

Einfluss von Mitarbeiterqualifikationszeiten im Rahmen nachhaltiger Produktionsplanung

Influence of Employee Qualification Times in the Context of Sustainable Production Planning

Thorsten Vitzthum, Thorsten Claus, TU Dresden – IHI Zittau, Lehrstuhl für
Produktionswirtschaft und Informationstechnik, Dresden (Germany),
thorsten.vitzthum@tu-dresden.de, thorsten.claus@tu-dresden.de

Frank Herrmann, OTH Regensburg, Innovationszentrum für Produktionslogistik und
Fabrikplanung (IPF), Regensburg (Germany), frank.herrmann@oth-regensburg.de

Abstract: This research paper evaluates the potential of reducing shortages and costs that are created by training measures as an example for measurement of extended qualification of key employees in sustainable production planning. Capacity planning with standard methods in Enterprise Resource Planning Systems, namely priority rules, are used. Almost always, the optimal solution is not found, although there is one. In addition, unnecessarily high stocks are built up. In real business situations, this causes lost profits.

1 Einführung und Literaturrecherche

Das Thema Nachhaltigkeit ist Gegenstand vieler wissenschaftlicher Arbeiten. Eine allgemeingültige Definition für den Begriff Nachhaltigkeit existiert nicht. Für diesen Beitrag wird folgende Definition verwendet: Nachhaltiges Handeln beschäftigt sich mit der Frage, wie die Bedürfnisse des Einzelnen und der Gesellschaft unter Berücksichtigung ökonomischer, sozialer und ökologischer Aspekte erfüllt werden können, ohne dabei die Bedürfnisse zukünftiger Generationen zu gefährden. In Carnau (2011, S. 14) wird zum Thema Nachhaltigkeit angemerkt: „Beim Konzept Nachhaltigkeit geht es weniger um eine exakte Definition von Nachhaltigkeit, sondern um die Bestimmung dessen, was Bestand haben soll und um die Verknüpfung der zeitlichen und räumlichen Ebene, die eine Nachhaltigkeitspolitik einzubeziehen hat. Die Grundidee basiert also auf der einfachen Einsicht, dass ein System dann nachhaltig ist, wenn es selber überlebt und langfristig Bestand hat. Wie es konkret auszusehen hat, muss im Einzelfall geklärt werden“.

Im Zuge des Brundtland-Berichts wird ein gängiges Nachhaltigkeitsmodell aufgestellt, das auf den drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziologie, die als Säulen bezeichnet werden, beruht (Brundtland 1987).

Produktionsprogramme beeinflussen alle drei Säulen des Nachhaltigkeitsmodells. Üblicherweise stehen hierbei die ökonomischen Aspekte wie Reduzierung der Lagerkosten und Kosten für Zusatzkapazität (Günther und Tempelmeier 2014) im Vordergrund. Doch zunehmend gewinnen die ökologischen Aspekte wie Emissionsreduzierung oder Minimierung des Energieverbrauchs (Absi et al. 2013; Battini et al. 2014) und soziologischen Aspekte wie Belastung oder Qualifikation von Mitarbeitern (Boysen und Fliedner 2011; Jaber und Bonney 2007) an Bedeutung.

Der Mitarbeiter gewinnt durch die zunehmende Spezialisierung und Qualifizierung, im Zusammenhang mit Industrie 4.0 und der damit verbundenen Hochautomatisierung, an Bedeutung (Spath 2014). Begründet wird dies durch den zunehmenden Einfluss von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), verbunden mit Echtzeitinformationen. Eine Umfrage von Spath (2014) ergab, dass „[...] zwei Drittel der Unternehmen ihren Aufwand zur Steuerung der Personalkapazität als zu hoch oder zumindest als zeitweise zu hoch [...]“ empfanden. Weiter wird erwartet, dass sich die Produktion zukünftig häufiger an neue Produkte und Prozesse anpassen muss, wodurch zusätzlicher Bedarf an Mitarbeiterqualifikation entsteht (Spath 2014).

Dombrowski et al. (2014) sehen die Zukunft der Fertigung in einem Werkzeugszenario, in dem der weiterhin dominante Facharbeiter durch cyberphysische Systeme als eine Art Werkzeug unterstützt wird. Dombrowski et al. (2014, S. 138) verweist in diesem Zusammenhang auf Schlund und Gerlach (2013) und merken dazu an, „auch wenn menschliche Arbeitskräfte in Zukunft weniger relevant für eine physische Ausführung der Arbeitsaufgaben sein werden, ist ihre Funktion als intelligenter Entscheider in ungeplanten und nicht vorhersagbaren Situationen weiterhin von großer Bedeutung. Darüber hinaus kann der Mensch als eine Art Problemlöser eingesetzt werden und somit ein System intelligenter, technischer Objekte als elementaren Baustein vervollständigen.“

Die Hochautomatisierung macht es erforderlich, für gewisse Maschinen speziell qualifizierte Mitarbeiter zu haben. Die Mitarbeiter lassen sich in unterschiedliche Personaltypen einteilen. Durch einen Personaltyp werden Mitarbeiter gleicher Qualifikation zusammengefasst (VDI 3633 Blatt 6 2001). Die Art der Qualifikation bestimmt, welche Maschinen der Personaltyp bedienen kann. Nicht jeder Mitarbeiter muss eine spezielle Qualifikation aufweisen. Allerdings besteht eine Abhängigkeit von diesen hochqualifizierten Mitarbeitern, da diese aufgrund ihrer Erfahrung und Qualifikation nicht ohne Weiteres ersetzt werden können. Stellvertretend für die soziologische Säule der Nachhaltigkeit wird in dieser Arbeit die Mitarbeiterqualifikation betrachtet.

In klassischen kommerziell verfügbaren Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen (PPS-Systemen) erfolgt eine Zerlegung des Gesamtplanungsproblems in mehrere sukzessive abzuarbeitende Teilplanungsprobleme. Dieses Model geht auf Drexl et al. (1994) zurück. Es besteht aus den Stufen der aggregierten Gesamtplanung (AGGRPLAN), der Hauptproduktionsprogrammplanung (HPPLAN), der Materialbedarfsplanung (MRP), bestehend aus der Nettobedarfsrechnung, der Losgrößenbildung, der Durchlaufterminierung und der Kapazitätsplanung, sowie der Fertigungssteuerung (Herrmann 2011; Kurbel 2011).

Bislang wurde in den meisten Fällen der Termin der Schulung, unabhängig von der Auftragsituation des Unternehmens, festgesetzt. Das Vorgehen wurde von Rottlinger (2005) im Kapitel „Festlegung der Zeitfenster für Personalentwicklungsmaß-

nahmen im Technologiekalender“ beschrieben. Auswirkungen auf die Ressourcenbelegung und auf das Produktionsprogramm wurden nicht quantifiziert.

In diesem Beitrag werden gängige Einplanungsvarianten einer Schulung im Rahmen kommerziell verfügbarer PPS-Systeme untersucht. Üblicherweise erfolgt die Planung durch Prioritätsregeln. Um eine von solchen Prioritätsregeln unabhängiges Ergebnis zu bekommen, erfolgt eine simulationsgestützte Planung (Abschnitt 2). Die Untersuchung erfolgt für eine realistische Fallstudie, die in Abschnitt 3 beschrieben ist. Die Simulationsexperimente und die erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 4 dargestellt. Mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick (Abschnitt 5) wird der Artikel beendet.

2 Simulationsgestützte Planung

Grundlage ist der in kommerziell verfügbaren PPS-Systemen realisierte Planungsprozess aus Materialbedarfsplanung (MRP) - die Produktionsaufträge liefert -, ihre nachfolgende Durchlaufterminierung und der Fertigungssteuerung. Die Mengenplanung bei der Materialbedarfsplanung erfolgt dabei iterativ für jedes Erzeugnis entlang von Dispositionsstufen. Dabei besteht jeder Schritt aus der Sekundärbedarfslösung gefolgt von der Losgrößenberechnung. Die so entstandenen Produktionsaufträge werden anschließend terminiert. Durch die Durchlaufterminierung und die Kapazitätsplanung wird die beschränkte Kapazität auf Produktionssystemebene berücksichtigt. Die nachgelagerte Fertigungssteuerung plant die einzelnen Arbeitsschritte auf den einzelnen Stationen (Claus et al. 2015; Herrmann 2011; Kurbel 2011; Vollmann et al. 2011). Da die Schulungen sehr lange dauern, wird in dieser Untersuchung auf die Fertigungssteuerung verzichtet. Die Durchlaufterminierung erfolgt in der simulationsgestützten Planung mit Hilfe von Prioritätsregeln. Es werden die Prioritätsregeln kürzeste Operationszeit (KOZ), kürzeste Pufferzeit (KPZ), frühester Endzeitpunkt (FEZ) und Critical Ratio + Shortest Processing Time (CR+SPT) exemplarisch verwendet. Bei der KOZ-Regel wird der Auftrag mit der kleinsten Bearbeitungszeit, die sich aus seiner Stückbearbeitungszeit multipliziert mit der Produktionsmenge berechnet, bevorzugt. Die Materialbedarfsplanung bestimmt Endtermine. Die FEZ-Regel bevorzugt den Auftrag mit dem kleinsten Endtermin. Die KPZ-Regel bevorzugt den Auftrag mit der geringsten Differenz zwischen Endtermin und frühesten möglichen Fertigstellungstermin (aktueller Zeitpunkt plus Bearbeitungszeit), diese Differenz wird als Puffer bezeichnet. Für bereits verspätete Aufträge plant die CR/SPT nach der KOZ-Regel ein und für die anderen Aufträge nach dem Quotienten aus der Zeit bis zum Endtermin (des Auftrags) und seiner Bearbeitungszeit, wobei der kleinste Wert bevorzugt wird (Herrmann 2011; Fandel 2009). Aufgrund der Überlegungen in Herrmann (2011) liefern die Regeln CR+SPT, KPZ und FEZ pareto-optimale Ergebnisse für die mittlere Verspätung und die Streuung der Verspätung. Die simulationsgestützte Planung durchsucht den durch diese Prioritätsregeln aufgespannten Baum an möglichen Plänen nach dem Verzweige- und Begrenze-Prinzip. Im Verzweige-Schritt werden von den zu einem Planungszeitpunkt vorliegenden Produktionsaufträgen (PA1) ein oder mehrere nach einer Prioritätsregel wie KOZ eingeplant, wodurch eine resultierende Auftragsmenge (PA2) entsteht. Dies ist in der Abbildung 1 dargestellt. Dadurch entstehen vier Teilpläne nach diesen Prioritätsregeln mit einer Länge von m zugeteilten Produktionsaufträgen.

Dieser Verzweige-Schritt wird n mal iteriert. In einem anschließenden Begrenze-schritt werden p Teilpläne ausgewählt. Typische Kriterien sind die mittlere Verspätung und die Streuung der Verspätung. Diese Verzweige- und Begrenzeschritte werden solange wiederholt, bis alle Produktionsaufträge aus PA1 eingeplant sind.

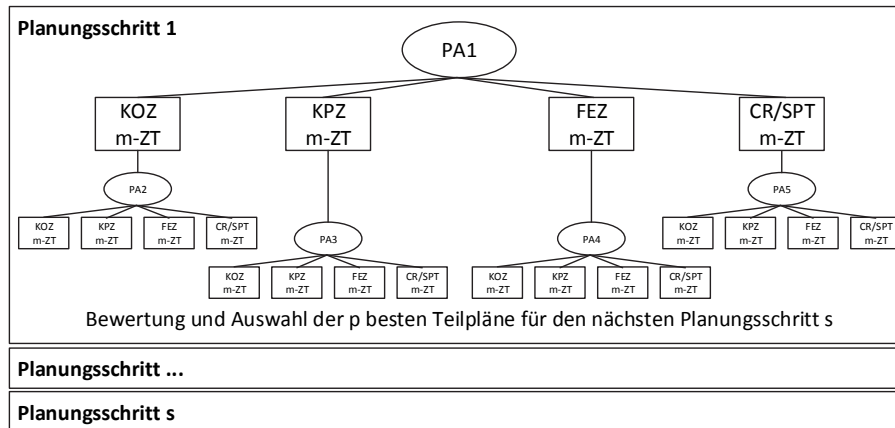


Abbildung 1: Simulationsgestützte Planung – Verzweige- und Begrenze-Prinzip

Ein Parameter von $m=1$ und ein maximales n bewirken eine vollständige Enumeration aller durch die vier Prioritätsregeln (r) möglichen Pläne. Bei einem Arbeitsvorrat von zehn Produktionsaufträgen (x), $m=1$ und maximalem n ergeben sich somit 262.144 Teilpläne. Die Anzahl der Teilpläne wächst exponentiell. Durch $m=4$ reduziert sich die Anzahl der Teilpläne auf 65.536. In dem hier angewandten Verzweige- und Begrenze-Verfahren wird die Anzahl der Teilpläne nach einer vorher festgelegten Anzahl an Iterationen auf die p besten Lösungen reduziert. Wird unterstellt, dass alle zwei Iterationen die Teilpläne auf fünf reduzieren, verringert sich die Anzahl der insgesamt ermittelten Teilpläne auf 336. Um eine handhabbare Anzahl von Teilplänen zu erhalten, ist die Wahl kleiner Werte für n und p erforderlich und ggf. ein hoher Wert für m .

3 Fallstudie

Betrachtet wird in dieser Fallstudie ein Luftfahrtzulieferer der verschiedene Hitzeschilder für die Raumfahrtindustrie herstellt. Für die Herstellung werden hochwarmfeste Stähle benötigt, deren Umformung mit automatisierten und prozessgesteuerten Wärmebehandlungsanlagen erfolgt und die eine sehr hohe Reproduzierbarkeit haben müssen. Um überhaupt als Zulieferer im Bereich der Luft- und Raumfahrt tätig werden zu können, bedarf es eines hohen Qualitätsstandards. Die Leistungsfähigkeit ist gegenüber dem Auftraggeber in Form von Zertifikaten (DIN EN 9100:2017-02) zu erbringen. Betrachtet wird dabei ein Produktionssystem, in dem in einem einstufigen Produktionsprozess das Produkt Hitzeschild hergestellt wird. Es hat eine Stückbearbeitungszeit 3,33 Kapazitätseinheiten (KE)/Mengeeinheit (ME) und verursacht Lagerkosten in Höhe von 20 Geldeinheiten (GE) je Woche und Mengeeinheit. Rüstzeiten und Rüstkosten werden

vernachlässigt. Das Produktionssystem hat eine Wochenkapazität von 40 KE. Es werden fünf Mitarbeiter eingesetzt. Der Planungszeitraum umfasst 15 Wochen. Ein Mitarbeiter soll in dem Betrachtungszeitraum eine Schulung erhalten. Die Schulung benötigt 40 KE, was wiederum der Kapazität einer Woche entspricht.

4 Simulationsergebnisse

Für die Untersuchung wird in Anlehnung an Rottinger (2005) davon ausgegangen, dass die Schulung als Personalmaßnahme festgelegt wird. Die Anforderungen der Produktion werden berücksichtigt, indem ein künstlicher Auftrag, im Folgenden als Schulungsauftrag bezeichnet, eingeplant wird. Für die Untersuchung erfolgt eine Langzeit-Simulation der (simulationsgestützten) Planung und der Umsetzung ihrer Planungsergebnisse durch eine Produktion. Dieser sogenannte PPS-Simulator ist in dem Simulationssoftwaresystem Plant Simulation 12 realisiert. Er besteht wie bei einem PPS-System aus der Nachbildung einer Produktion mit Maschinen, Werkstücken und Arbeitsplänen. Als Planungsalgorithmus wird die oben beschriebene simulationsgestützte Planung verwendet. Wie in der industriellen Praxis erfolgt eine rollende Planung. Es ist klar, dass Verspätungen bei einem stark ausgelasteten System auftreten. Um den Effekt der Einplanung einer Schulung zu beurteilen, werden solche Systeme betrachtet, bei denen die Einplanung der Produktionsaufträge aufgrund der Materialbedarfsplanung durch die First-In-First-Out-Regel (FIFO-Regel) nicht zu Verspätungen führt und noch genügend freie Kapazitäten für die Schulung bestehen. Eine Schulung fällt einmal pro Halbjahr an. Basierend auf freier Kapazität (κ) für Schulungen werden drei Szenarien untersucht. Beim Szenario 1 liegt κ zwischen dem einfachen und dem 1,5-fachen Kapazitätsbedarf für Schulungen, im Szenario 2 ist der Bereich das 1,5-fache bis zum 3-fachen und im Szenario 3 das 3-fache bis zum 5-fachen. Ausgewertet werden die mittlere Verspätung und die Streuung der Verspätung. Um statistisch signifikante Ergebnisse zu erhalten, wird die Simulation für einen sehr langen Zeitraum durchgeführt. 1.200 Wochen erweisen sich als ausreichend. Am wirkungsvollsten erweisen sich kleinere Werte für die simulationsgestützte Planung, konkret $m = 1/4$ des Arbeitsvorrates, $n = 2$ und $p = 4$. Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse für unterschiedliche Kapazitätsbeanspruchungen: freie Kapazität (κ) für Schulungen und Kapazitätsbedarf (KB) für Schulungen

| Szenario | 1: $KB \leq \kappa \leq 1.5KB$ | 2: $1.5KB \leq \kappa \leq 3KB$ | 3: $3KB \leq \kappa \leq 5KB$ |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Mittlere Verspätung | 7 Tage | 3 Tage | 0,7 Tage |
| Streuung (Verspätung) | 3 Tage | 1,27 Tage | 0,14 Tage |

Die Ergebnisse zeigen, dass es zum Teil zu deutlichen Verspätungen kommt. Zur Analyse der Ursachen wird das folgende, stark vereinfachte Teilproblem zugrunde gelegt und betrachtet. Die von der Materialbedarfsplanung erstellten Planaufträge für das Produkt Hitzeschild sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Planaufträge der Materialbedarfsplanung

| Woche (t) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Summe |
|---------------------------|---|----|---|---|---|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|-------|
| Bedarf ($d_{A,t}$) [ME] | 8 | 12 | 4 | 8 | 9 | 16 | 15 | 5 | 11 | 16 | 13 | 14 | 12 | 10 | 13 | 166 |
| Planaufträge | 8 | 12 | 4 | 8 | 9 | 16 | 15 | 5 | 11 | 16 | 13 | 14 | 12 | 10 | 13 | 166 |

Zur Analyse der einzelnen Effekte wird der Schulungsauftrag der Reihe nach zu jedem möglichen Wochenbeginn freigegeben und die Auftragseinplanung unter der Verwendung von einer der vier, in der simulationsgestützten Planung verwendeten Prioritätsregeln, durchgeführt. In Tabelle 3 ist das Gesamtergebnis angegeben. Eine Schulung gilt als durchführbar, wenn diese rechtzeitig innerhalb des Betrachtungszeitraums abgeschlossen wird. Der Tabelle kann entnommen werden, dass die Einplanung der Schulung immer zu Verspätungen führt. Je nach verwendeter Prioritätsregel und verwendetem Freigabetermin schwankt die Anzahl der verspäteten Aufträge zwischen eins und sieben. Die Anzahl der Gesamtverspätung bewegt sich dabei zwischen 27 ZE und 327 ZE.

Tabelle 3: Einplanung der Schulung durch Schulungsauftrag (S)

| Freigabetermin des Schulungsauftrages (S) | t=1 | t=2 | t=3 | t=4 | t=5 | t=6 | t=7 | t=8 | t=9 | t=10 |
|---|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Prioritätsregel KOZ | | | | | | | | | | |
| Anzahl der Verspätungen | 1 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 4 | 4 | 4 | 6 |
| Gesamtverspätung [ZE] | 27 | 50 | 50 | 327 | 327 | 287 | 217 | 217 | 217 | 193 |
| Schulung durchführbar | Ja | Ja | Ja | Ja | Ja | Ja | Ja | Ja | Ja | Nein |
| Prioritätsregel KPZ | | | | | | | | | | |
| Anzahl der Verspätungen | 1 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Gesamtverspätung [ZE] | 27 | 50 | 50 | 193 | 193 | 193 | 193 | 193 | 193 | 193 |
| Schulung durchführbar | Ja | Ja | Ja | Nein | Nein | Nein | Nein | Nein | Nein | Nein |
| Prioritätsregel FEZ | | | | | | | | | | |
| Anzahl der Verspätungen | 1 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 4 | 4 | 4 | 6 |
| Gesamtverspätung [ZE] | 27 | 50 | 50 | 327 | 327 | 287 | 217 | 217 | 217 | 193 |
| Schulung durchführbar | Ja | Ja | Ja | Ja | Ja | Ja | Ja | Ja | Ja | Nein |
| Prioritätsregel CR/SPT | | | | | | | | | | |
| Anzahl der Verspätungen | 1 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Gesamtverspätung [ZE] | 27 | 50 | 50 | 193 | 193 | 193 | 193 | 193 | 193 | 193 |
| Schulung durchführbar | Ja | Ja | Ja | Nein | Nein | Nein | Nein | Nein | Nein | Nein |

Wie aus der Literatur bekannt (Tempelmeier 2008; Herrmann 2011) vermeidet eine frühere Freigabe Verspätungen. Dies setzt den Kreislauf (Wiendahl 2014; Günther und Tempelmeier 2014; Herrmann 2011) aus längeren Wartezeiten an den Stationen

und damit höheren Lagerbeständen, längeren Durchlaufzeiten und damit noch früherer Auftragsfreigabe in Gang. Eine frühere Auftragsfreigabe ist somit in der Regel nicht als alleinige Lösung geeignet. Die negativen Auswirkungen werden im Rahmen dieser Fallstudie vernachlässigt. Es soll gezeigt werden, dass selbst beim Vernachlässigen dieser Auswirkungen das Simulationssystem nicht in der Lage ist, die optimale Lösung zu finden. Eine weitere extreme Variante besteht darin, alle Planaufträge eines Planungshorizonts zum Beginn des Planungslaufs freizugeben. Das resultierende Ergebnis ist in der Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Einplanung der Schulung durch Schulungsauftrages (S) Planung bei früherer Auftragsfreigabe

| Freigabetermin des Schulungsauftrages (S) | t=1 | t=2 | t=3 | t=4 | t=5 | t=6 | t=7 | t=8 | t=9 | t=10 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| Prioritätsregel KOZ | | | | | | | | | | |
| Anzahl der Verspätungen | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 |
| Gesamtverspätung [ZE] | 297 | 297 | 297 | 297 | 297 | 327 | 327 | 327 | 287 | 360 |
| Schulung durchführbar | Ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | Nein |
| Prioritätsregel KPZ | | | | | | | | | | |
| Anzahl der Verspätungen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| Gesamtverspätung [ZE] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 17 | 17 | 17 | 57 |
| Schulung durchführbar | Ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | Nein |
| Prioritätsregel FEZ | | | | | | | | | | |
| Anzahl der Verspätungen | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Gesamtverspätung [ZE] | 297 | 297 | 297 | 297 | 297 | 327 | 327 | 327 | 287 | 360 |
| Schulung durchführbar | Ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | ja | Nein |
| Prioritätsregel CR/SPT | | | | | | | | | | |
| Anzahl der Verspätungen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Gesamtverspätung [ZE] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 57 | 57 | 575 | 57 | 57 |
| Schulung durchführbar | ja | ja | ja | ja | ja | nein | nein | nein | nein | Nein |

Durch die Verwendung der früheren Freigabetermine können die Aufträge flexibler eingeplant werden. Dadurch können von der Auftragsfreigabe bei der Verwendung der beiden Prioritätsregeln KPZ und CR+SPT Lösungen ohne Fehlmengen ermittelt werden. Allerdings werden dabei Lagerbestände aufgebaut. Die Anwendung von diesem Vorgehen bei der obigen Langzeitsimulation reduziert die Verspätungen nahezu vollständig.

Zur Nutzung der Idee einer früheren Auftragsfreigabe wird folgender Algorithmus realisiert. Zunächst wird der maximale Puffer ermittelt, in dem eine Rückwärts- und eine Vorwärtsterminierung durchgeführt wird (Herrmann 2011). Ist dieser Puffer für die Schulung groß genug, so ist diese ohne Auftreten von Verspätungen durchführbar. Anderenfalls wird die Auftragsfreigabe erhöht. Realisiert wird ein Verfahren, bei dem die Aufträge in der zweiten Periode eine frühere Freigabe von

einer Periode erhalten, dann die der dritten Periode usw. Reicht dies nicht, bekommen die der dann zweiten Periode eine um eine Periode (zusätzlich) höhere Freigabe usw. Ist ein ausreichend hoher Puffer gewonnen worden, so werden Planaufträge so verschoben, dass ihre Lagerkosten abnehmen. Mit dem Planauftrag mit den höchsten Lagerkosten wird begonnen. Das Verfahren terminiert, wenn auf diese Weise keine Verringerung der Lagerkosten mehr möglich ist.

Die Anwendung dieses Verfahrens führt zu dem in Abbildung 2 angegebenen Ergebnis. Dieser ist zu entnehmen, dass alle Planaufträge rechtzeitig fertiggestellt werden können. Der Schulungsauftrag (S) kann zwischen Planauftrag zwei und Planauftrag drei eingeplant werden, ohne dass ein nachfolgender Planauftrag verspätet fertiggestellt wird und ohne dass ein Lagerbestand entsteht.

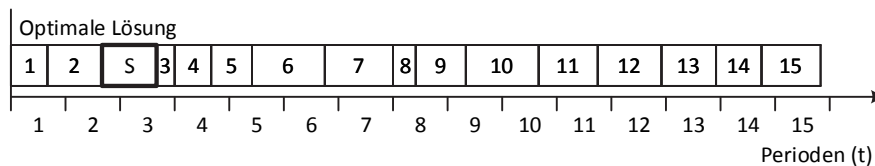


Abbildung 2: Optimale Lösung für die Einplanung der Schulung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die in der industriellen Praxis vorherrschenden Enterprise Resource Planning Systeme unterstellen, dass Maßnahmen zur nachhaltigen Weiterentwicklung von Mitarbeitern, wie Schulungen, als externe (fixe) Parameter in die Planung eingehen. Anhand einer realistischen Fallstudie zeigt dieser Beitrag auf, dass dies nicht richtig ist, sofern eine solche Maßnahme einen signifikanten Zeitbedarf hat. Selbst bei einer hohen Flexibilität bei der Durchführung einer solchen Maßnahme werden durch die in der industriellen Praxis oftmals eingesetzten einfachen Verfahren zur Kapazitätsplanung, wie Prioritätsregeln, diese Maßnahmen zu spät eingeplant.

Die hier untersuchte simulative Durchführung mit pareto-optimalen Prioritätsregeln führt zu deutlich besseren Ergebnissen. Allerdings wird sehr häufig eine existierende Lösung ohne Verspätung nicht gefunden. Es sei betont, dass eine fixe Einplanung einer solchen Maßnahme deren zu späte Einplanung vermeidet, aber aufgrund der Existenz einer zulässigen Lösung den Unternehmensgewinn spürbar verringert. Das ganze Problem wird zusätzlich verschärft, wenn solche Maßnahmen für mehrere Mitarbeiter durchzuführen sind, die Maßnahmen nicht im gleichen Zeitraum erfolgen können und die Mitarbeiter für die Fertigung zusammen benötigt werden.

In der weiteren Forschung soll dieses resultierende Planungsproblem genauer charakterisiert werden. Für diese voraussichtlich neue Klasse an Planungsproblemen sollen effiziente und effektive Lösungsverfahren entwickelt werden. In der Regel sind die Kundenaufträge nicht so weit im Voraus bekannt, wie dies in dieser Fallstudie unterstellt worden ist. Aus diesem Grund und der in der Regel vorliegenden rollenden Planung erscheint eine Verwendung einer übergeordneten Planung erfolgversprechend zu sein.

Literatur

- Absi, N.; Dauzère-Pérès, S.; Kedad-Sidhoum, S.; Penz, B.; Rapine, C.: Lot sizing with carbon emission constraints. *European Journal of Operational Research* 227 (2013) 1, S. 55–61.
- Battini, D.; Persona, A.; Sgarbossa, F.: A sustainable EOQ model: Theoretical formulation and applications. *International Journal of Production Economics* 149 (2014), S. 145–153.
- Bouchery, Y.; Ghaffari, A.; Jemai, Z.; Dallery, Y.: Including sustainability criteria into inventory models. *European Journal of Operational Research* 222 (2012) 2, S. 229–240.
- Boysen, N.; Fliedner, M.: Scheduling aircraft landings to balance workload of ground staff. *Computers and Industrial Engineering* 60 (2011) 2, S. 206–217.
- Brundtland, G.; Hauff, V. (Hrsg.): *Unsere gemeinsame Zukunft: [d. Brundtland-Bericht]*. Greven: Eggenkamp 1987.
- Carnau, P.: *Nachhaltigkeitsethik: Normativer Gestaltungsansatz für eine global zukunftsfähige Entwicklung in Theorie und Praxis*. Mering: Rainer Hampp Verlag 2011.
- Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2015.
- DIN 9700:2010-07: *Qualitätsmanagementsysteme – Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung*. Berlin: Beuth, 2010.
- Dombrowski, U.; Riechel, C.; Evers, M.: *Industrie 4.0 – Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution*. In: Kersten, W.; Koller, H.; Lödding, H. (Hrsg.): *Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. Berlin: GITO-Verlag 2014, S. 129–153.
- Drexl, A.; Fleischmann, B.; Günther, H.-O.; Stadler, H.; Tempelmeier, H.: *Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme*. *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* 46 (1994), S. 1022–1045.
- Fandel, G.; Fistek, A.; Stütz, S.: *Produktionsmanagement*. Dordrecht [u.a.]: Springer 2009.
- Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: *Produktion und Logistik: Supply Chain und Operations Management*. Norderstedt: Books on Demand 2014.
- Haasis, H.-D.: *Produktions- und Logistikmanagement: Planung und Gestaltung von Wertschöpfungsprozessen*. Wiesbaden: Gabler 2008.
- Herrmann, F.: *Logik der Produktionslogistik*. München: Oldenbourg 2009.
- Herrmann, F.: *Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung: Wirkung, Auswahl und Einstellhinweise von Verfahren und Parametern*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011.
- Jaber, M.Y.; Bonney, M.: Economic manufacture quantity (EMQ) model with lot-size dependent learning and forgetting rates. *International Journal of Production Economics* 108 (2007) 1-2, S. 359–367.
- Kurbel, K.: *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie*. München: Oldenbourg 2011.
- Rottinger, S.: *Mehrphasige Personalentwicklungsplanung für Fertigungssysteme auf Basis des Technologiekalender-Konzeptes*. Karlsruhe: Univ.-Verl. 2005.

- Schlund, S.; Gerlach, S.: Der Mensch im industriellen Holozän. *Economic Engineering* (2013) 4, S. 22-26.
- Spath, D. (Hrsg.): *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0: [Studie]*. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. 2013.
- Tempelmeier, H.: *Material-Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced-Planning-Systemen*. Berlin [u.a.]: Springer 2008.
- VDI-Richtlinie 3633 Blatt 6: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Abbildung des Personals in Simulationsmodellen*. Berlin: Beuth 2001.
- Vollmann, T.; Berry, W.; Whybark, D.; Jacobs, F. (Hrsg.): *Manufacturing planning and control for supply chain management*. New York, NY: McGraw-Hill/Irwin 2011.
- Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. München: Hanser 2014.