

WORKING PAPER SERIES



**OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG**

**FACULTY OF ECONOMICS
AND MANAGEMENT**

Impressum (§ 5 TMG)

Herausgeber:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Wirtschaftswissenschaft
Der Dekan

Verantwortlich für diese Ausgabe:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Wirtschaftswissenschaft
Postfach 4120
39016 Magdeburg
Germany

<http://www.fww.ovgu.de/femm>

Bezug über den Herausgeber
ISSN 1615-4274

Simultane Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanung in KMUs anhand eines Fallbeispiels aus der Druckereibranche

Karen Puttkammer^a, Rainer Kleber^b, Tobias Schulz^b, Karl Inderfurth^b

^a Lehrstuhl für Produktion und Logistik, Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, Technische Universität Braunschweig, Katharinenstraße 3, 38106 Braunschweig, k.puttkammer@tu-braunschweig.de

^b Lehrstuhl für Produktion und Logistik, Fakultät für Wirtschaftswissenschaft, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, rainer.kleber/tobias.schulz/karl.inderfurth@ovgu.de

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag zur Produktionslogistik wird die auftragsorientierte Fertigung von Druckaufträgen in der maschinellen Werkstattproduktion klein- und mittelständischer Unternehmen (KMU) am Fallbeispiel einer Akzidenzdruckerei betrachtet. Wesentliche Planungsaufgaben stellen dabei die Maschinenbelegungs- und die Personaleinsatzplanung mit der Qualifikation der Mitarbeiter als verbindendem Element dar. In der Literatur und der praktischen Anwendung werden die Teilprobleme weitgehend getrennt voneinander betrachtet und häufig sukzessive gelöst. Ein solches Vorgehen ist jedoch insbesondere in KMUs problematisch, da Interdependenzen zwischen den Teilproblemen nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt werden können. Solche liegen beispielsweise vor, wenn qualifiziertes Personal die Prozesse an den Maschinen durchgehend begleiten muss, dieses aber nur eingeschränkt zur Verfügung steht. In diesem Beitrag wird ein multikriterielles Optimierungsmodell für die Simultanplanung von Maschinenbelegung und Personaleinsatz vorgestellt. Der zu lösende Zielkonflikt entsteht dadurch, dass die Optimierung von Zeitzielen in der Maschinenbelegungsplanung, wie beispielsweise die Minimierung von Verspätungen, im Widerspruch zu einem die Kosten minimierenden kompakten Personaleinsatz steht. Durch die Formulierung des Modells kann maßgeblich zum Verständnis der Problemstruktur beigetragen werden.

1 Einleitung

In dem vorliegenden Beitrag zur operativen Produktionslogistik wird die auftragsorientierte Fertigung von Druckaufträgen in der maschinellen Werkstattproduktion am Fallbeispiel einer Akzidenzdruckerei betrachtet. Die einzelnen Arbeitsvorgänge werden unter Einsatz von Maschinen durch unterschiedlich qualifizierte Mitarbeiter gesteuert und ausgeführt. Wesentliche Planungsaufgaben stellen deshalb die Maschinenbelegungs- und die Personaleinsatzplanung dar. Dabei müssen nicht nur die einzelnen Arbeitsvorgänge terminiert und einer Maschine und mindestens einem Mitarbeiter zugewiesen werden, sondern es muss auch sichergestellt werden, dass der zugewiesene Mitarbeiter im benötigten Zeitraum verfügbar ist. Ablaufbedingte Wartezeiten der Mitarbeiter sind weitestgehend zu vermeiden.¹ Die Qualifikation der Mitarbeiter ist das verbindende Element zwischen dem Personaleinsatz und der Maschinenbelegung. Sie gibt an, ob Mitarbeiter und Maschinen gleichzeitig einem Vorgang zugeordnet werden dürfen.

In der Literatur und der praktischen Anwendung werden die Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanung weitgehend getrennt voneinander betrachtet und häufig sukzessive durchgeführt. Ein solches Vorgehen ist jedoch dann problematisch, wenn die Interaktion zwischen den beiden Teilproblemen groß ist. Dies ist bei klein- und mittelständischen Unternehmen in besonderem Maße der Fall, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass jederzeit Mitarbeiter mit der gerade benötigten Qualifikation verfügbar sind. Stehen nicht genug qualifizierte Mitarbeiter zur Verfügung, schränken insbesondere arbeitsrechtliche Regelungen den Mitarbeiterereinsatz und damit unmittelbar den Maschineneinsatz ein. Somit kann ein sukzessives Vorgehen zu unzulässigen Plänen führen, die manuelle Eingriffe durch den Planer erfordern und tendenziell schlecht in Bezug auf zeit- oder kostenbezogene Zielkriterien abschneiden. Aus Sicht des Anwendungsfalls zählen zu den Zielkriterien vor allem eine Minimierung der Verspätungen sowie der Personalkosten.

¹ Vgl. Günther und Tempelmeier (2009), S. 132.

In diesem Beitrag werden die beiden Teilprobleme simultan behandelt und es wird untersucht, welche Vorteile eine solche Vorgehensweise mit sich bringt. Insbesondere soll eine Entscheidungsunterstützung geleistet und auf diese Weise zur Optimierung der operativen Produktionslogistik beigetragen werden. Zu diesem Zweck wird ein mathematisches Modell erstellt, in welchem die grundlegenden Interaktionen zwischen den Teilproblemen korrekt abgebildet werden. Auf diese Weise können vorgegebene Pläne auf Zulässigkeit geprüft und bewertet werden.

Im Anschluss an eine Beschreibung der Prozesse und Herausforderungen eines Praxisfalls wird ein Literaturüberblick über relevante Ansätze zur Modellierung der Teilprobleme gegeben. Anschließend wird ein multikriterielles Optimierungsmodell für das integrierte Planungsproblem vorgestellt, welches das aus der Literatur bekannte Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP) unter Berücksichtigung zeitlicher Abstände zwischen den Vorgängen um Aspekte der Personaleinsatzplanung wie arbeitsrechtliche Regelungen erweitert. Schließlich soll anhand eines numerischen Beispiels ein Eindruck vom Potenzial des Modellansatzes gegeben werden.

2 Prozessbeschreibung und Herausforderungen im Praxisfall

Als Praxisanwendung dient dieser Arbeit ein Unternehmen der Druckereibranche, genauer gesagt aus dem Bereich des Akzidenzdrucks. Im Akzidenzdruck tätige Unternehmen erstellen auf Auftrag vielfältige Produkte für eine heterogene Gruppe von Kunden. Entwicklungen der letzten Jahre zeigen, dass der Kundenanspruch im Akzidenzdruck merklich gestiegen ist. Die Branche sieht sich vom Markt vorgegebenen, sinkenden Preisen gegenüber. Gleichzeitig werden kürzere Lieferzeiten gefordert. Apenberg und Partner (2010) sagen zudem eine langfristige Konsolidierung des Marktes für Druckereileistungen voraus. Es wird geschätzt, dass sich das Absatzpotenzial der deutschen Branche innerhalb der nächsten fünf Jahre um drei Milliarden Euro verringern wird und ca. 3500 Betriebe schließen oder fusionieren werden. In Anbetracht schwankender Auftragslagen gewinnt der Aspekt eines flexiblen Mitarbeiterereinsatzes als Wettbewerbsvorteil an Bedeutung. Gleichzeitig erhöht sich damit aber auch die Komplexität der Produktionsplanung.

Obwohl man die Erzeugnisse in verschiedenen Produktklassen wie Zeitschriften, Broschüren oder Flyer zusammenfassen kann, ist jeder Auftrag dennoch einzigartig bezüglich seiner Eigenschaften. Abgesehen von der Druckvorlage, also dem Motiv, unterscheiden sie sich unter anderem bezüglich der Auflage, des Druckverfahrens und der erforderlichen weiterverarbeitenden Schritte in der Buchbinderei. Somit hat jeder Auftrag einen unterschiedlichen Bedarf an personellen und maschinellen Ressourcen. Der Akzidenzdruck lässt sich demnach in die auftragsorientierte Einzelfertigung einordnen, in der sich der Produktionsprozess typischerweise aus mehreren Vorgängen zusammensetzt. In der Vorstufe werden die vom Kunden zur Verfügung gestellten Daten so bearbeitet, dass auf ihrer Grundlage Druckplatten hergestellt werden können. Nach der Belichtung der Platten schließt sich der Druckvorgang an, welcher mit mehreren unterschiedlichen Verfahren erfolgen kann. Es folgen je nach Kundenwunsch verschiedene weiterverarbeitende Prozesse in der Buchbinderei, wie z.B. Bindungen, Heftungen und der Endbeschnitt. Mit dem Verpacken der Ware endet die Auftragsbearbeitung im Unternehmen. Qualifikationseinschränkungen der Mitarbeiter spielen insofern eine Rolle, als beispielsweise die im Druckbereich tätigen Mitarbeiter jeweils nur ein Druckverfahren beherrschen.

Die Planungsaufgabe besteht zum einen darin, die Vorgänge an den Maschinen zu disponieren (Maschinenbelegung). Zum anderen soll jedem Vorgang mindestens ein Mitarbeiter zugeordnet werden (Personaleinsatz). Dies geschieht unter der Zielsetzung einer Minimierung der Lieferterminüberschreitungen der Aufträge, wobei längere Verspätungen überproportional zu berücksichtigen sind. Gleichzeitig sollen die Personalkosten möglichst gering gehalten werden. Neben der Qualifikation müssen noch weitere Restriktionen im Planungsprozess beachtet werden, wie die Reihenfolgebeziehungen zwischen den Vorgängen und die Kapazitätsrestriktionen der Maschinen und Mitarbeiter. Die Einschränkungen bezüglich des Mitarbeiterereinsatzes sind vielfältig und ergeben sich u.a. aus den Bestimmungen des Arbeitszeitgesetzes (ArbZG) und aus den branchenspezifischen Tarifverträgen. Im Anhang sind wesentliche relevante Vorschriften zusammenfassend dargestellt.

Derzeit erfolgt die Planung noch manuell auf Basis von Erfahrungswissen in zwei Planungsschritten. In einem ersten Schritt wird die Auftragsreihenfolge an jeder

Maschine festgelegt, sodass Liefertermine möglichst eingehalten und lange Rüstzeiten vermieden werden. Zur Planung der Auftragsreihenfolge wird eine elektronische Plantafel genutzt, die jedoch keine Entscheidungsunterstützung leistet. In einem zweiten Schritt wird nun entschieden, welcher Mitarbeiter in welcher Schicht arbeiten soll. Es wird allerdings nicht explizit festgelegt, welche Vorgänge durch welchen Mitarbeiter bearbeitet werden. Problematisch bei dieser sequentiellen Vorgehensweise ist, dass die eingeschränkte Mitarbeiterverfügbarkeit im ersten Schritt vernachlässigt wird und im zweiten Schritt ein unzulässiger Plan erzeugt werden kann. Das führt dazu, dass zugesagte Liefertermine häufig nicht eingehalten werden können. In der Praxis wird dem Problem begegnet, indem z.B. die Schichten nicht vollständig mit Fertigungsvorgängen verplant werden. Zudem wird der Plan bis zu drei Mal täglich aktualisiert. Dabei wird der aktuelle Bearbeitungsstand berücksichtigt. Es ist jedoch festzuhalten, dass der entsprechende Planer viel Erfahrung benötigt, um alle relevanten Restriktionen zu berücksichtigen, und eine befriedigende Zielerreichung nicht gewährleistet ist. Wünschenswert wäre es, die Planung mithilfe modellbasierter Entscheidungsunterstützungssysteme zu vereinfachen, um unabhängiger von der Person des Planers zu werden.

3 Literaturüberblick

Im folgenden Abschnitt soll ein Überblick über relevante Ansätze zur Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanung gegeben werden.

3.1 Relevante Ansätze der Maschinenbelegungsplanung

Im Rahmen der Maschinenbelegungsplanung werden Vorgänge den einzelnen Arbeitssystemen zugeteilt und die Reihenfolge der Bearbeitung festgelegt.² Dabei müssen Reihenfolgebeziehungen und die Kapazitätsbeschränkungen der Ressourcen eingehalten werden. Die Maschinenbelegungsplanung kann als ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem formuliert werden.³ Eine solche Formulierung ermöglicht die Berücksichtigung verschiedener beschränkt verfügbarer Ressourcen,

² Vgl. Domschke u. a. (1997), S. 16.

³ Vgl. Brucker u. a. (1999), S. 5, Heilmann (2000), S. 1.

wie Maschinen und Arbeitskräfte. Unterscheidet man dabei zwischen verschiedenen Ausführungsmodi, d.h. unterschiedlichen Kombinationen von Vorgangszeit und Ressourcenbeanspruchung, spricht man auch von einem Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP). Die Lösung des MRCPSP besteht aus der Festlegung von Start- oder Endzeitpunkten und der Auswahl eines Ausführungsmodus für jeden Vorgang. Eine erste Modellformulierung findet sich in Talbot (1982).

Neben der Minimierung der Projektdauer gibt es noch eine Anzahl weiterer Zielsetzungen, die im Rahmen der Projektplanung relevant sein können. Hartmann und Briskorn (2010) sowie Weglarz u.a. (2011) geben einen Überblick über die in der Literatur verwandten Kriterien.⁴ Zu den zeitorientierten Zielen gehört die Minimierung der durchschnittlichen Durchlaufzeit und die Minimierung der Summe der Verspätungen. Zu den monetären Zielsetzungen zählen beispielsweise die Maximierung des Gesamtkapitalwertes oder die Maximierung der projektbezogenen Cashflows. Zudem können sich Zielsetzungen auf die Ressourcen und die damit verbundenen Kosten beziehen. Bei dem sog. Ressourceninvestitionsproblem werden die Kosten der Ressourcenbereitstellung unter Berücksichtigung eines vorgegebenen Projektendes minimiert.⁵ Verschiedene Formulierungen von Zielfunktionen, die eine gleichmäßige Auslastung der Ressourcen verfolgen, sind in Neumann und Zimmermann (1999) zu finden.⁶

Es gibt verschiedenste Erweiterungen des MRCPSP⁷, von denen im Folgenden die für unseren Modellansatz relevanten erläutert werden. Die Annahme, dass von den Ressourcen in jeder Periode die gleiche Kapazität zur Verfügung steht, ist insbesondere bei Berücksichtigung personeller Ressourcen sehr restriktiv. Verschiedene Schichtpläne, sowie Urlaubs- oder Weiterbildungstage sind dafür die Ursache. Eine entsprechende Verallgemeinerung wird von Sprecher (1994)

⁴ Vgl. Hartmann und Briskorn (2010), S. 6ff, Weglarz u. a. (2011), S. 196f.

⁵ Vgl. Drexl und Kimms (2001), S. 340f.

⁶ Vgl. Neumann und Zimmermann (1999), S. 594f.

⁷ Vgl. Hartmann und Briskorn (2010), Weglarz u. a. (2011)

vorgeschlagen.⁸ In Druckereibetrieben sind häufig zeitliche Abstände zwischen der Beendigung des einen und dem Beginn des Folgevorgangs einzuhalten. Minimale Abstände kommen beispielsweise in Form von Trocken- oder Ruhezeiten vor. Maximale Abstände sind in der Industrie dann zu finden, wenn z.B. Materialien in einem bestimmten Zustand weiter verarbeitet werden müssen. Das Problem unter Berücksichtigung allgemeiner zeitlicher Abstände wird als MRCPSP/max bezeichnet.⁹ Schließlich schränken Rahmenbedingungen die Verfügbarkeit von Arbeitskräften in Zeiträumen wie einer Schicht, einem Tag oder einer Woche ein. Im Rahmen der Projektplanung können diese in Form von partiell erneuerbaren Ressourcen modelliert werden.¹⁰

Bezüglich seiner Lösungskomplexität gehört das MRCPSP zu der Klasse NP-schwerer Probleme. Die Aufgabe, eine zulässige Lösung zu finden, stellt bei mindestens zwei erneuerbaren Ressourcen bereits ein NP-vollständiges Problem dar.¹¹ Neuere Untersuchungen zeigen, dass mit vertretbarem Aufwand Probleme mit einer Größe von bis zu 20 Vorgängen optimal gelöst werden können. Für größere, praxisnahe Probleme existiert jedoch kein Algorithmus, der das Auffinden einer optimalen Lösung mit vertretbarem Aufwand gewährleistet.¹²

3.2 Relevante Ansätze der Personaleinsatzplanung

Die Personaleinsatzplanung kann allgemein als Zuordnung von Arbeitskräften zu Allokationsobjekten beschrieben werden. Arbeitskräfte können Einzelpersonen oder Gruppen bzw. Kategorien von Arbeitskräften sein. Demnach wird entweder von individueller oder kollektiver Personalplanung gesprochen.¹³ Allokationsobjekte sind z.B. Abteilungen, Stellen, Dienstzeiten oder einzelne Tätigkeiten. Ziel der Personaleinsatzplanung ist es, einen bestehenden Personalbedarf durch den entsprechenden Personaleinsatz zu decken. Dabei muss sowohl die quantitative als

⁸ Vgl. Sprecher (1994), S. 3.

⁹ Vgl. Sprecher (1994), S. 19ff, Weglarz u. a. (2011), S. 195.

¹⁰ Vgl. Böttcher u. a. (1999), S. 543ff.

¹¹ Vgl. Elloumi und Fortemps (2010), S. 32.

¹² Vgl. Weglarz u. a. (2011), S. 189.

¹³ Vgl. Schroll (2007), S. 1.

auch die qualitative Dimension der Personaleinsatzplanung beachtet werden. Während die quantitative Dimension die Anzahl der zur Deckung des Personalbedarfs eingesetzten Arbeitskräfte anspricht, fordert die qualitative Dimension, dass nur hinreichend qualifiziertes Personal eingesetzt wird.¹⁴ In den wenigsten Fällen ist es möglich, eine exakte Personalbedarfsdeckung zu erreichen. Daher wird häufig auf die Zielsetzung, die Personalbedarfsüberdeckung und -unterdeckung zu minimieren, ausgewichen. Oft wird die Personalbedarfsdeckung aber auch als Satisfizierungsziel modelliert. Eine Deckung des Personalbedarfs ist damit Voraussetzung für eine zulässige Lösung. Optimiert werden dann z.B. die Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter, die Anzahl der Einsatzstunden oder die Personalkosten.¹⁵

Für die hier betrachtete Problemstellung kann die Personaleinsatzplanung durch den Begriff der Dienstplanung konkretisiert werden. Sie wird als Personalplanung beschrieben, „die eine Zuordnung von Mitarbeitern zu Tätigkeiten unter Berücksichtigung von Zuordnungsbeschränkungen vornimmt sowie simultan Tätigkeiten unter Beachtung von Terminrestriktionen, Reihenfolgebeziehungen, Wegzeiten und Verfügbarkeiten von Arbeitskräften im Planungszeitraum (bzw. Teilen des Planungszeitraums) terminiert“.¹⁶ Während bei der Personaleinsatzplanung die Zuordnung von Arbeitskräften zu Objekten betrachtet wird, rückt hier der temporale Aspekt zusätzlich in den Vordergrund. Das Aufgabenfeld der Dienstplanung wird in der englischsprachigen Literatur weiter unterteilt in das Days-off Problem, das Shift Scheduling und das Tour Scheduling. Das Days-off Problem betrachtet die Verteilung von arbeitsfreien Tagen und Arbeitstagen innerhalb der Woche, sodass der tägliche Mitarbeiterbedarf gedeckt wird.¹⁷ Der Planungshorizont kann sich über mehrere Wochen erstrecken. Beim Shift Scheduling werden die Mitarbeiter in verschiedene Schichten oder Dienste innerhalb eines Tages eingeteilt. Dabei soll der stündliche Personalbedarf gedeckt werden.¹⁸ Das Tour Scheduling kombiniert schließlich das

¹⁴ Vgl. Spengler (2004), S. 1470ff.

¹⁵ Vgl. Schroll (2007), S. 11.

¹⁶ Salewski (1997), S. 120.

¹⁷ Vgl. Emmons und Burns (1991), Pinedo (2009), S. 318ff.

¹⁸ Vgl. Bechtold und Jacobs (1990), Pinedo (2009), S. 325ff.

Days-off und Shift Scheduling. Der damit generierte Einsatzplan enthält sowohl die arbeitsfreien Tage einer Woche als auch die Schichteinteilung an den Arbeitstagen.¹⁹

Je nachdem, welche konkrete Problemstellung abgebildet wird und welche Erweiterungen berücksichtigt werden, finden sich zahlreiche Modellformulierungen. Der Großteil geht auf eine grundlegende Problemformulierung von Dantzig (1954) zurück. Es ist zu beachten, dass hier von einer homogenen Belegschaft bzw. nur einer Arbeitskräftekategorie ausgegangen wird. Bei Berücksichtigung aller Aspekte, die in der Dienstplanung betrachtet werden, lassen sich viele Parallelen zur Projektplanung erkennen. Besonders Reihenfolgebeziehungen, Terminrestriktionen oder minimale zeitliche Abstände in Form von Wegzeiten finden sich bei Dienstplanungsproblemen wieder. Aus diesem Grund können Dienstplanungsprobleme auch als ressourcenbeschränkte Projektplanungsprobleme formuliert werden.²⁰

Die meisten Dienstplanungsprobleme gehören zur Klasse NP-schwerer Probleme.²¹ Die Komplexität der Problemstellung wird beeinflusst durch den Planungshorizont, die Anzahl der Arbeitskräfte und ihrer verschiedenen Kategorien. Ernst u.a. (2004) geben einen Überblick über gängige Lösungsverfahren.²²

Das Konzept unterschiedlicher Mitarbeiterqualifikation wird im Rahmen von Multi Skill Project Scheduling Problemen (MSPSP) behandelt. Hierbei werden Projekte betrachtet, die in erster Linie vom Mitarbeiterereinsatz abhängig sind. Andere Ressourcen spielen keine Rolle, weil sie entweder unbegrenzt verfügbar oder leicht und kostengünstig zu beschaffen sind. In der Literatur wird meistens die Softwareentwicklung als Beispiel herangezogen.²³

Bei den obigen Modellansätzen wird der Einsatz personeller Ressourcen jedoch nur vereinfacht dargestellt, da weder Pausen noch die Möglichkeit von Überstunden berücksichtigt werden. Zum anderen ist die Vernachlässigung anderer Ressourcengruppen problematisch. Insgesamt ist zu konstatieren, dass eine auf den

¹⁹ Vgl. Brusco und Jacobs (2001), Jarrah u. a. (1994).

²⁰ Vgl. Salewski u. a. (1997), S. 88.

²¹ Vgl. Cai und Li (2000), S. 360, Pinedo (2009), S. 216.

²² Vgl. Ernst u. a. (2004), S. 16ff.

²³ Vgl. Bellenguez-Morineau (2008), S. 85f.

Praxisfall anwendbare Modellformulierung für die Maschinenbelegung und den Personaleinsatz, die außerdem alle spezifischen Restriktionen der Humanressourcen berücksichtigt, aus der Literatur bisher nicht bekannt ist.

4 Ein integriertes Planungsmodell

An dieser Stelle soll eine Erweiterung des MRCPSP zur simultanen Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanung für die auftragsorientierte Einzelfertigung unter Berücksichtigung von Schichtenteilungen vorgestellt werden. Zunächst werden Grundannahmen und Symbole erläutert.

Grundsätzlich müssen die Besonderheiten der personellen und maschinellen Ressourcenarten berücksichtigt werden. Dabei beschreibt der Index r eine bestimmte Ressource aus einer der beiden Mengen der Humanressourcen R^H bzw. der maschinellen Ressourcen R^M . Der gesamte Planungshorizont T (etwa mehrere Tage oder Wochen) wird in einzelne Teilperioden t (Minuten bis Stunden) unterteilt. Wie in der Praxis üblich, werden die Mitarbeiter dabei anhand von Schichten eingeplant, wobei eine Schicht s eine bestimmte Anzahl an Teilperioden umfasst. Abbildung 1 verdeutlicht dieses Vorgehen, in welchem angelehnt an den Praxisfall jede der 3 achtstündigen Schichten eines Tages in 32 Perioden à 15 Minuten unterteilt wird.

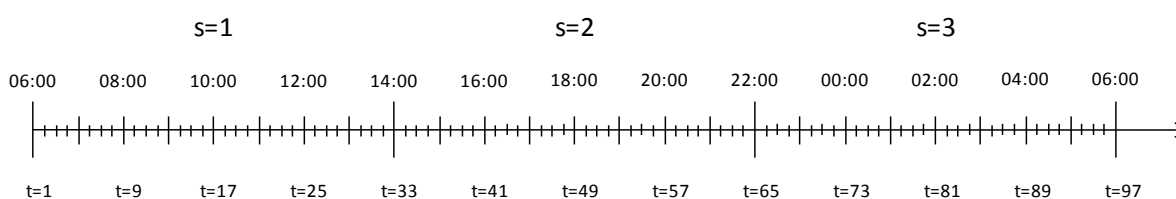


Abbildung 1: Unterteilung des Planungshorizonts in Schichten und Teilperioden

Der Arbeitsbeginn jedes Mitarbeiters erfolgt zu Beginn einer Schicht, deren Beginn nachfolgend mit ST_s bezeichnet wird. Da in der obigen Abbildung die zweite Schicht in Periode 33 beginnt, wäre ST_2 beispielsweise gleich 33. Obwohl der Planer festsetzt, dass ein Mitarbeiter seine Arbeit zum Schichtbeginn aufnehmen soll, verlangt er

allerdings größtmögliche Flexibilität bei der Festlegung des entsprechenden Arbeitsendes. Diese Forderung wird mithilfe sogenannter Schichtmodelle realisiert. Jedes Schichtmodell ω (mit $\omega \in \Omega$) enthält dabei folgende Informationen: die Anwesenheitsdauer des Mitarbeiters A_ω sowie die gesetzlich vorgeschriebene Pausenzeit, aus der sich die maximale nutzbare Arbeitszeit eines Mitarbeiters in diesem Schichtmodell Z_ω^{\max} ergibt. Des Weiteren benötigt der Planer die entstehenden Personalkosten $c_{r\omega}$, die abhängig vom Mitarbeiter r und der entsprechenden Schicht s sind (z.B. durch einen Nachtarbeitszuschlag in der dritten Schicht). Beispielsweise könnte ein Schichtmodell eine Anwesenheitszeit von 10 Stunden (40 Perioden) verlangen, wobei dem Mitarbeiter 45 Minuten Pausenzeit zusteht (3 Perioden). Würde die Planung einen Mitarbeiter nach diesem Schichtmodell in $s=1$ einplanen, stünde seine Arbeitskraft also in 37 Perioden zwischen 6 und 16 Uhr zur Verfügung. Dabei ist es durchaus möglich und erwünscht, dass sich Schichten überlappen und ein Mitarbeiter in einer Schicht beginnt, aber auch noch zu Beginn der nachfolgenden Schicht verfügbar ist. Dies muss allerdings durch entsprechende Überstundenkosten im Personalkostensatz $c_{r\omega}$ berücksichtigt werden. Aufgrund arbeitsrechtlicher Regelungen darf die Gesamtarbeitszeit eines Mitarbeiters im Planungshorizont die festgelegte Höchstgrenze W_r^{\max} nicht überschreiten. Darüber wird z.B. gewährleistet, dass Überstunden mittelfristig ausgeglichen werden. Genauso ist es möglich, eine Mindestarbeitszeit W_r^{\min} für jeden Mitarbeiter zu fixieren.

Die verfügbaren Ressourcen sollen mithilfe des hier beschriebenen Simultanplanungsansatzes möglichst effizient zur Erfüllung der Kundenaufträge eingesetzt werden. Jeder ankommende Kundenauftrag wird dabei zunächst wie bei der Projektplanung in verschiedene Vorgänge unterteilt, die nacheinander abgearbeitet werden. Die einzelnen Vorgänge erhalten in diesem Modellrahmen den Index j (mit $j=0, \dots, J$), der fortlaufend alle Vorgänge über alle Kundenaufträge nummeriert. Dabei entspricht der Vorgang $j=0$ einer Dummyquelle für alle nachfolgenden Vorgänge. Durch die fortlaufende Nummerierung ist es allerdings nicht mehr möglich zu erkennen, ob ein Vorgang einen Kundenauftrag abschließt. Aus diesem Grund wird ein binärer Parameter β_j eingeführt, der nur dann eins ist, wenn j der letzte Vorgang eines Auftrags ist. Da nur die letzten Vorgänge der Aufträge aus Kundensicht relevant

sind, wird auch nur für diese jeweils ein Fertigstellungs- bzw. Liefertermin D_j definiert.

Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Vorgängen i und j kann es zu ablaufbedingten Mindestwartezeiten kommen, die durch q_{ij}^{\min} dargestellt werden. Dabei beschreibt der Index i stets einen direkten Vorgänger des Vorgangs j , wobei diese Informationen auch in den Vorgängermengen P_j zusammengefasst sind. Das Modell verzichtet auf eine Definition von zeitlichen Maximalabständen, da sie für die Abbildung des Praxisfalls nicht relevant sind.

Zur korrekten Berücksichtigung der Mitarbeiterqualifikation verknüpfen Ausführungsmodi die Produktionsfaktoren Mitarbeiter und Maschine.²⁴ Dabei wird vorgangsbezogen für jede zulässige Zuordnung von Mitarbeitern und Maschinen ein eigener Modus mit dem Index $m=1, \dots, M_j$ definiert. Die Bearbeitungszeit jedes Vorgangs hängt vom gewählten Modus ab und wird nachfolgend mit p_{jm} bezeichnet. Zudem nimmt jeder Vorgang j auch abhängig vom gewählten Modus eine bestimmte Kapazität der Ressource r in Anspruch. Dieser Zusammenhang wird mithilfe des Parameters k_{jmr} wiedergegeben. Zur Abarbeitung eintreffender Kundenaufträge besitzt dabei jede Maschine r in jeder Periode K_{rt} Kapazitätseinheiten.

Zielsetzung der simultanen Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanung ist es, die ankommenden Kundenaufträge möglichst termingerecht zu bearbeiten. Dazu ist es notwendig, für jeden Bearbeitungsschritt neben dem gewünschten Endtermin auch den Bearbeitungsmodus festzulegen, der die relevanten Informationen bezüglich der einzusetzenden Ressourcen enthält. Die binäre Entscheidungsvariable x_{jmt} repräsentiert diese Entscheidung im folgenden Optimierungsmodell, indem sie festlegt, ob ein Vorgang j mit dem Bearbeitungsmodus m in Periode t fertiggestellt wird. Aufgrund der simultanen Betrachtungsweise konzentriert sich die Entscheidungsfindung aber nicht nur auf die möglichst termingerechte Einplanung der einzelnen Vorgänge, sondern versucht auch, die anfallenden Personalkosten korrekt zu berücksichtigen und möglichst gering zu halten. Zu diesem Zweck werden perioden- und schichtbezogene Entscheidungsvariablen zur Einplanung der Mitarbeiter in dem Modell eingeführt.

²⁴ Steinrücke (2007), S. 22.

Mithilfe der schichtbezogenen Binärvariable $a_{r\omega}$ wird beschrieben, ob ein Mitarbeiter r in Schicht s im Schichtmodell ω eingesetzt wird. Da dem Mitarbeiter aus arbeitsrechtlichen Gründen auch Pausen zustehen, kann er zumeist nicht während der gesamten Schicht produktive Tätigkeiten verrichten. Aus diesem Grund beschreibt die periodenbezogene Binärvariable z_{rt} ob Mitarbeiter r für eine Tätigkeit ($z_{rt}=1$) oder eine Pause ($z_{rt}=0$) in Periode t eingeplant wird.

Das Modell kann demnach wie folgt aufgestellt werden:

$$\min \alpha \cdot \left(\frac{L - L^{\text{opt}}}{L^{\text{opt}}} \right) + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{C - C^{\text{opt}}}{C^{\text{opt}}} \right) \quad (1)$$

$$\text{mit } L = \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot \left[\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=D_j+1}^T (t - D_j)^2 \cdot x_{jmt} \right] \quad \text{und} \quad C = \sum_{s=1}^S \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{r \in R^H} c_{r\omega} \cdot a_{r\omega}$$

u.d.N.:

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=1}^T x_{jmt} = 1 \quad \forall j = 0, \dots, J \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=1}^T t \cdot x_{jmt} + q_{ij}^{\min} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=1}^T (t - p_{jm}) \cdot x_{jmt} \quad \forall j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{\tau=t}^{\min\{t+p_{jm}-1; T\}} x_{jm\tau} \leq K_{rt} \quad \forall r \in R^M; t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} a_{r\omega} \leq 1 \quad \forall r \in R^H; s = 1, \dots, S \quad (5)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} a_{r,s-2,\omega} + \sum_{\omega \in \Omega} a_{r,s-1,\omega} + \sum_{\omega \in \Omega} a_{r,s,\omega} \leq 1 \quad \forall r \in R^H; s = 1, \dots, S \quad (6)$$

$$\sum_{\tau=s-18}^s \sum_{\omega \in \Omega} a_{r\tau\omega} \leq 5 \quad \forall r \in R^H; s = 1, \dots, S \quad (7)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} a_{r\omega} = 0 \quad \forall r \in R^H; s \in S_{\text{Sun}} \quad (8)$$

$$a_{r\omega} = \bar{a}_{r\omega} \quad \forall r \in R^H; s = -17, \dots, 0; \omega = 1, \dots, \Omega \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{\tau=t}^{\min\{t+p_{jm}-1; T\}} x_{jm\tau} = z_{rt} \quad \forall r \in R^H; t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$z_{r,32,(s-1)+\tau} \leq \sum_{\omega \in \Omega} b_{\tau+32,\omega} \cdot a_{r,s-1,\omega} + \sum_{\omega \in \Omega} b_{\tau\omega} \cdot a_{r\omega} \quad \forall r \in R^H; s = 1, \dots, S; \tau = 1, \dots, 32 \quad (11)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+25} z_{r\tau} \leq 24 \quad \forall r \in R^H; t = 1, \dots, T-25 \quad (12)$$

$$\sum_{t=ST_s}^{\min\{ST_s + A_{\omega} - 1; T\}} z_{rt} \leq Z_{\omega}^{\max} \quad \forall r \in R^H; s = 1, \dots, S; \omega \in \Omega \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^T z_{rt} \leq W_r^{\max} \quad \text{und} \quad \sum_{t=1}^T z_{rt} \geq W_r^{\min} \quad \forall r \in R^H \quad (14)$$

$$a_{r\omega} \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R^H; s = 1, \dots, S; \omega \in \Omega \quad (15)$$

$$x_{jmt} \in \{0, 1\} \quad \forall j = 0, \dots, J+1; t = 1, \dots, T; m = 1, \dots, M_j \quad (16)$$

$$z_{rt} \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R^H; t = 1, \dots, T \quad (17)$$

Im Rahmen einer multikriteriellen Optimierung lässt sich die Zielfunktion auf verschiedene Weise modellieren.²⁵ Eine Möglichkeit der Modellierung ist, die relative Abweichung der beiden Zielkriterien (Summe der quadrierten Verspätungen L sowie Personalkosten C) von ihrem jeweiligen Optimum (L^{opt} und C^{opt}) zu messen und mit dem Faktor α bzw. $(1-\alpha)$ zu gewichten. Die entsprechenden Optimalwerte L^{opt} und C^{opt} werden dabei in einem vorgelagerten Schritt. Im Term L wird die Summe der Quadratverspätungen über alle Aufträge zusammengefasst, wobei längere Verspätungen überproportional berücksichtigt werden. Darin bezeichnet $\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=D_j+1}^T (t-D_j) \cdot x_{jmt}$ die Verspätung eines Vorgangs j , die sich aus der Differenz zwischen dem Fertigstellungszeitpunkt des jeweiligen Vorgangs und seinem Fälligkeitstermin D_j ergibt. Dadurch, dass die Differenz nur über die Perioden nach dem Fälligkeitstermin aufaddiert wird, werden nur positive Verspätungen berücksichtigt. Eine verfrühte Fertigstellung eines Auftrags spielt dagegen keine Rolle. Da nur die Verspätung des gesamten Kundenauftrags entscheidungsrelevant ist, wird der oben angegebene Verspätungsterm mit dem Faktor β_j multipliziert, der nur für die letzten Vorgänge eines Kundenauftrags gleich eins ist. Analog zur Definition des

²⁵ Collette und Siarry (2003).

Verspätungskriteriums lassen sich die Personalkosten definieren, bei denen die Kosten aller Mitarbeiter im Schichteinsatz aufsummiert werden.

Die Nebenbedingungen (2) bis (4) entsprechen den Standardnebenbedingungen des MRCPSP bei Berücksichtigung von zeitlichen Mindestabständen zwischen den Vorgängen. Gleichung (2) fordert zum Beispiel, dass jeder Vorgang genau einmal in einem Modus eingeplant werden muss. Die Reihenfolgebedingung (3) beinhaltet die Berücksichtigung minimaler zeitlicher Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Vorgängen i und j , während Restriktion (4) die Kapazitätsrestriktion der maschinellen Ressourcen wiedergibt. Aufgrund der separaten Betrachtung jeder maschinellen Ressource werden die kapazitätsbezogenen Daten so aufgearbeitet, dass $k_{jmr} \in \{0;1\}$ und $K_{rt} \in \{0;1\}$ für alle j, m, r und t gilt.

Die nachfolgenden Bedingungen (5) bis (14) betreffen den Mitarbeiterereinsatz und damit die Personalplanung. Grundlegend beschreiben diese Restriktionen eine Erweiterung des Modells von Dantzig (1954), in das zusätzlich komplexe Schichtmuster, eine individuelle Betrachtung des Personals unter Berücksichtigung arbeitsrechtlicher Vorgaben sowie der zeitabhängige Ressourcenbedarf eingefügt werden. Gemäß (5) darf ein Mitarbeiter höchstens in einem Schichtmodell pro Schicht eingeteilt werden. Zudem verlangt Restriktion (6), dass eine Arbeitskraft in drei aufeinander folgenden Schichten maximal einmal eingeplant wird. In dem zuvor beschriebenen Modellkontext bedeutet dies, dass ein Mitarbeiter nicht mehr als eine Schicht pro Tag arbeitet. Restriktion (7) beschreibt, dass eine Person an maximal fünf Tagen in der Woche arbeiten darf. Ebenso wird in der darauffolgenden Nebenbedingung (8) eingeschränkt, dass kein Mitarbeiter in einer Sonntagsschicht S_{sun} eingeteilt werden darf, wodurch am Sonntag auch kein Vorgang bearbeitet werden kann. Mitarbeiterereinsätze vor Beginn des Planungshorizontes \bar{a}_{rso} werden mit Hilfe von Restriktion (9) berücksichtigt.

Gleichung (10) definiert die Arbeitsvariable z_{rt} . Eine Person arbeitet immer dann, wenn sich ein Vorgang j in der Bearbeitung befindet, dessen Modus den Einsatz der betreffenden Person vorsieht. Restriktion (11) sagt aus, dass ein Mitarbeiter in einer Periode t nur arbeiten kann, wenn er aufgrund der Schichtplanung auch anwesend ist.

Der Parameter $b_{t\omega}$ nimmt den Wert eins an, wenn Periode t eine Anwesenheitsperiode nach Schichtmodell ω ist. Ist der Mitarbeiter in dieses Schichtmodell eingeteilt, steht seine Kapazität in der entsprechenden Periode zur Verfügung. Generell kann eine Arbeitskraft aus zwei Gründen in Schicht s anwesend sein. Zum einen könnte der Mitarbeiter in Schicht s eingeteilt sein. Zum anderen könnte die Arbeitskraft aber auch in der vorhergehenden Schicht $s-1$ in ein Schichtmodell eingeplant worden sein, das Überstunden vorsieht, die zu Beginn von s abgearbeitet werden können.

Bedingung (12) fordert, dass eine Arbeitskraft innerhalb von 26 Perioden maximal 24 Perioden arbeitet. Mit dieser Restriktion wird §4 Satz 3 des ArbZG eingehalten, der besagt, dass eine Person höchstens sechs Stunden am Stück arbeiten darf und dann mindestens eine halbe Stunde Pause folgen muss. Ungleichung (13) verlangt, dass die maximale Arbeitszeit innerhalb eines Schichtmodells Z_{ω}^{\max} nicht überschritten werden darf. Dazu wird die Arbeitsvariable z_{rt} vom Anfang der Schicht ST_s über die Gesamtanwesenheitszeit des Schichtmodells A_{ω} aufsummiert. Wird die Definition der Arbeitszeitvariablen z_{rt} aus Gleichung (10) in (13) eingesetzt, ist zu erkennen, dass für das Personal das Prinzip der partiell erneuerbaren Ressourcen greift. Die Kapazität der Mitarbeiter ist innerhalb einer Teilmenge an Perioden, welche hier über das Schichtmodell und die Pausenzeiten definiert wird, begrenzt.

Die Nebenbedingung (14) beschreibt schließlich, dass die minimalen und maximalen Arbeitszeiten W_r^{\min} und W_r^{\max} , die sich aus einer zuvor durchgeführten mittelfristigen Personalplanung ergeben, für jeden Mitarbeiter eingehalten werden. (15) bis (17) geben abschließend die Binärbedingungen wieder.

Mithilfe dieses Optimierungsproblems gelingt es, die Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanung simultan mit einem Standardsolver zu optimieren. Dabei muss allerdings erwähnt werden, dass je nach gewünschtem Detaillierungsgrad eine sehr große Anzahl an Binärvariablen den Lösungsprozess erschwert. Im folgenden Abschnitt soll für ein kleines Beispiel gezeigt werden, welche Verbesserung der Optimierungsansatz zur simultanen Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanung gegenüber einer sequentiellen Planung generieren kann.

5 Numerisches Beispiel

Um zu zeigen, wie sich die Ergebnisse der simultanen Planung von denen einer sukzessiven Vorgehensweise unterscheiden, soll an dieser Stelle ein numerisches Beispiel gelöst werden. Da kein Beispiel in praxisrelevanter Größenordnung in angemessener Rechenzeit gelöst werden kann, beschränkt sich dieser Abschnitt auf ein kleines, in Abstimmung mit dem Praxispartner konstruiertes Beispiel mit den folgenden Daten.

Innerhalb von 3 Tagen (mit 9 Schichten à 32 Perioden) sollen 5 Aufträge mit vorgegebenem Liefertermin bearbeitet werden, die jeweils zwei bis drei Vorgänge umfassen. Es sind insgesamt 13 Vorgänge zu planen. Zur Bearbeitung stehen drei Maschinen zur Verfügung, wobei zwei identische Maschinen vom Maschinentyp A (A/1 und A/2) sowie eine Maschine vom Maschinentyp B vorhanden sind. An jeder Maschine vom Typ A können bis zu zwei Arbeitskräfte gleichzeitig eingesetzt werden, wodurch sich die Bearbeitungszeit verringert. An Maschinentyp B kann hingegen immer nur eine Person arbeiten. Der Mitarbeiterpool besteht aus drei Arbeitskräften, die in den jeweiligen Schichten eingesetzt werden können. Die anfallenden Personalkosten variieren dabei zwischen den Mitarbeitern, die einen unterschiedlichen Stundenlohn erhalten, und den Schichten (früh/spät/nachts). Je nach Qualifikation kann ein Mitarbeiter jeweils einen oder beide Maschinentypen bedienen. Aus der Qualifikation und der Anzahl der an den Maschinen einsetzbaren Arbeitskräfte ergeben je Vorgang maximal sechs Ausführungsmodi. Details zu den verwendeten Beispieldaten der Mitarbeiter und Kundenaufträge können Anhang B entnommen werden.

Mithilfe des im vorigen Abschnitt vorgestellten Optimierungsmodells können die Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanung optimal aufeinander abgestimmt werden. Mit der Festlegung des Parameters α fließen die Präferenzen des Entscheiders in das Entscheidungskalkül ein. Durch unterschiedliche α -Werte erhält man demzufolge verschiedene Lösungen, die zusammen den effizienten Rand der Lösungsmenge bilden. In Abbildung 2 sind die effizienten Lösungspunkte des Beispiels dargestellt. Darin abgetragen ist die Summe der Verspätungen gegenüber den Personalkosten, wobei vier effiziente Punkte ermittelt werden konnten. Die

Koordinaten der Punkte sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Um zu den abgebildeten Ergebnissen zu gelangen, wurde das Problem in ILOG OPL Studio 6.3 implementiert und auf einem PC mit zwei Intel Xeon Prozessoren E5420 (je 4 x 2,5 GHz) mit verschiedenen α -Werten gelöst. Die Rechenzeit variierte in Abhängigkeit von dem gewählten α zwischen 4:33 Minuten und 35:10 Minuten, wobei eine Regelmäßigkeit bzw. ein Zusammenhang zwischen dem α -Wert und der Rechenzeit nicht zu erkennen war.

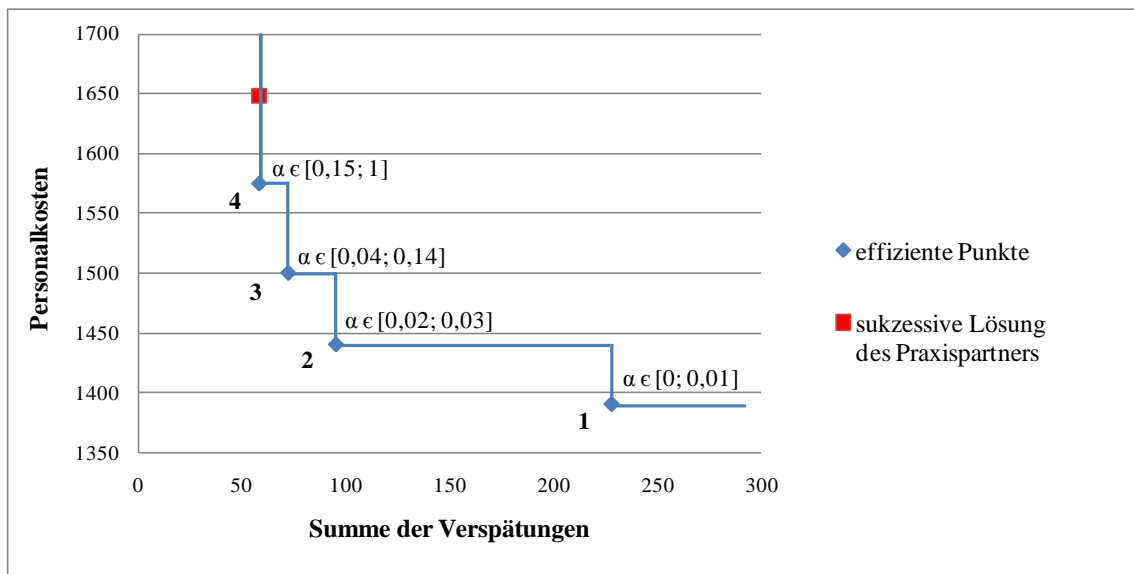


Abbildung 2: Effiziente Punkte des numerischen Beispiels

Aufgrund der geringen Anzahl effizienter Punkte stellt sich der effiziente Rand der Lösungsmenge entsprechend Abbildung 2 als Treppenfunktion dar. Für jeden Punkt ist das Intervall der relevanten α -Werte angegeben.

Lösung	1	2	3	4
α -Intervall	[0;0,01]	[0,02;0,03]	[0,04;0,14]	[0,15;1]
Summe der Verspätungen (in Perioden)	228	95	72	58
Personalkosten	1.390,2	1.440	1.499,8	1.574,4

Tabelle 1: Effiziente Lösungen für das Beispiel als Ergebnis des Simultanplanungsansatzes

Die äußeren Punkte mit $\alpha = 0$ und $\alpha = 1$ sind Extremlösungen. Alle Punkte dazwischen können als Kompromisslösungen bezeichnet werden, bei denen vom Optimum des einen Zielkriteriums zugunsten einer Verbesserung des anderen Zielkriteriums abgewichen wird. Wählt der Entscheider ein α von 0,1, hieße das, dass für den Planer eine prozentuale Abweichung der Personalkosten von ihrem Optimum neunmal schwerwiegender ist als die gleiche prozentuale Abweichung des Verspätungskriteriums von seinem Optimum. In Tabelle 2 und Tabelle 3 sind alle relevanten Daten der simultan ermittelten Lösung mit $\alpha=0,1$ zusammengefasst.

Auftrag	1			2			3		4		5		
Vorgang j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Modus	2	8	3	8	3	8	8	3	8	2	2	5	1
Periode der Fertigstellung	20	36	56	16	212	240	130	235	112	212	44	76	116

Tabelle 2: Modi und Fertigstellungstermine der einzelnen Vorgänge (x_{jmt})

	s=1	s=2	s=3	s=4	s=5	s=6	s=7	s=8
Mitarbeiter 1	9	/	/	3	/	/	3	/
Mitarbeiter 2	/	9	/	/	/	/	9	/
Mitarbeiter 3	7	/	/	7	/	/	/	3

Tabelle 3: Ermitteltes Schichtmodell für jeden Mitarbeiter in allen Schichten (a_{rso})

Festzuhalten ist, dass bei der Optimierung des binären linearen Programms stets zulässige Pläne erstellt werden. Die Arbeitseinsätze sind dabei relativ gleichmäßig auf die Mitarbeiter verteilt, wobei die Länge eines Arbeitstages über den Planungszeitraum recht stark variieren kann. Gelegentlich ergeben sich ablaufbedingte Wartezeiten für die Mitarbeiter. Liegt der Fokus der Optimierung auf den Personalkosten, werden kostengünstigere Arbeitskräfte verhältnismäßig häufiger

eingesetzt als Arbeitskräfte mit gleicher Qualifikation und höherem Stundenlohn. Inwiefern diese Beobachtungen allgemein gültig sind, müsste in einer umfassenden, numerischen Studie mit weiteren Zahlenbeispielen getestet werden.

In Abbildung 2 ist neben den effizienten Punkten aus der simultanen Optimierung auch eine Lösung des Praxispartners abgetragen. Diese Lösung wurde ermittelt, indem die Planungsmethodik des verantwortlichen Planers auf das vorliegende Beispiel angewendet wurde. Die Methodik besteht darin, zunächst die Maschinenbelegungsplanung mit dem Ziel der Minimierung der Summe der quadrierten Verspätungen, jedoch losgelöst von allen anderen Informationen, durchzuführen. Die Ergebnisse der Maschinenbelegungsplanung fließen dann in die Personaleinsatzplanung ein, wobei eine Vielzahl manueller Korrekturen vorgenommen werden muss, um ein zulässiges Ergebnis zu erhalten. Es ist zu erkennen, dass mit diesem sukzessiven Vorgehen keine effiziente Lösung erreicht wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit versteht sich als Grundlagenarbeit zur operativen Produktionslogistik bei der auftragsorientierten Fertigung von Einzelstücken in einer maschinellen Werkstattfertigung. Dazu wurde das simultane Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanungsproblem betrachtet. Durch die Formulierung eines binären, linearen Optimierungsproblems konnte zum besseren Verständnis der Struktur des Planungsproblems beigetragen werden.

Die durchgeführte Beispielrechnung lieferte folgende Erkenntnisse, von denen aufgrund der Problemstruktur anzunehmen ist, dass sie auch allgemein gültig sind: Kann das simultane Modell optimal gelöst werden, liefert es effiziente und damit bessere Ergebnisse bezüglich der vorab festgelegten Zielkriterien als die sukzessive Planung der Maschinenbelegung und des Personaleinsatzes. Es besteht somit Potenzial zur Verbesserung der operativen Produktionslogistik. Manuelle Eingriffe, die bei der sukzessiven Planung nötig werden können, um aus unzulässigen zulässige Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzpläne zu generieren, können dabei vollständig vermieden werden. Zudem lassen sich vorgegebene Pläne mithilfe des Modells auf Zulässigkeit prüfen und bewerten.

Aufgrund der hohen Komplexität der Teilprobleme ist davon auszugehen, dass bei Anwendung des Simultanplanungsansatzes Probleme praktischer Größenordnung sehr schwer optimal zu lösen sind. Dieser Problematik wird daher in einer weiteren Phase des Praxisprojektes durch die Entwicklung und Erprobung von heuristischen Lösungsmethoden Rechnung getragen.

Literaturverzeichnis

Apenberg und Partner (2010) Pressemitteilung vom 30.3.2010. URL:

<http://www.apenberg.de/c3view.php?sid=ZGs8VDe887b8gH8b8gDesgcbHHwb1wgAJ8eeb1g8&c3p=87&c3l=de>

Zuletzt besucht am 17.5.2011.

Arbeitszeitgesetz (ArbZG) vom 6. Juni 1994 (BGBl. I S. 1170, 1171), zuletzt geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 15. Juli 2009 (BGBl. I S. 1939).

Bechtold, S. E., Jacobs, L. W. (1990) Implicit modeling of flexible break assignments in optimal shift scheduling. *Management Science* 36 (11), S. 1339–1351.

Bellenguez-Morineau, O. (2008) Methods to solve multi-skill project scheduling problem. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research* 6 (1), S. 85–88.

Böttcher, J., Drexl, A., Kolisch, R., Salewski, F. (1999) Project scheduling under partially renewable resource constraints. *Management Science* 45 (4), S. 543–559.

Brucker, P., Drexl, A., Möhring, R., Neumann, K., Pesch, E. (1999) Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. *European Journal of Operational Research* 112 (1), S. 3–41.

Brusco, M. J., Jacobs, L. W. (2001) Starting-time decisions in labor tour scheduling: An experimental analysis and case study. *European Journal of Operational Research* 131 (3), S. 459–475.

Cai, X., Li, K. N. (2000) A genetic algorithm for scheduling staff of mixed skills under multi-criteria. *European Journal of Operational Research* 125 (2), S. 359–369.

Collette, Y., Siarry, P. (2003) *Multiobjective optimization: principles and case studies*. Springer, Berlin.

- Dantzig, G. B. (1954) A Comment on Edie's "Traffic Delays at Toll Booths". *Journal of the Operations Research Society of America* 2 (3), S. 339–341.
- Domschke, W., Scholl, A., Voß, S. (1997) *Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer, Berlin.
- Drexl, A., Kimms, A. (2001) Optimization Guided Lower and Upper Bounds for the Resource Investment Problem. *The Journal of the Operational Research Society* 52 (3), S. 340–351.
- Elloumi, S., Fortemps, P. (2010) A hybrid rank-based evolutionary algorithm applied to multi-mode resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 205 (1), S. 31–41.
- Emmons, H., Burns, R. N. (1991) Off-Day Scheduling with Hierarchical Worker Categories. *Operations Research* 39 (3), S. 484.
- Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Sier, D. (2004) Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research* 153 (1), S. 3–27.
- Günther, H.-O., Tempelmeier, H. (2009) *Produktion und Logistik*. 8., überarb. und erw. Aufl., Springer, Berlin.
- Hartmann, S., Briskorn, D. (2010) A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 207 (1), S. 1–14.
- Heilmann, R. (2000) *Ressourcenbeschränkte Projektplanung im Mehr-Modus-Fall*. Dissertation Universität Karlsruhe, 1999, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden.
- Jarrah, A. I. Z., Bard, J. F., deSilva, A. H. (1994) Solving Large-Scale Tour Scheduling Problems. *Management Science* 40 (9), S. 1124–1144.
- Neumann, K., Zimmermann, J. (1999) Resource levelling for projects with schedule-dependent time windows. *European Journal of Operational Research* 117 (3), S. 591–605.

- Pinedo, M. (2009) *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. 2. Auflage, Springer New York.
- Salewski, F. (1997) Klassifikation von Dienstplanungsproblemen. in: Kossbiel, H., Hrsg., *Modellgestützte Personalentscheidungen*. Hampp, München.
- Salewski, F., Schirmer, A., Drexl, A. (1997) Project scheduling under resource and mode identity constraints: Model, complexity, methods, and application. *European Journal of Operational Research* 102 (1), S. 88–110.
- Schroll, A. (2007) *Bedarfs- und mitarbeitergerechte Dienstplanung mit Fuzzy-Control*. Dissertation, Universität Magdeburg, 2006, Sierke, Göttingen.
- Spengler, T. (2004) Personaleinsatzplanung. in: Gaugler, E., Hrsg., *Handwörterbuch des Personalwesens*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, S. 1469–1479.
- Sprecher, A. (1994) *Resource constrained project scheduling. Exact methods for the multi-mode case*. Springer, Berlin.
- Steinrücke, M. (2007) *Termin-, Kapazitäts- und Materialflussplanung bei auftragsorientierter Werkstattfertigung*. Habilitationsschrift, Universität Hagen, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden.
- Talbot, F. B. (1982) Resource-Constrained Project Scheduling with Time-Resource Tradeoffs: The Nonpreemptive Case. *Management Science* 28 (10), S. 1197–1210.
- Ver.di Bundesvorstand, Hrsg. (2005) *Manteltarifvertrag für die gewerblichen Arbeitnehmer der Druckindustrie im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland*.
URL: http://www.verdi.de/medien-kunst-industrie.hamburg/tarifpolitik_im_norden/tarifvertraege/druckindustrie/data/mtvdruk.pdf
Zuletzt besucht am 17.5.2011.
- Weglarz, J., Józefowska, J., Mika, M., Waligóra, G. (2011) Project scheduling with finite or infinite number of activity processing modes - A survey. *European Journal of Operational Research* 208 (3), S. 177–205.

Anhang A: Arbeitsrechtliche und tarifvertragliche Bestimmungen

Im Folgenden sind wichtige Regelungen des Arbeitszeitgesetzes (ArbZG) und des Manteltarifvertrags für die gewerblichen Arbeitnehmer der Druckindustrie²⁶ zusammengetragen, die die Lage und Dauer von Arbeits- und Pausenzeiten beschränken und daher in der Dienstplanung der Druckerei Berücksichtigung finden müssen:

- Die werktägliche Arbeitszeit der Arbeitnehmer darf acht Stunden nicht überschreiten. Sie kann auf bis zu zehn Stunden verlängert werden. Dann muss innerhalb von sechs Monaten ein Ausgleich gewährt werden, sodass acht Stunden werktäglich nicht überschritten werden (§ 3 ArbZG).
- Die werktägliche Arbeitszeit der Nachtarbeitnehmer darf acht Stunden nicht überschreiten. Sie kann auf bis zu zehn Stunden verlängert werden. Dann muss innerhalb eines Kalendermonats ein Ausgleich gewährt werden, sodass acht Stunden werktäglich nicht überschritten werden (§ 6 (2) ArbZG).
- Arbeitnehmer dürfen nicht länger als sechs Stunden hintereinander ohne Ruhepause beschäftigt werden (§ 4 S. 3 ArbZG).
- Bei einer Arbeitszeit von mehr als sechs bis zu neun Stunden ist die Arbeit durch Ruhepausen von mindestens 30 Minuten zu unterbrechen (§ 4 S.1, 1. Halbsatz ArbZG).
- Bei einer Arbeitszeit von mehr als neun Stunden insgesamt ist die Arbeitszeit durch Ruhepausen von mindestens 45 Minuten zu unterbrechen (§ 4 S.1, 2. Halbsatz ArbZG).
- Die Ruhepausen können in Zeitabschnitte von jeweils mindestens 15 Minuten aufgeteilt werden (§ 4 S. 2 ArbZG).
- Arbeitnehmer dürfen an Sonn- und Feiertagen nicht beschäftigt werden (§ 9 (1) ArbZG)
- Die regelmäßige tägliche Arbeitszeit laut Tarifvertrag beträgt sieben Stunden: 35 Stunden ist die regelmäßige wöchentliche Arbeitszeit (§ 3 I. (1)

²⁶ Vgl. Ver.di Bundesvorstand, Hrsg. (2005).

Tarifvertrag). Die wöchentliche Arbeitszeit eines Arbeitnehmers ist jeweils auf fünf Tage, in der Regel Montag bis Freitag zu verteilen (§ 3 II. (1) Tarifvertrag).

- Nach zwei hintereinander folgenden Überstunden ist jedem Arbeitnehmer eine bezahlte Pause von 15 Minuten und bei mehr als drei Überstunden eine bezahlte Pause von 30 Minuten zu gewähren (§ 5 (6) S.1 Tarifvertrag).
- Pro Kalenderjahr dürfen bis zu 13 Samstagsschichten vorgesehen werden (§ 3 II. (3) Tarifvertrag). Dann müssen zwei arbeitsfreie Tage zusammenhängend geplant werden. Bei Vorliegen betrieblicher Erfordernisse können diese auch einzeln gewährt werden (§ 3 II. (5) Tarifvertrag).

Anhang B: Daten des numerischen Beispiels

Nachfolgend werden die relevanten Daten des numerischen Beispiels präsentiert. Dabei fasst Tabelle 4 die Daten der Schichtmodelle zusammen. Dazu gehört neben der Verfügbarkeit der Mitarbeiter auch deren maximale Arbeitszeit in einem bestimmten Schichtmodell. Die tatsächlich anfallenden Personalkosten für die entsprechenden Mitarbeiter ergeben sich aus dem Produkt des Stundenlohns und des in Tabelle 4 dargestellten Kostenfaktors. In diesem Fallbeispiel bekommt Mitarbeiter 1 einen Stundenlohn von 21€. Die Mitarbeiter 2 und 3 erhalten 20€ bzw. 17€ pro Stunde. Je nach Schichtmodell und Tageszeit der Schicht variiert der sogenannte Kostenfaktor, der die tatsächlich entlohnte Arbeitszeit (inkl. aller Sozialabgaben und Lohnnebenkosten, sowie Nachtarbeitszuschläge und bezahlter Pausen) widerspiegelt.

Schichtmodell ω	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Verfügbarkeit A_ω (in Perioden)	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52
Max. Arbeitszeit L_ω^{\max} (in Perioden)	12	16	20	24	26	30	34	37	40	40	40
Kostenfaktor Frühschicht	3,6	4,8	6,0	7,2	7,8	9,0	10,2	11,4	12,6	13,8	15,0
Kostenfaktor Spätschicht	3,6	4,8	6,3	7,8	8,7	10,1	11,6	13,0	15,1	16,5	18,2
Kostenfaktor Nachtschicht	4,6	6,4	8,1	9,9	11,1	12,9	14,1	15,3	16,5	17,7	18,9

Tabelle 4: Daten der Schichtmodelle

Tabelle 5 beinhaltet die benötigten Maschinen zu den einzelnen Vorgängen und die gewünschten Liefertermine. Des Weiteren finden sich in Tabelle 6 alle benötigten Informationen zu den Ausführungsmodi, welche die Ressourcen Mitarbeiter und Maschine miteinander verknüpfen.

Auftrag	1			2			3		4		5		
Vorgang j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Maschinentyp	A	B	A	B	A	B	B	A	B	A	A	B	A
Fälligkeitstermin (in Perioden)	50			244			260		256		50		

Tabelle 5: Aufträge und dazugehörige Vorgänge

Modus m	1	2	3	4	5	6	1	2
Mitarbeiter	1	1	2	2	1 & 2	1 & 2	2	3
Maschine	A/1	A/2	A/1	A/2	A/1	A/2	B	B
Vorgangszeit p_{jm}	20	20	20	20	12	12	16	16
Zulässig für Vorgänge j	1, 3, 5, 8, 10, 11, 13						2, 4, 6, 7, 9, 12	

Tabelle 6: Modi mit den jeweiligen Mitarbeitern

Otto von Guericke University Magdeburg
Faculty of Economics and Management
P.O. Box 4120 | 39016 Magdeburg | Germany

Tel.: +49 (0) 3 91/67-1 85 84

Fax: +49 (0) 3 91/67-1 21 20

www.wv.uni-magdeburg.de