazu im Vorfeld der Planung in der Personaleinsatztabelle als solcher gekennzeichnet werden.

Daneben gibt es noch Springer, die nicht den Stationen zugeordnet sind und immer dann einspringen, wenn die Stammebelegschaft die anfallenden Prozesszeitanforderungen nicht mehr innerhalb ihrer zeitlich gesteckten Rahmen erfüllen kann.

In Abbildung 3 sind beispielhaft die Prozesszeitanforderungen (dunkler, rechter Balken je Gruppe) sowie die Auslastungen der Mitarbeiter (rechte Balkenreihe je Balkengruppe je Gruppe) je Takt gegenübergestellt. Die Anzahl an Balken gibt die Anzahl an Mitarbeitern wieder. Die 100%- Linie markiert die Kapazität der Mitarbeiter unter Berücksichtigung ihrer Qualifikation. Somit wird ersichtlich, inwieweit die anliegenden Aufträge je Takt die Kapazität der zugeordneten Mitarbeiter überschreiten oder nicht. Die helleren Balkenabschnitte zeigen auf, welche Prozesszeitanteile des vorhergehenden Takts im nachfolgenden Takt bearbeitet werden mussten (Nacharbeit). Die Balken oberhalb der Kapazitätslinie von 100% über den Mitarbeiterbalken zeigen auf, dass in diesem Takt ein (externer) Springer notwendig war. Diese Fälle gilt es zu vermeiden.

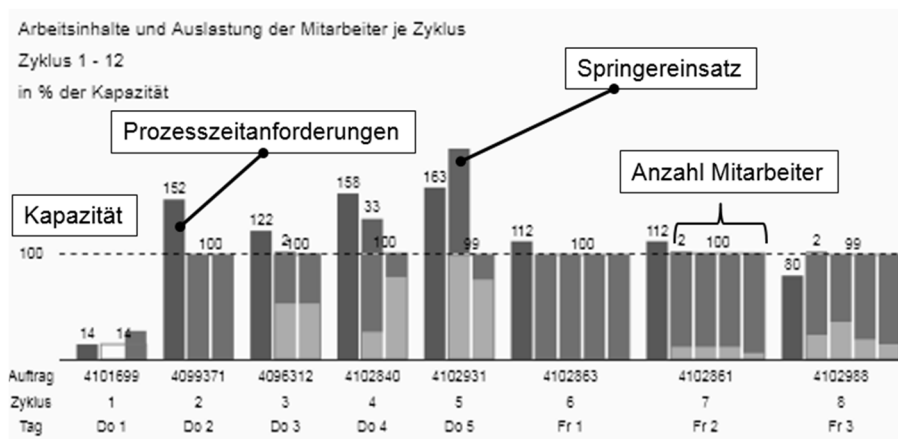


Abbildung 3: Prozesszeitanforderungen und Personaleinsatz

3 Architektur und Methodik der Sequenzoptimierung

Die Architektur der Anwendung ist in Anlehnung an die Funktionen, die durch den Ablauf der Planung vorgegeben sind, strukturiert. Nach Einlesen der Auftrags- und der Prozesszeitdaten aus SAP wird zunächst die Initialsequenz simuliert. Die Zuweisung der Arbeitsinhalte zu den Stationen basiert auf den Arbeitsplandaten aus SAP, in denen die einzelnen Prozesszeiten den Stationen zugeordnet sind. Diese erste Sequenz basiert auf einer vorgeschalteten, groben Aufteilung von Aufträgen zu Schichten unter Berücksichtigung von Hauptmerkmalen. Somit wird vermieden, dass vorhersagbare Überlastfälle aufgrund von optionalen Ausstattungsvarianten zu oft in einer Schicht vorkommen. Dieser erste Sequenzvorschlag dient als Referenz zur Beurteilung der nachfolgenden Sequenzoptimierungen.

Die Bewertung erfolgt anhand der Springereinsatzzeiten. Dazu werden alle Springereinsatzzeiten über alle Stationen und alle Takte hinweg summiert.

In Abbildung 4 ist der iterative Durchlauf der Sequenzoptimierung, integriert in den übergeordneten Prozess zur optimalen Konfiguration, dargestellt.

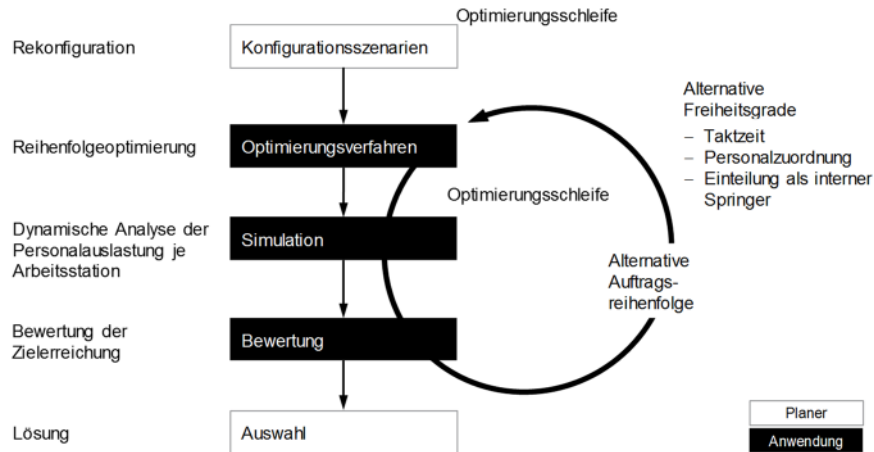


Abbildung 4: Ablauf zur Optimierung

Der Ablauf gestaltet sich wie folgt: Nach Simulation und Bewertung der Initialsequenz werden alternative Sequenzen ermittelt und erneut simuliert. Der ausgewählte Optimierungsalgorithmus determiniert die Ermittlung und Auswahl neuer Reihenfolgen. Die Ergebnisse der modifizierten Reihenfolgen werden bewertet und verglichen. Nach Durchlaufen einer Anzahl von Schleifen, die von einem Abbruchkriterium abhängt, steht fest, welche Springereinsätze notwendig sind. Sollte das Ergebnis nicht zufriedenstellend sein, kann der Disponent alternative Konfigurationen vornehmen. Dabei stehen ihm eine Anzahl an Stellgrößen zur Verfügung, wie beispielsweise:

- Erhöhen oder Verkürzen der Taktzeit
- Geänderte Personalzuordnung zu Stationen, z.B. durch Zuordnung von minder qualifizierten Mitarbeitern zu Stationen mit Unterlast
- Einteilung von Mitarbeiter als interne Springer

Im Anschluss daran kann wieder die systemgestützte Sequenzoptimierung ablaufen. Im Falle von sehr kurzfristigen Änderungen, wie es beispielsweise vor Schichtbeginn sein kann, wenn der erwartete Personalantritt nicht wie geplant erfolgt, kann der Disponent zumindest bei gegebener Sequenz durch geänderte Personalzuordnungen kritische Engpasssituationen lösen. Im Vorfeld einer Schicht kann die Sequenzoptimierung helfen, eine optimale Reihenfolge in Kombination mit den weiteren Konfigurationsmöglichkeiten zu finden.

Die Zielfunktion der Optimierung versucht die Einsatzzeiten von Springern zu minimieren. Nach jedem Simulationslauf werden die Anzahl an Einsätzen und die summierten Springereinsatzzeiten je Station ermittelt. Je kleiner die Springereinsatzzeiten, desto besser das Ergebnis. In Tabelle 1 ist die Ergebnistabelle der Simulation mit den Springereinsätzen je Station abgebildet.

Tabelle 1: Bewertung der Springereinsätze je Simulationslauf

Station	Springer- quote [%]	Springer- quote [min]	Anzahl	Faktor	Gewichtete Anzahl
1001	22	875,5	16	1	16
1012	22	311,6	13	1	13
1007	12	350	9	1	9
1016	6	101	2	1	2
1003	5	243	7	1	7
1004	0	0	0	1	0
1006	20	261,2	10	1	10
1008	0	0	0	1	0
1008_02	0	0	0	1	0
1002	1	41	1	1	1
1008_03	16	232	9	1	9
1008_04	0	0	0	2	0
1008_05	0	0	0	2	0
1008_06	0	0	0	2	0
1010	24	1022,5	11	2	22

Die Optimierung wurde zunächst mit regelbasierten Algorithmen angegangen. Nach Auswahl einer Zeitperiode von z.B. einer Kalenderwoche durchläuft der Algorithmus folgende Schritte:

1. Sortiere die Stationen absteigend nach ihren Springereinsatzzeiten
2. Nimm Station mit der höchsten Springereinsatzzeit
3. Sortiere die an dieser Station im Betrachtungszeitraum anliegenden Aufträge nach Prozesszeitsummen
4. Sortiere die Aufträge wechselseitig nach höchstem und niedrigstem Wert der Prozesszeitsummen, d.h. nimm als erstes den Auftrag mit den höchsten Prozesszeitanforderungen, dann den Auftrag mit den niedrigsten Prozesszeitanforderungen, dann den Auftrag mit den zweithöchsten Prozesszeitsummen usw.
5. Verfahre solange in diesem Schema bis alle Aufträge in die Sequenz eingeordnet sind
6. Simuliere die Sequenz und speichere das Ergebnis
7. Nimm die nächste Station aus der sortierten Liste aus 1.
8. Verfahre solange, bis alle Stationen mit einem Springereinsatz größer 0 bewertet wurden
9. Vergleiche die Ergebnisse und wähle das Szenario mit den niedrigsten Springereinsatzzeiten

Anstelle der Springereinsatzzeiten kann als Bewertung auch die Anzahl Springereinsätze fungieren. Da die Springereinsätze in den Stationen der Endmontage

schwerer zur Last fallen, wurde hierzu ein Gewichtungsfaktor eingeführt (siehe Tab. 1), der diesem Umstand Rechnung trägt.

4 Ergebnisse der Sequenzoptimierung

Insgesamt konnten mit der regelbasierten Sequenzoptimierung Verbesserungen des Springereinsatzes, bezogen auf die Gesamtanzahl an Mitarbeitern in der Linie, zwischen 3% und 5% erreicht werden.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse von insgesamt fünf zufällig ausgewählten Wochen aufgeführt, die in Abhängigkeit der Springereinsatzzeiten aufsteigend sortiert wurden. Verglichen werden die Springereinsatzzeiten der Initialsequenz mit den Ergebnissen der regelbasierten Optimierung.

Tabelle 2: Ergebnisse der Simulationsoptimierung

Springerzeit [min]	Woche 1	Woche 2	Woche 3	Woche 4	Woche 5	Woche 6
Initialsequenz	3102	6272	6891	9660	9781	12996
Optimierung	2804	3845	4336	5853	6333	10076
Verbesserung	9,6%	38,7%	37,1%	39,4%	35,3%	22,5%

Die Ergebnisse zeigen auf, dass das Maximum an Verbesserung erreicht werden kann, wenn sich die Summen der Springereinsatzzeiten in einem bestimmten Bereich bewegen. Der Springereinsatz ergibt sich aufgrund des anliegenden Produktmix'. Im idealen Potentialbereich konnten somit Verbesserungen von bis zu 40% weniger Einsatzzeiten von Springern aufgezeigt werden! Allerdings ist bei kleineren Sequenzperioden (z.B. 2-3 Tage bzw. Schichten) und durch eine verbesserte Linienausstattung auch mit kleineren Verbesserungspotentialen zu rechnen.

Die Simulation erfolgte in der eigenentwickelten, hoch-performanten Simulations- und Optimierungsplattform STREMLER Real Time Technologies. Für die Simulation der Montage einer Schicht benötigt die Simulation weniger als eine Sekunde, sodass die Ergebnisse eines Optimierungslaufs inklusive dem Datenimport und -export über eine Schnittstelle zur Datenbank innerhalb von 70 Sekunden vorliegen.

In einem weiteren Schritt sollen nun heuristische Verfahren parallel angewendet werden, um in Abhängigkeit der verfügbaren Planungszeit weitergehende Optimierungslösungen zu ermitteln.

5 Ausblick

Mit der Einführung der Anwendung zur simulationsgestützten Personaleinsatzplanung und Sequenzoptimierung im Bereich Montage beschritt die WashTec Cleaning Technology GmbH den Weg in Richtung einer Supply Chain in Echtzeit. Die seit über einem Jahr laufende Applikation zur simulationsgestützten Optimierung der getakteten Montage basiert auf einer modularen Planungsarchitektur,

die eine sukzessive Einführung der Funktionalitäten in den Wertschöpfungsstufen ermöglicht. Der volle Nutzen dieses Baukastenprinzips kann mit der Realisierung einer durchgängigen Abbildung der Wertschöpfungsstufen in den Planungsmodulen und einer kundenspezifisch definierten Supply Chain Plattform generiert werden.

Diese gründen im Wesentlichen auf folgenden Zusammenhängen:

- Kontinuierliche Anpassung der Produktion an die Marktentwicklung durch Pull vom Versand und einer zeitnahen Reaktion in der Wertschöpfungskette (Produktion nahe am Markt)
- Höhere Planungssicherheit und Ruhe in der Produktion durch simulationsgestützte, dynamische Kapazitätsanalysen und Optimierung unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen im Produktionsverlauf
- Synchronisierte Planung und Steuerung der Wertschöpfungsstufen im Takt
- Kontinuierliche Verfolgung der gewichteten Zielgrößen von Produktivität, Service und Wirtschaftlichkeit
- Höhere Produktivität durch optimale Sequenzierung und bessere Losgrößen in allen Stufen

Die optimierte Planung und Abtaktung der Montage stellt einen komplexen Planungsfall bei WashTec dar. Dieser Schritt ermöglicht signifikante Verbesserungen in Produktivität und Service sowie drastische Einsparungen bei den Planungsaufwänden.

Literatur

- Becker, C.; Scholl, A.: A Survey on problem and methods in generalized assembly line balancing. *European journal of operational research* 168 (2006), S.694-715.
- Law, A.; McComas, M.: Simulation-based optimization. In: Yücesan, E.; Chen, C.-H.; Snowdon, J. L.; Charnes, J. M. (Hrsg.): *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. 2002. Piscataway (USA): 2002. S.41-44.
- März, L.; Tutsch, H.; Auer, S.; Sihm, W.: Integrated production program and human resource allocation planning of sequenced production lines with simulated assessment. In: Dengelmaier, W.; Blecken, A.; Delius, R.; Klöpfer, S. (Hrsg.). *Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics*, Berlin/Heidelberg: Springer 2010, S.408-418.
- Pinedo, M. L.: *Planning and Scheduling in Manufacturing and Service*. New York: Springer 2007.
- Werner, F.: Genetic algorithm for shop scheduling problems: a survey. *Preprint Series* 11. (2011). S.1-66.