

Leistungsabstimmung von Montagesystemen auf der Basis von Personaleinsatzgraphen

Balancing of assembly systems based on staff assignment graphs

Thilo Gamber, Michael Leupold, Gert Zülch,
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (Germany),
thilo.gamber@kit.edu, michael.leupold@kit.edu, gert.zuelch@kit.edu

Abstract: With regards to methods of assembly systems planning we are familiar with the depiction of the technical structure using capacity fields and capacity graphs in addition to the modelling of assembly activities as a precedence diagrams. However, no form of presentation has yet been defined that describes the assignment of staff within an assembly system. This paper discusses the concept of the so called staff assignment graph used to balance a hybrid assembly system, and in doing so marks a first attempt to close this gap and to develop a more comprehensive planning method. The paper also explains how to evaluate staff assignment graphs, as well as how to automatically derive them from corresponding capacity graphs.

1 Die Problematik der Leistungsabstimmung hybrider Montagesysteme

In Montagesystemen, die traditionell durch einen hohen Anteil manueller Tätigkeiten und die damit einhergehenden hohen Lohnkosten geprägt sind, führt der vorherrschende Konkurrenzdruck unter anderem zu einem vermehrten Einsatz von Automatisierungstechnik (Lotter 1999; zitiert nach Müller 2002). Da eine vollständige Automatisierung meist aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht oder nur sehr aufwändig umsetzbar ist, werden in der Praxis oft hybride Montagesysteme realisiert, die sich sowohl aus manuellen Arbeitsplätzen als auch aus automatisierten oder zumindest teilautomatisierten Stationen zusammensetzen (Seliger und Neu 1996; Spath und Baumeister 2001).

Dadurch ergeben sich neue Herausforderungen für die Planung solcher Montagesysteme, da eine alternierende Abfolge manueller und (teil-)automatisierter Vorgänge die Leistungsabstimmung solcher Montagesysteme erschwert. In der Praxis fehlt es jedoch sowohl an einem Konzept als auch an einem Verfahren, den Mitarbeiterinsatz in hybriden Montagelinien zu planen und zu bewerten, da es hierbei im Vergleich zu traditionellen, technologisch orientierten Verfahren gilt, den

Mitarbeiterinsatz detailliert zu betrachten. So gilt es Konzepte wie teilautonome Arbeitsgruppen, den Einsatz von Springern und Mehrmaschinenbedienung geeignet zu berücksichtigen, wobei unter anderem auch Laufwege zwischen Arbeitsstationen eine Rolle spielen können. Dazu ist es notwendig, diese formale Lücke in der Planung von Montagesystemen mit Hilfe eines so genannten Personaleinsatzgraphen zu schließen. Dieses Konzept ist anschließend in ein Softwareverfahren zu integrieren, welches sich für die Bewertung einer Planungslösung die Simulation zu Nutze machen kann.

2 Die Lücke in der Planung von Montagesysteme

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Darstellung einer Montageablaufstruktur ist der Vorranggraph, der bereits 1964 von Prenting und Battaglin vorgestellt wurde. In diesem Graphen werden die einzelnen Montagevorgänge als Knoten eines Netzplans logisch und zeitlich verknüpft dargestellt. In dieser Darstellungsform können Kapazitäten jedoch nur als mit den Knoten verknüpfte Zusatzattribute dargestellt werden.

Dittmayer führte 1981 ein Tagesmenge-Stückzeit-Diagramm ein, das er als Kapazitätsfeld bezeichnete und der Kapazitätsteilung in arbeitsteiligen Montagesystemen dient. Dazu wird auf der Abszisse die Stückzeit einer Montageeinheit und auf der Ordinate die zu fertigende Tagesmenge aufgetragen (Dittmayer 1981; Warnecke und Dittmayer 1981). Da der Kapazitätsbedarf einer Montageaufgabe in der Regel größer als das Kapazitätsangebot eines einzelnen Montagearbeitsplatzes ist, gilt es, den Kapazitätsbedarf so in einzelne Kapazitätsbedarfsteile aufzuteilen, dass jeder dieser Teile durch das Kapazitätsangebot eines Arbeitsplatzes gedeckt werden kann. Durch horizontales Teilen eines Kapazitätsbedarfs im Kapazitätsfeld wird dabei eine Mengenteilung, durch vertikales Teilen eine Artteilung durchgeführt.

Um die Konzeption von Model-Mix-Montagesystemen zu unterstützen, entwickelte Braun (1995) den so genannten Komplexgraphen. In diesem werden die Vorranggraphen der in einem Montagesystem zu fertigenden Varianten gebündelt, sodass sich eine Gesamtdarstellung aller in einem Montagesystem durchzuführenden Vorgänge ergibt.

Auf Basis des Kapazitätsfeldes entwickelte Braun (1995) weitergehend den Kapazitätsgraphen. Dieser wird nach bestimmten Regeln in der Weise aus einem Kapazitätsfeld gebildet, dass zu jedem Kapazitätsfeld eine äquivalente Darstellung im Netzgraph ergibt. Dabei werden die Flächen des Kapazitätsfeldes als Knoten des Graphen aufgefasst; Kanten werden immer dann eingefügt, wenn sich die jeweiligen Flächen im Kapazitätsfeld entlang ihrer senkrechten Trennlinien berühren. Im Gegensatz zum Kapazitätsfeld eignet sich der Kapazitätsgraph auch zur Leistungsabstimmung von Model-Mix-Montagesystemen und kann damit aufbauend auf dem Komplexgraphen genutzt werden.

Bei der Planung hybrider Montagesysteme, in denen manuelle, mechanisierte und automatisierte Montagestationen eingesetzt werden, ergeben sich weitere Anforderungen an die Kapazitätsteilung, da der Kapazitätsbedarf der Vorgänge bezüglich Mitarbeiter, Betriebsmittel und Arbeitsgegenstand unterschiedlich sein kann. Dennoch berücksichtigen herkömmliche Konzepte für die Planung hybrider

Montagesysteme oft nur die Sicht einer einzelnen Ressource (Müller und Schneck 1992).

Bereits Dittmayer (1981) unterscheidet zwischen dem Kapazitätsangebot von Mitarbeitern und dem der von ihnen benutzten Arbeitsplätze. Zur Darstellung überlagert er dazu zwei Kapazitätsfelder, die das Angebot für Mitarbeiter und Arbeitsplatz zeigen. Müller (2002) geht noch einen Schritt weiter und entwickelt ein mehrstufiges Vorranggraphenkonzept, bei dem Montagevorgänge differenziert aus der Sicht von Mitarbeiter, Betriebsmittel und Arbeitsgegenstand betrachtet werden können. Dabei werden deren einzelne Kapazitätsbedarfe ausgewiesen und gegenübergestellt. Außerdem nimmt er eine Charakterisierung der Vorgänge in betriebsmittel-, mitarbeiter- und arbeitsgegenstandsorientierte Vorgänge vor und orientiert sich dabei an der Sicht, die den größten Beitrag zum Kapazitätsbedarf eines Vorgangs leistet. Weiterhin wurde von Müller (2002) ein Modell der Personalstruktur für Teilmontagesysteme entworfen, in der Gruppen von Mitarbeitern mehreren Arbeitsplätzen des Systems zugeordnet werden, um so Auslastungsunterschiede auszugleichen.

Allerdings ist zu konstatieren, dass auch zum heutigen Zeitpunkt die Kapazitätsteilung von hybriden Montagesystemen mit Blick auf die Leistungsabstimmung von sowohl Betriebsmitteln als auch Mitarbeitern noch nicht zufriedenstellend gelöst ist. Eine geeignete Darstellungs- und Planungsmethode sollte dabei auf die Besonderheiten des Personaleinsatzes in Model-Mix-Montagesystemen eingehen, so z. B. die Verwendung teilautomatisierter Betriebsmittel und die daraus resultierende Mehrmaschinenbedienung, teilautonome Arbeitsgruppen oder auch den Einsatz von Springern. Diese Lücke in der Montageplanung kann durch die Konzeption eines so genannten Personaleinsatzgraphen gelöst werden.

3 Der Personaleinsatzgraph

Die Grundlage des Personaleinsatzgraphen bilden ein durch Kapazitätsteilung ermittelter Kapazitätsgraph und die dadurch vorgenommene Zuteilung der Montagevorgänge des Vorranggraphen zu Montagestationen. Ein Knoten des Kapazitätsgraphen wird dabei als ein Montagearbeitsplatz aufgefasst. Parallele Wege im Graphen stellen parallele Montagearbeitsplätze dar, die jeweils einer Arbeitsstation angehören. Die einzelnen Vorgänge des Vorranggraphen werden dann in den Arbeitsplatzknoten, denen sie zugeordnet sind, aufgetragen und nach benötigten Kapazitäten kategorisiert. Dabei wird zwischen rein betriebsmittellorientierten, rein mitarbeiterorientierten und gemischten Vorgängen unterschieden, für die ggf. beide Ressourcen während der gesamten Durchführungszeit des Vorgangs zur Verfügung stehen müssen. Ist ein Vorgang nicht kategorisierbar, da er zu unterschiedlichen Anteilen und Zeitpunkten die Kapazitäten des Betriebsmittels oder des Mitarbeiters benötigt, so muss er so oft in Teilvorgänge zergliedert werden, bis eine eindeutige Kategorisierung möglich ist.

Ähnlich wie bei Müller (2002) kann für die Zuordnung von Mitarbeitern zu Montagearbeitsplätzen ein Arbeitsgruppenkonzept vorgesehen werden. Dabei wird angenommen, dass mehrere Arbeitsplätze des Systems einer Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitarbeitern gleicher Qualifikation, zugeordnet werden, die dann teilautonom die Montagevorgänge dort verrichten. Die Mitglieder einer

Arbeitsgruppe werden im Personaleinsatzgraphen nicht individuell, sondern nur zahlenmäßig erfasst.

Bei Mehrmaschinenbedienung ist insbesondere bei nur kurzer Bedienzeit davon auszugehen, dass die Zeit, die ein Mitarbeiter zum Zurücklegen der Distanz zwischen den einzelnen Betriebsmitteln benötigt, einen nicht unerheblichen Anteil seines Kapazitätsangebots beansprucht. Aus diesem Grund sollten diese Zeiten bei der Planung des Montagesystems mit erfasst werden. Um die Darstellung des Personaleinsatzgraphen nicht unnötig zu verkomplizieren, werden diese Daten getrennt in einer Wegezeitenmatrix aufgetragen. In dieser Matrix bilden die Montagestationen die Zeilen und Spalten. Ein einzelner Wert der Matrix repräsentiert dann die Wegezeit, die für die Bewegung eines Mitarbeiters von der durch die Zeile zu der durch die Spalte angegebenen Montagestation benötigt wird. Falls einem Mitarbeiter mehrere Montagestationen oder teilautomatisierte Betriebsmittel zugewiesen werden sollen, sollte der Personaleinsatzgraph darüber hinaus die Möglichkeit bieten, die von diesem Mitarbeiter zurückzulegenden Wege zu erfassen. Dies geschieht durch die Einführung einer neuen Art von gerichteter Kante im Graphen, der Wegekante, die Start- und Endpunkt der Bewegung festlegt. Abbildung 1 zeigt einen solchen Personaleinsatzgraphen am Beispiel eines hybriden Montagesystems.

Nachfolgend soll beschrieben werden, wie einige spezielle Arten des Personaleinsatzes im vorliegenden Konzept für den Personaleinsatzgraphen dargestellt werden können.

Mehrmaschinenbedienung durch einen oder auch mehrere Mitarbeiter kann dadurch kenntlich gemacht werden, dass zuerst die einzelnen Betriebsmittel in einer Arbeitsgruppe gruppiert werden. Dieser Gruppe werden dann die Bediener als Gruppenmitglieder zugewiesen. Laufwege zwischen den einzelnen Betriebsmitteln können mit Hilfe von Wegekanten und Wegezeitenmatrix erfolgen. Ein Beispiel für Mehrmaschinenbedienung durch einen einzelnen Mitarbeiter ist die Arbeitsgruppe 1 in Abbildung 1.

Teilautonome Arbeitsgruppen können mit dem bereits beschriebenen Arbeitsgruppenkonzept des Personaleinsatzgraphen dargestellt werden. Auf die Bewegungsrichtungen innerhalb der einer Arbeitsgruppe zugewiesenen Montagestationen wird dabei verzichtet, um zu kennzeichnen, dass die Entscheidung über die Bearbeitungsreihenfolge der teilautonomen Arbeitsgruppe obliegt, z. B. bei Arbeitsgruppe 2 in Abbildung 1.

Einer oder mehrere *Springer* werden dadurch dargestellt, dass sie einer gesonderten Springer-Arbeitsgruppe zugewiesen werden, denen keine festen Arbeitsplätze zugewiesen sind. Stattdessen werden Wegekanten zwischen dieser Arbeitsgruppe und den Arbeitsplätzen, an denen sie die Mitarbeiter bei der Aufgabenverrichtung unterstützen sollen, aufgezeichnet. Ein Beispiel für die Darstellung eines Springers ist Arbeitsgruppe 3 in Abbildung 1.

4 Die Bewertung von Personaleinsatzgraphen

Zur Bewertung von Personaleinsatzgraphen und insbesondere der Auswirkungen verschiedener Alternativen des Personaleinsatzes können einerseits statische, graphentheoretische Kennzahlen, andererseits aber auch dynamische Kennzahlen

aus einer Simulation herangezogen werden. Nachfolgend werden einige Kennzahlen exemplarisch aufgezeigt. Zur Bewertung der dynamischen Auswirkung verschiedener Personaleinsatzgraphen können personalorientierte Simulationsverfahren herangezogen werden. Im Folgenden wird hierfür das am *ifab* entwickelte Simulationsverfahren *OSim* (Jonsson 2000) verwendet, das für die Abbildung und Simulation von Personaleinsatzgraphen entsprechend erweitert wurde, was zunächst die differenzierte Modellierung von manuellen Arbeitsplätzen sowie von teilautomatisierten und vollautomatisierten Arbeitsstationen und die Modellierung von Arbeitsgruppen umfasste. Weiterhin können Mitarbeiter zu Gruppen zusammengefasst werden, die sich dann einem Teil der Arbeitsplätze und Arbeitsstationen zuordnen lassen. Die Modellierung der Wegekanten und die Eingabe einer Wegezeitenmatrix ermöglichen die Modellierung von Personalbewegungen um geplante, vom Mitarbeiter zurückzulegende Wege bei der Mehrmaschinenbedienung.

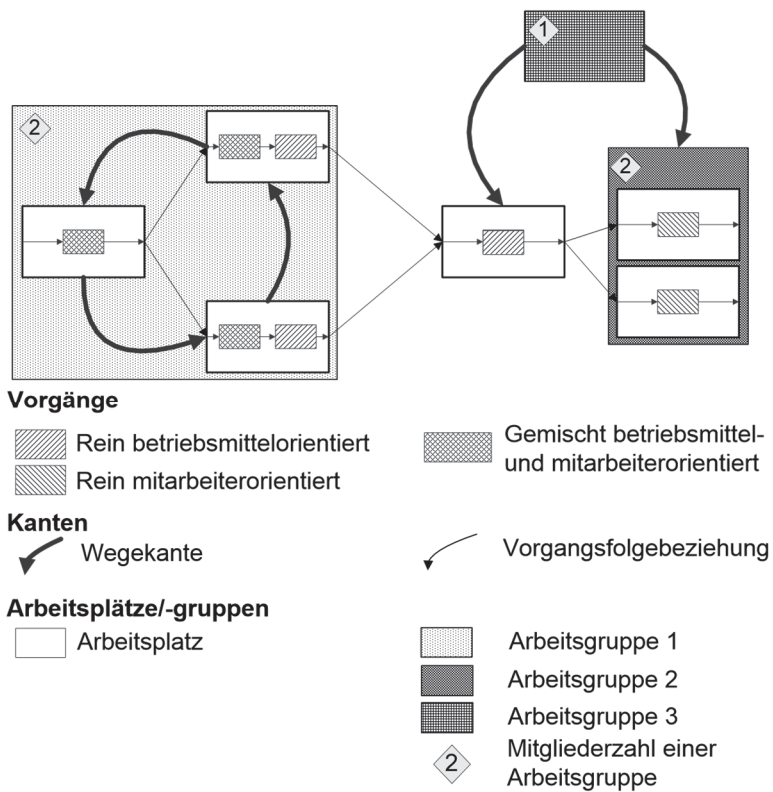


Abbildung 1: Konzept eines Personaleinsatzgraphen am Beispiel einer hybriden Montagelinie (vgl. Zülch et al. 2012, S. 160)

Das Simulationsverfahren *OSim* bietet die Möglichkeit zur Protokollierung des Simulationsablaufs und kann aus diesen Protokollen eine große Auswahl von Kennzahlen zur dynamischen Bewertung von Personaleinsatzgraphen berechnen. Im

Rahmen der Erweiterung des Simulationsverfahrens wurden einige Kennzahlen für das verwendete Arbeitsgruppenkonzept modifiziert.

Die Kennzahl „mittlerer Kapazitätsbestand“ wurde so angepasst, dass die „mehrfache“ Verfügbarkeit einer Arbeitsgruppe im Gegensatz zu einer einzelnen Ressource berücksichtigt werden kann. Konnte der Kapazitätsbestand vorher nur Werte zwischen 0 % und 100 % annehmen, so sind bei Arbeitsgruppen mit mehreren Mitarbeitern nun auch Werte über 100 % möglich. Dazu wird während der Simulation die jeweils aktuelle Anzahl von Gruppenmitgliedern protokolliert und zur Auswertung der zeitlich gewichtete Durchschnitt gebildet.

Zur dynamischen Bewertung mit Hilfe der Simulation wurde in das Verfahren *OSim* ein optimierender Backtracking-Algorithmus implementiert, der zunächst mehrere mögliche Personaleinsatzgraphen erzeugt, auf Durchführbarkeit überprüft und unter den geeigneten Alternativen diejenige auswählt, die bezüglich einer konfigurierbaren additiven oder lexikographischen Präferenzfunktion am besten geeignet ist (vgl. Zülch et al. 2012).

5 Das Anwendungsbeispiel

Da zur Erprobung des Verfahrens keine Praxisdaten oder Benchmarks zum Ergebnisvergleich vorlagen, wurde eine Montagelinie in der Weise modelliert, dass sinnvoll erscheinende Gestaltungsmöglichkeiten sowie das Optimum in Bezug auf eine multikriterielle Präferenzfunktion auch ohne Berechnung nachvollzogen werden können. Mittels eines Durchlaufs des Backtracking-Algorithmus kann dann verifiziert werden, ob dieses Optimum gefunden wurde.

5.1 Ausgangsmodell

Als Beispiel dient eine einfache Montagelinie mit den in Abbildung 2 dargestellten Montagevorgängen und Durchführungszeiten. Dabei seien die Montagevorgänge 2 und 7 automatisierbar.

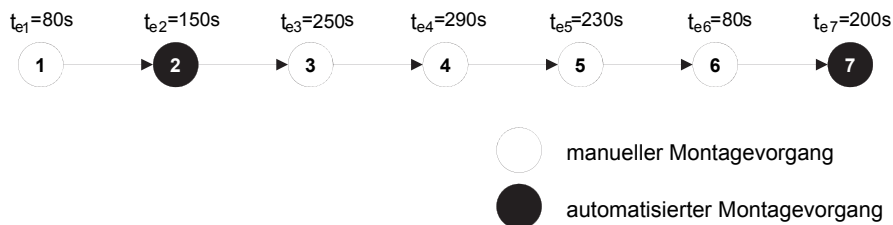


Abbildung 2: Vorranggraph des Anwendungsbeispiels (i.A.a. REFA 1991; Müller 2002)

Um im Einschichtbetrieb (8 h) eine Stückzahl von 96 erreichen zu können, wurde die Taktzeit auf 300 s festgelegt. Die darauf folgende Kapazitätsteilung und Leistungsabstimmung ergab eine Verteilung der Montagevorgänge auf fünf Arbeitsstationen, wobei die Vorgänge 1 und 2 auf Station S1 und die Vorgänge 6 und 7 auf Station S5 zusammengelegt wurden (Abb. 3).

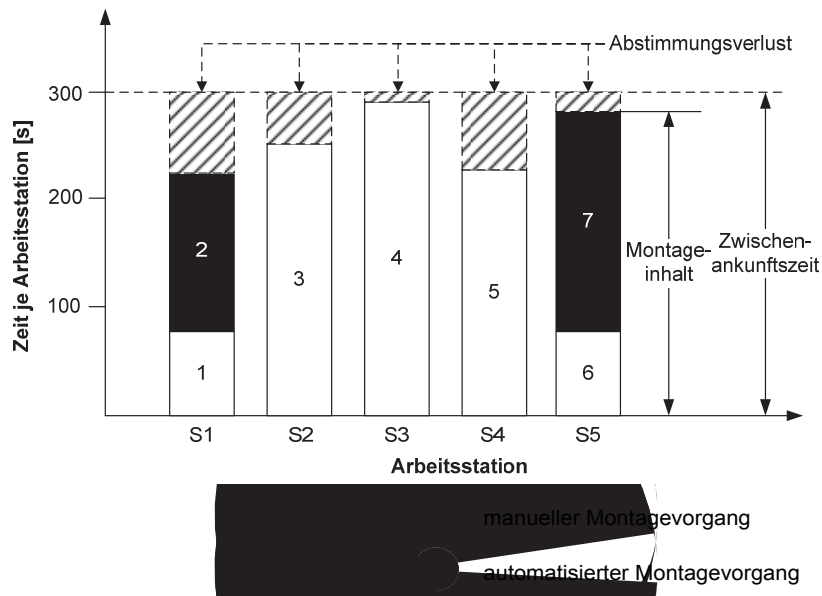


Abbildung 3: Kapazitätsteilung des Anwendungsbeispiels (Darstellung i.A.a. Bullinger 1986)

Dabei sind die Mitarbeiter auf den Stationen S1 und S5 aufgrund des hohen Automatisierungsgrades nur zu jeweils ca. 26,7% ausgelastet. Außerdem ist augenscheinlich, dass – bei entsprechend kurzer Wegezeit zwischen beiden Stationen – ein Mitarbeiter beide Arbeitsplätze bedienen könnte. Daher wurde als Anordnung der Arbeitsstationen eine U-Form (Abb. 4) gewählt. Die Wegezeiten zwischen den einzelnen Arbeitsstationen sind in Tabelle 1 als Wegezeitenmatrix angegeben:

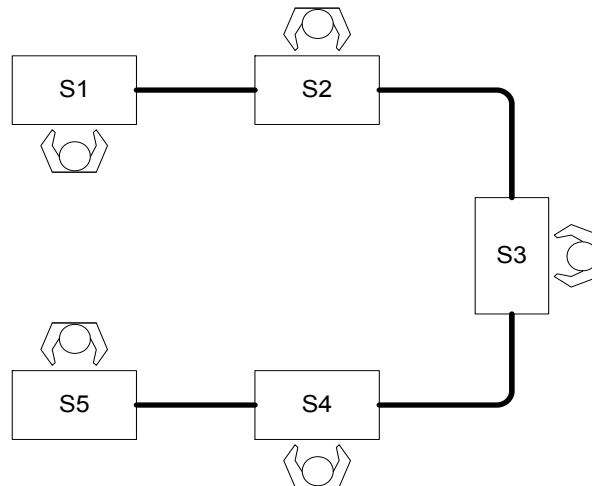


Abbildung 4: Anordnung der Arbeitsstationen des Anwendungsbeispiels

Tabelle 1: Wegezeitmatrix des Anwendungsbeispiels (Zeiten in Sekunden)

	S1	S2	S3	S4	S5
S1	0	200	310	200	50
S2	200	0	105	100	180
S3	310	105	0	130	280
S4	200	100	130	0	180
S5	50	180	280	180	0

5.2 Simulations- und Optimierungsmodell

Zur Verifizierung der Annahme, dass der Kapazitätsbedarf der Stationen S1 und S5 durch das Kapazitätsangebot eines einzelnen Mitarbeiters abgedeckt werden könnte, wurde das Modell der Montagelinie als Simulationsmodell mittels *OSim* erstellt. Jedem der manuellen Montagevorgänge wurde eine Arbeitsgruppe zugeordnet.

Im Ausgangsmodell besitzt keine der Stationen parallele Arbeitsplätze. Zur Optimierung wurde jeder der Stationen die Größe seines vorgelagerten Puffers sowie eine plausible Startbelegung der Puffer im Sinne der maximal und zu Simulationsbeginn in ihnen enthaltenen Anzahl von Arbeitsgegenständen zugewiesen. Damit ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Parameter:

Tabelle 2: Parameter der Arbeitsstationen des Anwendungsbeispiels

Arbeitsstation	par. Arbeitsplätze	Puffergröße	Startbelegung
Station 1	1	4	2
Station 2	1	1	1
Station 3	1	1	1
Station 4	1	1	1
Station 5	1	4	1

5.3 Optimierung

Wie bereits aus Abbildung 4 ersichtlich, wurde als Eingabewert für den Backtracking-Algorithmus von vier Mitarbeitern ausgegangen. Als Zykluslänge wurde die Taktzeit von 300 s verwendet. Als Zielkriterium des Algorithmus wurde die Minimierung der Durchlaufzeit angegeben. Zur Bewertung mittels Simulation wurde, um Einschwingeffekte geeignet berücksichtigen zu können, eine Simulationsdauer von einem Tag gewählt.

Wie erwartet findet der Backtracking-Algorithmus mit den vorgegebenen Eingabeparametern genau einen zulässigen Personaleinsatzgraphen. Zu Beginn wird jeder der Arbeitsgruppen 1, 2, 3 und 4 ein Mitarbeiter zugewiesen, Arbeitsgruppe 5 ist anfangs unbesetzt. Mit Hilfe des Verfahrens wird ermittelt, dass die Montagelinie

mit vier Mitarbeitern betrieben werden kann, wenn sich in einem 300 s dauernden Zyklus

- ein Mitarbeiter nach einmaliger Durchführung von Vorgang 1 von Arbeitsgruppe 1 zu Arbeitsgruppe 5 bewegt und
- ein Mitarbeiter nach einmaliger Durchführung von Vorgang 6 von Arbeitsgruppe 5 zu Arbeitsgruppe 1 bewegt.

Dies entspricht einem permanenten Wechsel eines Mitarbeiters zwischen den Stationen 1 und 5. Abbildung 5 zeigt den daraus entstehenden Personaleinsatzgraphen des Anwendungsbeispiels.

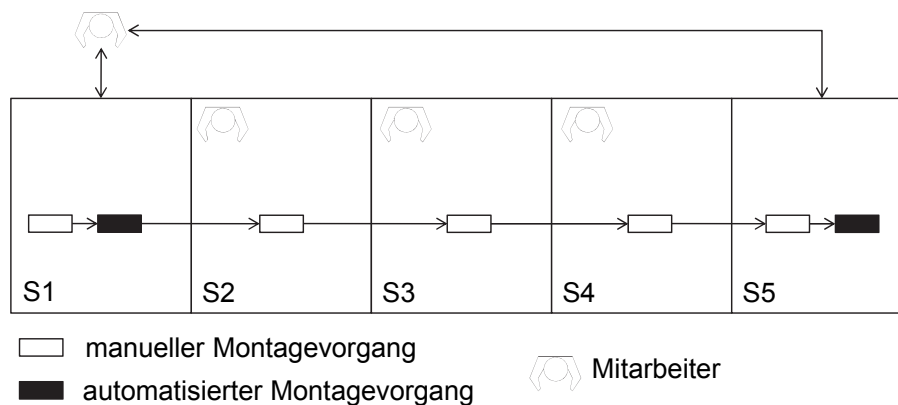


Abbildung 5: Personaleinsatzgraph des Anwendungsbeispiels

6 Fazit

Dieser Beitrag stellte ein erstes Konzept für einen Personaleinsatzgraphen vor. Mittels dieser Darstellungsweise ist es möglich, teilautonome Arbeitsgruppen, Mehrmaschinenbedienung sowie Springer in Model-Mix-Montagesystemen abzubilden. Dies wurde hier am Beispiel einer U-förmigen Montagelinie demonstriert. Mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus auf Basis des Backtracking-Verfahrens wurde gezeigt, wie sich optimale Personaleinsatzgraphen zu einer bestehenden Montagelinie und deren Kapazitätsgraphen bestimmen lassen.

Damit wurde veranschaulicht, dass eine getrennte Betrachtung der Kapazitäten von Betriebsmitteln und Mitarbeitern prinzipiell möglich ist und zu positiven Ergebnissen führen kann. Aufgrund des Mangels an realen Daten aus der Praxis konnten das Ausmaß der Effekte oder die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens allerdings noch nicht geeignet bewertet werden.

In weitergehenden Forschungsarbeiten sollte die Anwendbarkeit dieser Darstellungsweise in der Planung von Montagesystemen untersucht und falls nötig noch erweitert werden. Weiterhin erscheinen die Verifizierung und die Validierung des entwickelten Bewertungsverfahrens und des Backtracking-Algorithmus anhand praktischer Beispiele notwendig.

Literatur

- Braun, W. J.: Beitrag zur Festlegung der Arbeitsteilung in manuellen Montagesystemen. Karlsruhe: Univ., Diss., 1995. (Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 9)
- Bullinger, H.-J.: Systematische Montageplanung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1986.
- Dittmayer, S.: Arbeits- und Kapazitätsteilung in der Montage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. (IPA Forschung und Praxis, Band 55)
- Jonsson, U.: Ein integriertes Objektmodell zur durchlaufplanorientierten Simulation von Produktionssystemen. Aachen: Shaker, 2000. (Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 21)
- Lewis, T. G.: Network Science: Theory and Applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2009.
- Lotter, B.: Sicherung der Montage am Standort Deutschland. In: HYMOS Hybride Montagesysteme, Schlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt. Dortmund: Verlag der Gesellschaft für Arbeitsschutz- und Humanisierungsforschung, 1999, S. 11–18.
- Müller, R.: Planung hybrider Montagesysteme auf Basis mehrschichtiger Vorranggraphen. Aachen: Shaker, 2002. (Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 27)
- Müller, R., Schneck, M.: Dynamische Bewertung von Planungen für hybride Montagesysteme. In: Heel, J. and Krüger, J. (Hrsg.) Personalorientierte Simulation - Praxis und Entwicklungspotential. Aachen: Shaker 1999, S. 73-88. (Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 19)
- Prenting, T.; Battaglin, R. M.: The Precedence Diagram: A Tool for Analysis in Assembly Line Balancing. In: Journal of Industrial Engineering, New York, 15 (1964) 4, S. 209–213.
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation: Arbeitsgestaltung in der Produktion. München: Carl Hanser Verlag, 1. Aufl. 1991. (Methodenlehre der Betriebsorganisation)
- Seliger, G.; Neu, S.: Montagesysteme. In: Produktion und Management „Betriebshütte“, Teil 2. Hrsg.: Eversheim, W; Schuh, G. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1996, S. 10–35.
- Spath, D.; Baumeister, M.: Hybride Montagesysteme mit absatzsynchroner Materialbereitstellung. In: Industrie Management, Berlin, 16 (2002) 2, S. 35–38.
- Warnecke, H.-J., Dittmayer, S.: Planning of Division of Labor in the Assembly Environment. CIRP Annals - Manufacturing Technology 30 (1981) 1, S. 395-400.
- Zülch, G.; Leupold, M.; Gamber, T.: The Staff Assignment Graph – Planning, Evaluating and Improving Personnel Deployment in Assembly Systems. In: Advances in Production Management Systems (Revised Selected Papers). Hrsg.: Frick, J.; Laugen, B.. Heidelberg u.a.: Springer 2012, S. 157-164.