

Simulation der Einplanung der terminkritischen Montage von Abfüllanlagen am Beispiel der Krones AG

Simulation of planning of time-critical assembly of bottling machines based on example of Krones AG

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

Faruk Savasci, Krones AG, Neutraubling (Germany), faruk.savasci@krones.com.

Abstract: Many companies need to make the best possible use of their production areas. For others, meeting predetermined customer due dates is critical. Few companies have to meet both requirements simultaneously. One example is the final assembly at Krones AG. An extensive simulation study identified potential for improvement. In some planning problems, preferring orders due to buffer time proves to be advantageous. In others, avoiding unused space is better. This project is to be continued with the development of a simulation-based planning program.

1 Einleitung

In einigen Unternehmen sind Aufträge mit sehr großen Platzbedarfen zu produzieren. Trotz sehr hohen Investitionen in geeignete Hallen stellt der verfügbare Platz einen wesentlichen Engpass dar. Ein Beispiel ist die in diesem Beitrag betrachtete Endmontage von Abfüllanlagen bei der Krones AG in Neutraubling, dem Weltmarktführer in dem Bereich der Getränkeindustrie.

Der generelle Ansatz, sicher auch bei anderen Unternehmen mit vergleichbaren technologischen Restriktionen, ist die Einplanung der Halle durch Planer. So wie bei der Krones AG auch, dürften Unternehmensleitungen zentrale Kennzahlen wie vor allem Durchlaufzeiten und Termineinhaltung als stark verbesserungswürdig ansehen. In den letzten Jahren waren, bei Krones, stets wenigstens 21% der Aufträge verspätet. Verspätungen führen zu signifikanten Konventionalstrafen. Außerdem unterminieren ihr Auftreten das Ziel von Krones, jede Anlage termingerecht in Betrieb zu setzen. Bei vielen Aufträgen wurden nur deswegen Verspätungen vermieden, da in den meistens langen Produktionsprozessen durch Maßnahmen wie Überstunden Prozessbeschleunigungen vorgenommen worden sind. Damit ist das Produktionsergebnis im Hinblick auf die Termineinhaltung nicht repräsentativ für die

Planungsgüte. Im Fall von Krones wurde festgestellt, dass ein Planer in erster Linie technologische Randbedingungen, wie vor allem die Platzbeschränkung berücksichtigt.

Krones wollte nun genauer wissen:

- Wie gut ist die Planungsgüte tatsächlich?
- Wie gut ist eine Planung, bei der (vor allem) nach Terminen gesteuert wird?

Die angesprochenen Abläufe verhindern eine Analyse der Planung. Daher sollten diese Fragen durch eine Simulationsstudie beantwortet werden. Eine geeignete wurde aufgesetzt und deren Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt. Diese werfen weitere Fragen auf, die in einer weiteren Untersuchung in naher Zukunft beantwortet werden sollen.

Dieser Artikel ist wie folgt strukturiert. Zunächst werden komprimiert einige Literaturquellen zur Simulation im Allgemeinen sowie zur Einplanung von Aufträgen in einer Werkstatt, ebenfalls im Allgemeinen, genannt. In den folgenden beiden Abschnitten wird die Produktion und das bisherige Vorgehen erläutert. Dem schließt sich die Darstellung der Simulationsuntersuchung an. Entscheidend ist das bei Krones entwickelte Simulationssystem. Die erzielten Ergebnisse werden danach vorgestellt. Das Projekt als Ganzes wird zusammengefasst und die geplanten weiteren Arbeiten werden genannt.

2 Literaturüberblick

Solche Unternehmen müssen folglich planen, wo eine Anlage montiert werden soll und in welcher Reihenfolge diese in die Werkshalle eingelastet werden. In der Literatur finden sich zahlreiche Arbeiten zur Reihenfolgeplanung wie in (Herrmann, 2011) oder (Pinedo, 2016) und zur Layout-Planung wie in (Drira, et al., 2007). Bei Kombinationen von beiden Problemen dominiert entweder die Reihenfolgeplanung oder die Layout-Planung. Ein Beispiel ist die Projektplanung bei Schiffen in (Ge & Wang, 2020), bei denen ein gutes Layout am wichtigsten ist. Bei der hier betrachteten Klasse von Problem handelt es sich nicht um Projekte, sondern um voneinander unabhängige Einzelmontageaufträge.

Im Hinblick auf die Literatur zur Simulation für diese Arbeit sei auf die Tagungsbände der alle zwei Jahre stattfindenden Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) hingewiesen. Besonders relevant für diese Untersuchung waren (März, Krug, Rose, & Weigert, 2010) und die Beschreibung einer Ablaufsimulation in (Mayer, et al., 2020).

3 Montageprozess

Die Krones AG mit Hauptsitz in Neutraubling, Deutschland beschäftigt weltweit circa 15000 Mitarbeiter. Sie produziert Komponenten, Linien und Anlagen für Getränke und Liquid Food seit 1951, ist der Branche des Maschinen- und Anlagenbaus zugeordnet und ist führender Hersteller in der Verpackungs- und Abfülltechnik. Hierbei deckt das Unternehmen jeden Prozessschritt der Produktion ab, angefangen bei der Produkt- und Behälterherstellung über die Abfüllung und Verpackung hin zu Materialfluss und Recycling der Behälter. Eines der letzten Schritte bildet die Endmontage von Abfüllmaschinen. Hierfür nutzt Krones die Werkshalle 5 die

ausschnittsweise in Abbildung 1 dargestellt ist, und 5 Füller in der finalen Endmontageposition zeigt. Die nutzbare Fläche ist schematisch in der Abbildung 2 angegeben.



Abbildung 1: Werkshalle 5 Endmontage von Abfüllmaschinen mit aktuell zu montierenden Anlagen aus der Fülltechnik

Wegen den großen Abmessungen der hergestellten Maschinen mit Durchmessern von 1,0 m bis 7,2 m hat die Werkshalle 5 eine gesamte Länge von 105 m und eine Breite von 30 m, also eine Gesamtfläche von 3150 m². Wie in der Abbildung 2 dargestellt, ist die Halle durch einen Transportweg längs mittig mit 4 m und einem Transportweg quer außermittig von 3 m Breite geteilt, wodurch vier Einzelflächen zur Einplanung von Anlagen zur Verfügung stehen. Zwei Nutzflächen sind 1008 m² groß - mit 42 m Länge und 12 m Breite - und die anderen sind 1200 m² groß - mit 50 m Länge und 12 m Breite. Damit ergibt sich insgesamt eine für die Montage nutzbare Fläche von 2208 m². Die restlichen Abschnitte der Werkshalle werden für Bearbeitungsmaschinen reserviert und sind folglich für die Montage nicht nutzbar.

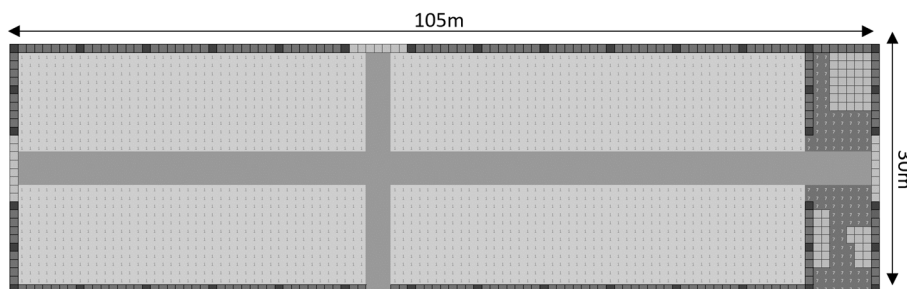


Abbildung 2: Werkshalle 5 in voller Komplexität

Die folgende Beschreibung der Montage diene zur Illustration der Anforderungen an den Platzbedarf, der im Zeitablauf zu und abnehmen kann. Zugleich zeigt es

technische Restriktionen auf, die belegen, dass die Bearbeitungszeiten nicht im Vorhinein bekannt und konstant sind.

Durch die Werkstore kann jeweils immer nur eine Anlage in die Werkshalle ein- bzw. austreten. Bevor mit der Endmontage einer Maschine begonnen wird, wird je nach Maschinengröße ein Endmontageplatz mit ausreichendem Platz festgelegt. Beispielsweise sind in der folgenden Abbildung 3 drei Füller zu montieren. Es handelt sich um ein Fabriklayoutsegment. Die Werkshalle 5 besteht aus fünf solchen Fabriklayoutsegmenten. Auf den Anlieferungsplätzen (i.e. „Anlieferungsspot“ in Abbildung 3) werden alle Unterbaugruppentteile und Materialien aller Maschinen angeliefert. Hier können Materialien von verschiedenen Maschinen und Baugruppen gemischt werden; durch „Baugruppe“ in Abbildung 3 gekennzeichnet.

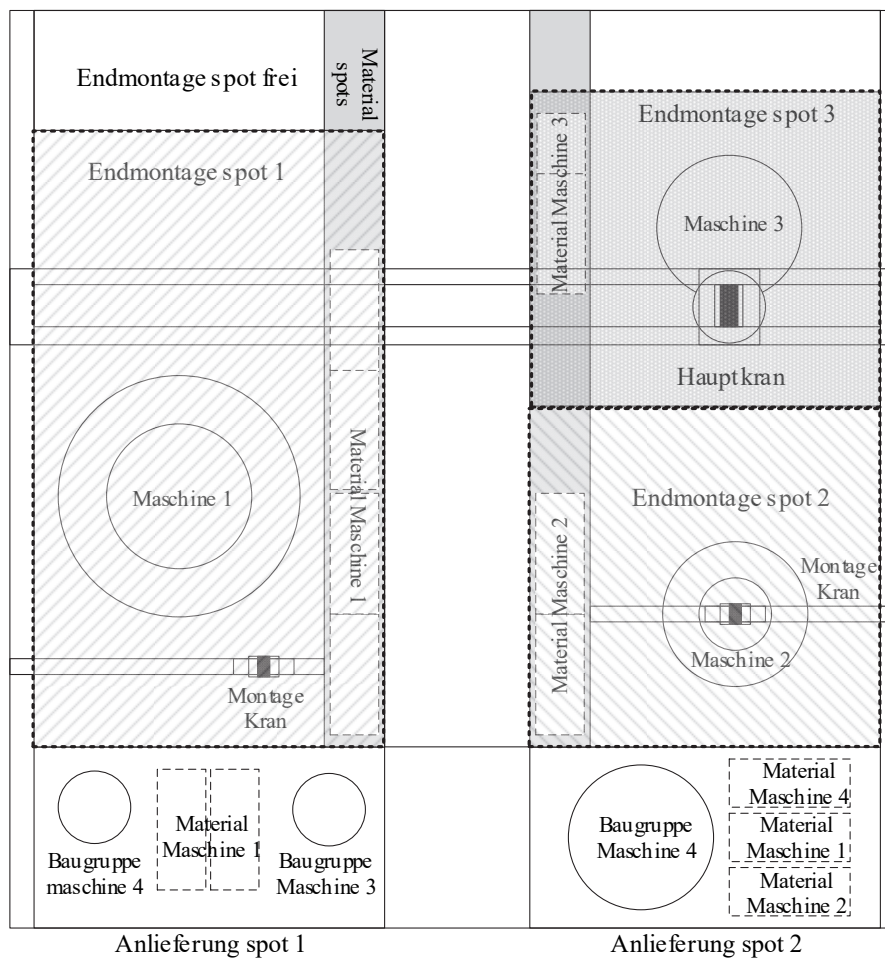


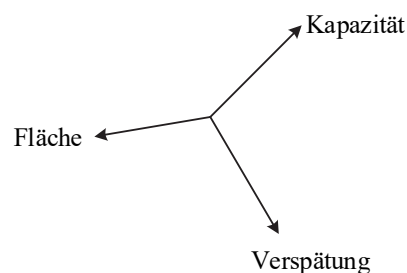
Abbildung 3: Ausschnitt Fabriklayout der Endmontage der Fülltechnik

Diese Außenanlieferungsplätze sind begrenzt, können aber von jedem Maschinen- und Materialtyp genutzt werden, bis die Platzkapazität der Plätze erreicht ist.

Die Unterbaugruppen und Materialien werden in zwei Gruppen von Stammmaterialtypen aufgeteilt. Die erste Gruppe von Baugruppen kann aufgrund von Konstruktion und / oder Gewicht nur mit dem Hauptkran in die Fabrikanlage gehoben werden (s. Abbildung 3 Materialien mit durchgezogenen Randlinien). Meistens handelt es sich bei diesen Teilen um Hauptmaschinenteile. Die zweite Gruppe von Materialien kann von Bedienern an ihren Ziel-Materialplatz gebracht werden (s. Abbildung 3 Materialien mit gestrichelten Umrandungslinien). Hier handelt es sich dabei um Montageteile, die in Wagen oder Behältern sortiert sind. Diese Teile können mit Hilfskränen an ihren endgültigen Platz in der Maschine gehoben werden und werden einer einzelnen Maschine im Innenmaterialplatz zugewiesen. Diese Indoor-Materialspots sind entsprechend dem Endmontageplatz räumlich fixiert und sind individuell für jede Maschine. Nach Beendigung des letzten Montagevorgangs kann die komplette Maschine nur noch mit dem Hauptkran aus der Werksanlage transportiert werden. Der Hauptkran und die Hilfskräne arbeiten auf unterschiedlichen Ebenen, so dass eine Blockierung nicht möglich ist. Hilfskräne befinden sich entweder auf der rechten oder auf der linken Seite der Werkshalle und können an jeder Seite nicht aneinander vorbeifahren.

4 Bisheriges Vorgehen durch einen Planer

Nach der jahrelangen Erfahrung eines Planers besteht ein Zielkonflikt zwischen der Minimierung der ungenutzten Fläche in der Werkshalle 5, der Minimierung der Anzahl an eingesetzten Mitarbeitern und der Minimierung der Verspätung. Dies führt zu dem nebenstehenden Trilemma der Ablaufplanung; für Weiteres sei auf (Herrmann, 2011) verwiesen.



In 2020 wurden 145 Maschinen montiert und in den nächsten Jahren ist mit einer eher höheren Anzahl zu rechnen. Die Bearbeitungsdauern der Montageaufträge schwanken zwischen 6 Wochen und 19 Wochen mit einem Mittelwert von 10.24 Wochen und einer Streuung von 2.5 Wochen. Wochen sind auch die generellen Betrachtungsperioden; zum Ende einer Woche verlassen die Anlagen die Halle. Geplant wird stets zu Beginn einer Woche. Der Arbeitsvorrat umfasst 12 Wochen.

Im Kern erfolgt die Planung bei Krones derzeit durch das folgende Vorgehen:

Zu Beginn jeder Woche kann ein Auftrag in die Werkshalle eingeplant werden, sofern die benötigte Hallenfläche, ohne Umstellung von bereits in der Halle sich befindenden Anlagen, zur Verfügung steht. Als Datengrundlage verwendet ein Planer ein ausgedrucktes Layout der Werkshalle, in dem die bisher eingeplanten Anlagen eingezeichnet sind. Die Anlagendaten wie Länge, Breite, Kundentermin befinden sich in dem SAP System von Krones. Ist ein geeigneter Platz für eine Anlage gefunden worden, so wird diese auf dem allgemein verfügbaren Layout der Werkshalle für die Montagedauer sichtbar markiert. Je nach Größe der Anlagen werden diese zuerst eingeplant gefolgt von Kleineren. Auch werden lange Montagedauern kürzeren gegenüber bevorzugt.

5 Simulationsstudie

Sowohl verschiedene Reihenfolgen der Belegung der Werkshalle 5 von einem der beiden Planer bei der Krones AG wie auch eine durch die Kürzeste Pufferzeitregel (KPZ-Regel) bestimmte Reihenfolge sollen simulativ analysiert werden. Ein nach der Literatur etabliertes Mittel für eine solche Analyse ist eine Ablaufsimulation, s. beispielsweise (Mayer, et al., 2020), für die die Werksleitung sich entschied. Konkret soll die Positionierung der Anlagen nachgestellt werden. Ferner werden – im simulierten Ablauf – die Anlagen für die Dauer der Montage eingeplant und verlassen dann die Werkshalle wieder. Das Projekt folgt dem Vorgehen in (Mayer, et al., 2020) und gliederte sich in die Phasen Analyse, Daten, Modellierung, Verifikation und Validierung (V&V) des Modells, Experimentplanung, -durchführung, -bewertung und Änderungen sowie Lösung aufbereiten.

Für die Simulationsstudie wurden zunächst gängige kommerziell verfügbare Simulationstools wie Plant Simulation von Siemens gegenüber einer Eigenentwicklung evaluiert. Die Tools erlauben umfangreiche Visualisierungen der Abläufe. Mit Ihnen lässt sich jedoch nicht der Entwicklungsaufwand zur Steuerung der Einplanung zufällig eintreffender Kundenaufträge in die Werkshalle gegenüber einer Eigenentwicklung sehr signifikant reduzieren. Außerdem sind hohe Investitionskosten für die Anschaffung eines solchen System, für Schulungsmaßnahmen usw. erforderlich.

Konkret wurde die Ablaufsimulation in Excel unter Nutzung der Programmiersprache VBA implementiert. Dabei repräsentiert ein Excel-Blatt eine Belegung der Werkshalle 5. Wie bereits in Abbildung 2 dargestellt wurde, repräsentiert jede dort angegebene Zelle eine tatsächliche Fläche über 1 m² in der Werkshalle. Eine 0 bedeutet ein ungenutzter Platz und eine 1 eine Belegung durch eine Anlage. Bestandteile wie Büroflächen, blockierte Flächen, Säulenflächen, Wandflächen, Türflächen, Torflächen, Fläche von Durchgangswegen oder Auftragsflächen lassen sich beispielsweise durch zweistellige Ziffern größer als 80 darstellen.

Eine Abfüllanlage mit allen im Zeitablauf (maximal) benötigten Flächen wird durch das kleinste Rechteck in einem Excel-Blatt dargestellt, welches die benötigte Fläche enthält; wie bereits genannt, werden die Länge und Breite einer Anlage aus dem SAP System von Krones entnommen. Eine Repräsentation einer konkreten Hallenbelegung ist in Abbildung 4 visualisiert; jede Graustufe steht für eine spezifische Anlage.

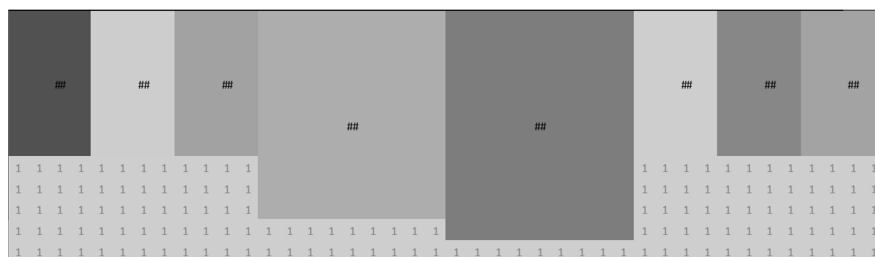


Abbildung 4: Abstraktion einer eingeplanten Werkshalle 5 mit farbigen Flächen für Anlagen.

Für die Simulation wird für jede Woche (Periode) des Simulationszeitraums ein solches Blatt erzeugt. Ausgangspunkt ist ein Workload für den kompletten Simulationszeitraum. Ein Beispiel enthält Abbildung 5. Zu jedem Auftrag ist seine Nummer, die Bearbeitungszeit, sein Produktname, die betroffene Halle (für eine Erweiterung der Simulation auf alle Hallen von Krones), seine Länge und Breite, eine etwaige Rotation sowie sein frühester möglicher Starttermin bzw. Freigabetermin (i.e. release date) und sein Soll-Endtermin (i.e. due date) angegeben.

Order ID [#]	Processing time [period]	Product [#]	Production hall [#]	Product width [unit]	Product length [unit]	Product rotation R09	Release date [period]	Due date [period]
1001	14	1	1	12	12	N	1	5
1002	15	2	1	13	12	N	1	6
1003	13	3	1	10	12	N	1	5
1004	12	4	1	7	9	N	1	4
1005	12	5	1	7	9	N	1	4
1006	13	6	1	11	12	N	1	5
1007	12	7	1	7	9	N	1	5
1008	10	8	1	8	11	N	1	3

Abbildung 5: Beispielhafter Workload

Gemäß einer Einplanungs-Reihenfolge, die von einem Planer oder durch die KPZ-Regel erzeugt wurde, werden die Anlagen bzw. Aufträge nacheinander wie folgt in die Werkshalle 5 eingelastet. Zu einem einzulastenden Auftrag wird die Produktionsfläche von links nach rechts und danach von oben nach unten solange durchsucht, bis eine hinreichend große freie Fläche gefunden wurde. Diese muss auch in den kommenden Wochen frei sein, da eine Einplanungs-Reihenfolge nicht zwingend nach den Freigabeterminen sortiert ist. Im positiven Fall erfolgt die Belegung, und zwar so weit links-oben wie möglich.

Row ID [#]	Order ID [#]	Worklist [sequence]	Processing time [period]	Product [#]	Production hall [#]	Product width [unit]	Product length [unit]	Product rotation R090	Release date [period]	Due date [period]	Starting date [period]	End date [period]	Hall distance length [unit]	Hall distance width [unit]	Simulation time [second]
1001	1001	1001	14	1	1	12	12	N	1	5	1	14	2	2	1
1002	1002	1002	15	2	1	13	12	N	1	6	1	15	2	6	3
1003	1003	1003	13	3	1	10	12	N	1	5	1	13	2	10	1
1004	1004	1004	12	4	1	7	9	N	1	4	1	12	2	14	2
1005	1005	1005	12	5	1	7	9	N	1	4	1	12	2	23	2
1006	1006	1006	13	6	1	11	12	N	1	5	1	13	2	32	2
1007	1007	1007	12	7	1	7	9	N	1	5	1	12	2	36	2
1008	1008	1008	10	8	1	8	11	N	1	3	1	10	2	40	2

Abbildung 6: Beispiel für ein Ergebnis eines simulierten Ablaufs

Durch die X- und Y-Koordinaten der linken oberen Ecke der Anlagenfläche und der Information über eine etwaige Drehung ist die Belegung einer Anlage eindeutig festgelegt. Vermerkt wird ferner als Ist-Fertigstellungstermin (später) die Woche, in der die Anlage die Halle verlässt. Dies führt beispielsweise zu dem in Abbildung 6 angegebenen Ergebnis.

Nach einem erfolgreichen Simulationslauf werden die folgenden Kennzahlen für eine Analyse (im Abschnitt Ergebnisse) berechnet:

- Für jeden Auftrag i seine Verspätung (V_i) als Differenz aus seinem Ist-Fertigstellungstermin minus seinem Soll-Endtermin, sofern eine Verspätung vorliegt. Anderenfalls ist sie 0.
- Für jede Woche t wird die belegte Fläche berechnet und kumuliert (A_t). Die Differenz aus der Hallenfläche (R_t) und der belegten Fläche (A_t) ist die freie Fläche (S_t); in der Woche t .
- Die Gesamtbearbeitungszeit (Z) zu einem Workload ist der späteste Ist-Fertigstellungstermin.

6 Ergebnisse

Die Grundlage für die Simulationsexperimente sind die Auftragsdaten aus dem Jahr 2020. Die direkte Verwendung dieser Daten führte zu einer sehr hohen Streuung der oben angegebenen Kennzahlen. Daher war es nicht möglich, statistisch signifikante Ergebnisse zu erkennen. Um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen, wurde die Folge an eingehenden Aufträgen über die einzelnen Wochen genauer untersucht. Es zeigte sich, dass es Wochen gibt, bei denen die Endtermine leicht eingehalten werden können, weil die verfügbare Zeit zur Bearbeitung – also Endtermin - möglicher Startzeitpunkt – hoch gegenüber der Nettobearbeitungszeit ist. Demgegenüber ist in anderen Wochen dieses Verhältnis aus verfügbarer Zeit und Nettobearbeitungszeit näher an eins oder sogar kleiner als eins; im zuvor betrachteten Fall ist der Quotient deutlich höher als 1.

Tabelle 1: Kennzahlen zu den beiden Klassen von Arbeitsvorräte (Workloads).

Arbeitsvorrat (Workload)	WL1	WL2
Anzahl an Aufträgen	50	50
Bearbeitungszeit: Minimum in [Wochen]	6	8
Bearbeitungszeit: Maximum in [Wochen]	17	19
Bearbeitungszeit: Mittelwert in [Wochen]	9,1	11,4
Bearbeitungszeit: Standardabweichung in [Wochen]	2,0	2,5
Produktbreite: Minimum in [Meter]	3	3
Produktbreite: Maximum in [Meter]	15	18
Produktbreite: Mittelwert in [Meter]	7,2	8,5
Produktbreite: Standardabweichung in [Meter]	2,7	2,9
Produktlänge: Minimum in [Meter]	3,0	3,0
Produktlänge: Maximum in [Meter]	12	12
Produktlänge: Mittelwert in [Meter]	8,9	10,2
Produktlänge: Standardabweichung in [Meter]	2,1	2,0

Soll-Fertigstellungstermin: Minimum in [Wochen]	11	11
Soll-Fertigstellungstermin: Maximum in [Wochen]	23	23
Soll-Fertigstellungstermin: Mittelwert in [Wochen]	14,3	14,3
Soll-Fertigstellungstermin: Standardabweichung in [Wochen]	2,8	2,8

Basierend auf dieser Analyse wurden zwei Klassen von Arbeitsvorräten gebildet. Jede besteht aus einer höheren Anzahl an Mengen an Aufträgen. Jede dieser einzelnen Mengen an Aufträgen wird von einem Planer und der KPZ-Regel geplant. Über alle Mengen an Aufträgen liegen die in der Tabelle 1 angegebenen Kennzahlen vor. Beide haben die gleichen Kennzahlen für die Endtermine. Deswegen bewirken höhere Bearbeitungszeiten bei der durch WL2 bezeichneten Klasse eine – im Sinne der obigen Bemerkung – kritischere Terminalsituation. Zudem sind die benötigten Flächen für die Aufträge in WL2 etwas höher.

Die durch die Planer und die KPZ-Regel erzielten Ergebnisse führen zu den in Tabelle 2 angegebenen Kennzahlen.

Tabelle 2: Kennzahlen zu den beiden simulierten Planungen.

	WL1		WL2	
	Planer	KPZ	Planer	KPZ
Kumulierte Verspätung in [Wochen]				
Minimum	71	76	287	266
Mittelwert	74,3	77,6	290,5	270
Maximum	78	75	294	304
Standardabweichung	2,37	2,76	3,50	2,70
Kumulierte freie Fläche in [Meter ²]				
Minimum	18920	21128	26989	24781
Mittelwert	20392	24808	29197	25885
Maximum	21128	27752	31405	26989
Standardabweichung	1040,86	2753,86	2208	1104
Gesamtbearbeitungszeit in [Wochen]				
Minimum	23	24	35	34
Mittelwert	23,6	25,6	36	34,5
Maximum	24	27	37	35
Standardabweichung	0,47	1,25	1,00	0,50
Durchschnittliche freier Fläche je Woche in [Meter ²]				
Minimum	822,61	880,33	771,11	728,85
Mittelwert	861,09	963,55	809,95	749,98
Maximum	880,33	1027,85	848,78	771,11
Standardabweichung	27,21	61,69	38,83	21,13

Verantwortlich für die Unterschiede ist, dass ein Planer Flächenanforderungen gegenüber Termineinhaltungsmöglichkeiten bevorzugt. Dies ist bei unübersichtlichen Mengen von Aufträgen eher der Fall. Umgekehrt gibt es Situationen, in denen der Planer deswegen bessere Ergebnisse erzielt, weil er durch eine bessere Nutzung der Werkshalle 5 eine schnellere Bearbeitung der Aufträge erreicht. Hinweis: die Angabe der durchschnittlichen Fläche bezieht sich auf die Gesamtbearbeitungszeit.

7 Zusammenfassung

Die Ressourcenbelegungsplanung in der Literatur berücksichtigt vor allem eine dominante Randbedingung wie die begrenzte Kapazität der Maschinen. Anforderungen an die Nutzung der begrenzten Fläche für die Montage von Anlagen wird in anderen Publikationen behandelt. Verantwortlich dafür sind unterschiedliche Vorgehensweisen zu diesen beiden Problemklassen.

Für die Endmontage bei der Krones AG sind beide Planungsprobleme simultan zu lösen. Dazu werden zwei erfahrene Planer eingesetzt.

Zur Analyse der Verbesserungsmöglichkeiten wurde ein Simulationsprojekt durchgeführt. Die bisherigen Simulationsexperimente zeigen, dass die Planer oft einen guten Ausgleich zwischen der Nutzung der Fläche und der Vermeidung von Verspätungen finden. Ist die Situation unübersichtlich, so liefert eine Bevorzugung der Termineinhaltung bereits durch die kürzeste Pufferzeitregel (KPZ-Regel) bessere Ergebnisse. Die beiden Planer sind daher angehalten, eine Zuteilungsentscheidung durch die KPZ-Regel zu berücksichtigen.

Die bisherigen Messungen belegen einen signifikanten Unterschied in der Nutzung der freien Flächen. Daher soll in der nächsten Projektphase das dadurch mögliche Potential an besseren Einlastungsentscheidungen untersucht werden. Dazu sollen Kombinationen aus Regeln zur Termineinhaltung mit Regeln zur Vermeidung von ungenutzter Fläche konzipiert und simulativ untersucht werden.

Literatur

- Drira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control* Volume 31 Issue 2, pp. 255-267.
- Ge, Y., & Wang, A. (2020). Spatial scheduling for irregularly shaped blocks in shipbuilding. *Computers & Industrial Engineering* Volume 152 Issue November 2020, pp. 1–14.
- Herrmann, F. (2011). *Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung*. Regensburg, Germany: Vieweg+Teubner.
- März, L., Krug, W., Rose, O., & Weigert, G. (2010). *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Springer.
- Mayer, G., Pöge, C., Spieckermann, S., & Wenzel, S. (2020). *Ablaufsimulation in der Automobilindustrie*. Springer Verlag.
- Pinedo, M. (2016). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*, Fifth Edition. New York, USA: Springer Science+Business Media.