

Nutzung der ereignisdiskreten Simulation für die operative Produktionsplanung in der mehrstufigen Einzel- und Kleinserienfertigung

Usage of Discrete Event Simulation for Operative Production Planning in Multilevel Job-Shops

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Ernst-August Stehr

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh
apl. Prof. Dr.-Ing. Volker Stich

Tag der mündlichen Prüfung: 02. Mai 2022

„Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar“

Danksagung

Zunächst möchte Peter Ortlinghaus und Dr. Bastian Franzkoch von der Maschinenbau AG danken, die die Entwicklung eines neuen Systems zur Produktionsplanung ermöglicht haben. Darüber hinaus haben Sven Döring und André Wiesner mit intensiven Diskussionen und ihren Anmerkungen aus Sicht der Fertigungssteuerung wesentliche Impulse beigesteuert.

Weiterhin danke ich Herrn Dr. Klaus Schricker für viele anregende Diskussionen und meinen Eltern, die mich immer ermutigt haben die Dissertation fertig zu stellen.

Zuletzt möchte ich auch Herrn Prof. Dr. Schuh sowie Herrn Prof. Dr. Stich und meinem Betreuer, Tobias Schröder danken.

Ilmenau, den 26.Juni 2022

Ernst-August Stehr

Zusammenfassung

Im globalen Wettbewerb müssen sich Unternehmen differenzieren. Eine Möglichkeit dazu besteht in kurzen Lieferzeiten und hoher Liefertermintreue. Umfragen belegen die überragende Bedeutung dieser Kennzahlen für die Produktion und insbesondere die Fertigungssteuerung.

Diese Ziele können einerseits durch organisatorische, prozessuale und technologische Maßnahmen erreicht werden. Die getaktete Fließfertigung und ihre Erweiterungen Lean Production und Variantentaktfertigung haben enorme Fortschritte erzielt. Diese Ansätze können jedoch nicht ohne weiteres auf den Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung übertragen werden, da sich sehr unterschiedliche Produkte die gleichen Anlagen teilen. Deshalb kommen hier vermehrt Softwaresysteme zum Einsatz. Dies begann mit ERP-Systemen (Transaktionsdaten, Abrechnung) und entwickelte sich über MRP (Materialplanung ohne Betrachtung von Kapazitäten) zu APS-Systemen weiter (Simultane Planung der wesentlichen Restriktionen). Letztere reagieren jedoch sehr empfindlich auf Produktionsabweichungen, so dass sich die genannten Liefertermine bereits bei geringen Störungen massiv verändern. Eine hohe Liefertermintreue wird damit nicht erreicht.

Andererseits wurde seit den 1960-ern die ereignisdiskrete Simulation (EDS) zur Auslegung von Produktionssystemen unter starken Unsicherheiten eingesetzt. In dieser Arbeit wird der grundsätzliche Algorithmus so erweitert, dass er in der mehrstufigen Einzel- und Kleinserienfertigung benutzt werden kann. Dies setzt die gleichzeitige Betrachtung von Personal-, Maschinen- und Materialverfügbarkeit voraus. Die Neuentwicklung ist erstmals im Bereich der EDS in der Lage, die Fertigung von mehreren Komponenten für einen Montageprozess nicht nur abzubilden, sondern zu koordinieren.

Dieser Algorithmus wurde mit einem typischen APS-Algorithmus verglichen. Dazu wurde ein solcher implementiert und mit dem neuen Ansatz auf das gleiche, reale Produktionsprogramm eines mittelständischen Maschinenbauers angewandt.

Dabei sind die Planungsergebnisse im Vergleich zu der Referenzimplementierung hinsichtlich Bestandshöhe, Durchsatz (7%) und Auslastung (25%) besser und die Planung erfordert weniger als 5% der Zeit. Ein Kernpunkt des Benchmarks ist die systematische Untersuchung, wie empfindlich die Algorithmen auf Störungen reagieren. Dazu wurden Produktionsabweichungen hinsichtlich Beschaffungsdauern von Einkaufsteilen, Kapazitäten und auftragsbezogenen Störungen in 4 verschiedenen Niveaus simuliert. Die EDS erreicht in allen Szenarien eine etwa 20%-Punkte höhere Termintreue als die herkömmlichen Algorithmen und einen höheren Durchsatz.

Daneben wurden noch Untersuchungen angestellt, wie stark sich unterschiedliche Störungsarten auf die Terminabweichung auswirken und welche Pufferstrategien am besten geeignet sind. Die Unterplanung der Kapazitäten hat sich dabei in allen Algorithmen als sinnvoll erwiesen, die sinnvolle Nutzung von Zeitpuffern erfordert dagegen Veränderungen an der Planungslogik.

Summary

Manufacturing companies face stiff competition in global markets. One way of differentiating themselves is by fast and reliable delivery of goods. Studies confirm the paramount importance of these in the manufacturing control departments of the industry.

These objectives are either accomplished by technological, processual or organisational changes. The paced assembly lines of the automotive industry and its successors of Lean production and mixed model assembly have achieved tremendous successes in supplying the world with its goods. However, these methods cannot easily be transferred to a job shop with single products or small series as many very different products have to share the same factory.

An alternative approach is the usage of software for production planning. This started with ERP (transactional and accounting) via MRP (material planning without capacities) to APS (simultaneous planning of all relevant factors). The last option however reacts very nervous to minor production deviations, leading to massive changes in the forecasted delivery times. Discrete Event Simulation (DES) has been used since the 1960's to plan factories under high levels of uncertainty. This thesis extends this basic algorithm to allow the operative planning of multi-level job-shops. Therefore, simultaneously personal-, machine- and material availability has to be considered. The developed algorithms is for the first time able to coordinate order networks of multiple components for one assembly instead of just reacting to the manufacturing progress of the parts.

The resulting algorithm was benchmarked against a version of a typical APS algorithm. The latter was re-implemented and tested against the new DES for the same real-world manufacturing data set. Results indicate that DES is slightly better in terms of utilization, throughput and inventory (5-10%) but much faster (95%) in the calculation of the plan. A key analysis was the simulation of production deviations and their influence on the generated plans.

Again DES had in all scenarios a delivery reliability that was approx. 20%-points better than the reference. Further experiments show the impact of different categories of deviations (e.g. capacity, deliveries of externally sourced parts, sequencing errors) as well as that of planned buffers.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Forschungsfrage	4
1.3	Wissenschaftstheoretische Einordnung	6
1.4	Struktur dieser Untersuchung.....	8
2	Terminologie und Eingrenzung der Untersuchung	9
2.1	Mehrstufige Einzel- und Kleinserienfertigung	9
2.1.1	Besonderheiten der Einzel- und Kleinserienfertigung	9
2.1.2	Stufenzahl in der Produktion	10
2.1.3	Informationstechnische Modellierung der Produktion.....	11
2.2	Formales Modell der Produktion und ihrer Randbedingungen	13
2.2.1	Abhängigkeiten von der Materialverfügbarkeit	13
2.2.2	Abhängigkeiten von Übergangszeiten und Maschinenkapazitäten	14
2.2.3	Abhängigkeiten von der Personalverfügbarkeit.....	15
2.2.4	Freiheitsgrade in der Produktion	16
2.2.5	Zwischenfazit	18
2.3	Kennzahlen	19
2.3.1	Logistische Kennzahlen	19
2.3.2	Resilienz, Robustheit und Stabilität der Planung.....	21
2.4	Operative Produktionsplanung	22
2.4.1	Einordnung in die Unternehmensplanung	22
2.4.2	Hierarchische Planung	23
2.4.3	Aachener PPS-Modell.....	24
2.4.4	Internet of Production.....	25
2.4.5	Alternative Einordnungen.....	27
2.5	Abgrenzung von Simulation und Planung	27
2.5.1	Simulation	27
2.5.2	Ereignisdiskrete Simulation.....	27
2.5.3	Planung und Optimierung	28
2.6	Zwischenfazit	28
3	Stand der Erkenntnisse.....	31
3.1	Ansätze zur Festlegung von Terminen.....	31
3.1.1	Theoretische Grundlagen.....	31
3.1.2	Analytische Verfahren	32
3.1.3	Reine Materialverfügbarkeit	33
3.1.4	Reine Kapazitätsverfügbarkeit	35
3.1.5	Kapazitäts- und Materialverfügbarkeit.....	36
3.1.6	Ereignisdiskrete Simulation	40

3.1.7	Alternative Prioritätsregelbasierte Verfahren.....	44
3.1.8	Kombinierte Verfahren	45
3.1.9	Zwischenfazit	46
3.2	Benchmarks	48
3.2.1	Bewertung der Planungsqualität	49
3.2.2	Bewertung der Stabilität und Robustheit der Planung.....	50
3.3	Einbettung in die Prozesslandschaft	51
3.4	Zwischenfazit	52
4	Forschungskonzeption	55
4.1	Inhaltliche Anforderungen	55
4.1.1	Zielsetzung der Arbeit	56
4.1.2	Abgrenzung der Lösung.....	56
4.2	Formale Anforderungen	57
4.3	Methodisches Vorgehen.....	58
4.3.1	Grundsätze der Versuche und Versuchsplanung.....	59
4.3.2	Auswahl der Steuer-, Ziel- und Störgrößen.....	60
4.3.3	Auswahl der Datengrundlagen	61
4.3.4	Grundlagen der Versuchsplanung.....	62
4.3.5	Konkreter Versuchsplan.....	62
4.4	Zwischenfazit	64
5	Prozessmodell	67
5.1	Bedienungskonzept im operativen Einsatz.....	67
5.2	User Interface.....	69
5.2.1	Analyse der Kundenaufträge.....	70
5.2.2	Analyse eines Fertigungsengpasses.....	72
5.2.3	Kapazitätsauswertung.....	73
5.2.4	Optimierung des Tagesprogramms.....	75
5.2.5	Analyse von Verspätungen	77
5.3	Zwischenfazit	78
6	Datenmodell	81
6.1	Eingaben und Ausgaben der Produktionsplanung	81
6.1.1	Eingaben aus dem ERP-System.....	81
6.1.2	Kapazitätsdaten	82
6.1.3	Ausgaben in das ERP-System	82
6.2	Klassendiagramm	82
6.2.1	Die Klasse Vorgang	84
6.2.2	Die Klasse Belegung.....	84
6.2.3	Die Modellierung der Netzabhängigkeiten	85
6.2.4	Die Klasse Auftrag	85
6.2.5	Die Klassen Netz und Material.....	86

6.2.6	Die Klasse Maschine.....	87
6.3	Begriffe und Bezeichnungen	87
6.3.1	Auftragsnetz, Verwendungsnachweis, Auftrag und Vorgang	87
6.3.2	Kundentermine	88
6.3.3	Vorgabezeiten	88
6.3.4	Maschinenbezogene Daten	88
6.3.5	Vorgangsstatus	89
6.3.6	Termine auf Vorgangsebene	90
6.3.7	Farben und Rückstände	90
6.4	Konkrete SAP-Schnittstelle	92
6.4.1	Berechnung von Materialreservierungen	93
6.4.2	Berechnung von Kundenterminen	94
6.5	Kapazitätsdaten	95
6.6	Formale Validierungskriterien.....	95
6.7	Inhaltliche Validierungskriterien.....	96
6.8	Zwischenfazit	97
7	Erweiterung der Ereignisdiskreten Simulation	99
7.1	Grundsätzlicher Aufbau	99
7.2	Ablauf der ereignisdiskreten Simulation	99
7.2.1	Lebenszyklus eines Vorgangs.....	101
7.2.2	Besonderheiten der Anmeldung	102
7.3	Durchlaufterminierung	103
7.3.1	Besonderheiten der Durchlaufterminierung.....	105
7.4	Berechnung der Vorgangsprioritäten	105
7.5	Personaloptimierung	106
7.6	Auftragsfreigabe	108
7.6.1	Generelle Prinzipien der Auftragsfreigabe	108
7.6.2	Auftragsfreigabe auf Basis des WLD	108
7.6.3	Grundidee der Freigabe auf Basis eines ersten Planungslaufes..	109
7.6.4	Berechnung der ULZ in einem Auftrag	109
7.6.5	Berechnung der ULZ in einem Auftragsnetz	110
7.6.6	Diskussion des Verfahrens	111
7.7	Dynamische Übergangszeiten	113
7.8	Zwischenfazit	114
8	Verifikation und Validierung	115
8.1	Versuchsaufbau	115
8.1.1	Referenzimplementierung JBS.....	116
8.1.2	Varianten des Algorithmus	119
8.1.3	Implementierung der Abweichungssimulation	121
8.1.4	Datenstruktur und Produktionsumgebung	123
8.2	Qualitative Validierung	123

8.2.1	Effekte der Abweichungssimulation	124
8.2.2	EDS-E	125
8.2.3	EDS-A	126
8.2.4	JBS-E	127
8.2.5	JBS-O	128
8.2.6	JBS-B	129
8.2.7	Formale Richtigkeit	130
8.2.8	Zwischenfazit	131
8.3	Quantitative Ergebnisse – Leistungsvergleich.....	131
8.3.1	Vergleich des Durchsatzes.....	132
8.3.2	Vergleich der Auslastung	133
8.3.3	Vergleich der Bestände.....	134
8.4	Quantitative Ergebnisse – Robustheit.....	136
8.4.1	Einfluss des Produktionsabweichungen auf EDS-E	136
8.4.2	Einfluss der Algorithmen	141
8.4.3	Einfluss der Puffer.....	147
8.5	Praktische Validierungsergebnisse	151
8.6	Zwischenfazit	152
9	Fazit und Ausblick	155
9.1	Ausblick.....	157
Literaturverzeichnis		159
Anhang		167

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zielsetzung dieser Arbeit	5
Abbildung 2: Mehrstufige Produktion	11
Abbildung 3: Auftragsnetz in der Produktion.....	13
Abbildung 4: Zeitanteile in einem Arbeitsgang am Beispiel von B1	14
Abbildung 5: Qualifikationsmatrix und Maschinenbelegung	16
Abbildung 6: Modell der Fertigungssteuerung nach LÖDDING	17
Abbildung 7: Logistische Kennzahlen nach LÖDDING	19
Abbildung 8: Gegenstände taktischer und operativer Planung nach WÖHE.....	23
Abbildung 9: Aachener PPS-Modell nach Schuh und Stich.....	24
Abbildung 10: Internet of Production	26
Abbildung 11: Job-based-Sequencing	38
Abbildung 12: Layout in Plant Simulation	41
Abbildung 13: Vergleich der Verfahren	47
Abbildung 14: Prozessablauf der Fertigungsplanung	67
Abbildung 15: Startbildschirm - Bereichsübersicht	69
Abbildung 16: Kundenauftragsprüfung durch die Steuerung	70
Abbildung 17: Erklärung eines Arbeitsganges	72
Abbildung 18: Kapazitätsanalyse.....	73
Abbildung 19: Ressourcenauslastung	75
Abbildung 20: Qualifikationsmatrix	76
Abbildung 21: Abstimmung der Auftragsreihenfolge.....	77
Abbildung 22: Historie zu einem Kundenauftrag.....	77
Abbildung 23: Klassendiagramm	83
Abbildung 24: Ablauf der EDS	100
Abbildung 25: Durchlaufterminierung	104
Abbildung 26: Qualifikationsmatrix	106
Abbildung 27: Neue Auftragsfreigabe in einem Auftragsnetz	110
Abbildung 28: Einplanung eines Arbeitsganges	119
Abbildung 29: Ablauf der Abweichungssimulation	121
Abbildung 30: Auftragsnetz mit EDS-E.....	125

Abbildung 31: Auftragsnetz mit EDS-A.....	127
Abbildung 32: Fehlende Umplanungsmöglichkeiten.....	129
Abbildung 33: Planung in den ersten 2 Wochen bei JBS-O	130
Abbildung 34: Umsatzverlauf verschiedener Algorithmen	132
Abbildung 35: Bestände nach Algorithmus.....	134
Abbildung 36: Termintreue EDS-E mit verschiedenen Szenarien im Zeitverlauf	137
Abbildung 37: Liefertermintreue EDS-E nach Toleranzen	138
Abbildung 38: Einfluss der Abweichungsart.....	140
Abbildung 39: Einfluss der Abweichungsart auf EDS-E.....	141
Abbildung 40: Termintreue im Zeitverlauf nach Algorithmus	142
Abbildung 41: Verschiedene Algorithmen im Szenario 60-30-60.....	143
Abbildung 42: Einfluss stochastischer Effekte	144
Abbildung 43: Vergleich der Termintreue von Algorithmen	145
Abbildung 44: Kennzahlen der Algorithmen	146
Abbildung 45: Einfluss der Pufferstrategien numerisch	148
Abbildung 46: Pufferstrategien im Zeitverlauf bei EDS-A	149
Abbildung 47: Auswirkungen von Puffern.....	150
Abbildung 48: Termintreue im praktischen Einsatz bei der Maschinenbau AG	151

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel für eine Stücklistenstruktur	12
Tabelle 2: Beispiel für eine Arbeitsplanstruktur.....	12
Tabelle 3: Versuchsplan	64
Tabelle 4: Maßnahmen zur Anpassung des Produktionsplans.....	79
Tabelle 5: Vorgangsstatus und Termine	89
Tabelle 6: Farbdefinitionen	91
Tabelle 7: SAP-Schnittstellendateien	92
Tabelle 8: Eing geplante Minuten nach Algorithmus.....	133
Tabelle 9: Mittlere Bestandsdauer	135
Tabelle 10: EDS-E Kennzahlen in verschiedenen Szenarien	139
Tabelle 11: Untersuchte Pufferstrategien	147

Abkürzungsverzeichnis

APS	Advanced Planning System
ERP	Enterprise Ressource Planning (System)
EDS	Ereignisdiskrete Simulation
IT	Informationstechnologie
JBS	Job-Based-Sequencing
MES	Manufacturing-Execution-System
MRP	Material-Requirements-Planning
PPS	Produktionsplanung und -Steuerung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Das produzierende Gewerbe trägt in allen entwickelten Ländern einen beträchtlichen Teil zur wirtschaftlichen Leistung und Beschäftigung bei. So hat es (ohne Baugewerbe) in Deutschland im Jahr 2017 einen Anteil von 25,7% (755 Milliarden Euro) an der gesamten Bruttowertschöpfung geleistet und mehr als 8 Millionen Menschen beschäftigt. (Statistisches Jahrbuch Deutschland 2018, 329,359).

Im Gegensatz zu vielen Dienstleistungen werden die Erzeugnisse des produzierenden Gewerbes oftmals international gehandelt und müssen damit nicht nur im nationalen, sondern sogar im globalen Wettbewerb bestehen. BAUM bietet verschiedene Erfolgsfaktoren für die Differenzierung am Markt und damit den Erfolg des Unternehmens an. Sein sogenanntes magisches Dreieck enthält die Eckpunkte Zeit, Kosten und Qualität (Baum et al. 2013, S. 114). In der Dimension „Zeit“ wiederum besteht eine Möglichkeit darin, schneller Produkte an den Markt zu bringen („time-to-market“) und andererseits die Lieferzeit („time-to-customer“) zu verringern (Baum et al. 2013, S. 184). Im Rahmen dieser produktionswissenschaftlichen Arbeit wird der zweite Aspekt fokussiert.

Viele Faktoren wie Konstruktion der Produkte, Auslegung des Produktionssystems, Qualität von Mitarbeitern und Lieferanten usw. beeinflussen die Lieferzeiten. Doch diese lassen sich in der Regel nicht kurzfristig ändern, so dass die hauptsächliche Verantwortung für die zuverlässige Erreichung von kurzen Lieferzeiten in der Produktionsplanung und –Steuerung (PPS) zu sehen ist.

SCHUH und STICH definieren diese: „Aufgabe der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist die termin-, kapazitäts- und mengenbezogene Planung und Steuerung der Fertigungs- und Montageprozesse“ (Schuh und Stich 2012, S. 29).

Die Studie „Produktion am Standort Deutschland“ befragte 84 produzierende Unternehmen. Dabei wurde von den logistischen Zielgrößen die Termintreue in 66,9% aller Fälle als Wichtigste genannt, weit vor den nächstplatzierten kostenrelevanten Faktoren wie Bestandshöhe (7,14%) und Herstellkosten (8,33%) (Schuh und Stich 2013). Die gleiche Studie ermittelte auch, dass Unternehmen noch deutliche Defizite in der Datenerfassung sowie deren mangelhafter Aufbereitung für den Menschen sehen. Dies trägt zu dem fehlenden Vertrauen in die Planungsergebnisse bei.

Zusammenfassend ist also die Termintreue – und im Umkehrschluss die zuverlässige Prognose von Lieferterminen – hochgradig relevant für einen großen Teil der Betriebe. Dafür verantwortlich ist zumindest kurzfristig im Wesentlichen die PPS.

Deren Ausprägungen hängen stark von der Produkt- und Produktionsstruktur ab. Viele Handwerksbetriebe können aufgrund ihrer geringen Größe und der überschaubaren Anzahl an Aufträgen mit einfachsten Mitteln ihre Angebotskalkulation durch-

führen und die Leistungserstellung planen. Die praktische Erfahrung zeigt aber auch, wie abhängig die Qualität dieser PPS-Funktion von den handelnden Personen ist.

Die Erstellung von Großprojekten wie Flughäfen, Schiffen oder Industrieanlagen bietet eigene Herausforderungen. Diese werden jedoch dadurch gemildert, dass für jedes Projekt dedizierte Projektleiter – und ggf. ganze Organisationsstrukturen – vorgehalten werden können und die Interdependenzen zwischen den Aufträgen gering sind. Insbesondere bei einer Baustellenfertigung ist der Austausch von Maschinen und Personal zwischen den – oft weit entfernten – Standorten nur die Ausnahme. Darüber hinaus führt gerade der einmalige Charakter dazu, dass die Planung erst im Verlaufe des Projektes und parallel zur Leistungserstellung detailliert wird, da noch keine bestehenden Erfahrungen genutzt werden können.

Dagegen werden in der Industrie jedoch oftmals die gleichen oder zumindest ähnliche Artikel für verschiedene Kunden gefertigt. In dieser Wiederholfertigung wiederum bietet es sich an, die Arbeitsinhalte in Form von Arbeitsplänen und Stücklisten nur einmal zu erstellen und für jeden konkreten Auftrag wiederzuverwenden.

Dabei hat gerade in der Großserien- und Variantenfertigung die Automobilindustrie seit dem 20. Jahrhundert eine Vorreiterrolle übernommen. Von handwerklichen Anfängen entwickelte sich über die Fließfertigung von FORD schließlich die Lean Philosophie, die zuerst bei TOYOTA nach dem zweiten Weltkrieg eingeführt wurde. Dazu gibt es eine unübersehbare Vielfalt an Literatur, beispielhaft sind hier einige Standardwerke genannt (Ōno et al. 2013), (Womack et al. 1990), (Ford und Crowther 2014), (Womack und Jones 2003).

Bei Großserienherstellern werden diese Verfahren der Lean Production oftmals erfolgreich angewandt. Aus Sicht der PPS sind diese durch folgende Eigenheiten gekennzeichnet: Die Montage erfolgt in einer getakteten Fließfertigung. Dabei durchlaufen alle Erzeugnisse dieselben Stationen in der gleichen Reihenfolge und mit einer zumindest sehr ähnlichen Bearbeitungsdauer. Komponenten und Baugruppen werden in der Regel fremdbeschafft und das Produktionsvolumen ist sehr vorhersehbar (Womack et al. 1990).

Diese Prämissen sind in der Einzel- und Kleinserienfertigung nicht gegeben. Hier erfordern die unterschiedlichen Produkte auch eine individualisierte Arbeitsplanung mit wechselnden Stationen. Die relativ geringen Stückzahlen eines einzelnen Artikels erfordern aus Kostengründen, dass sich Artikel mit sehr unterschiedlichen Bearbeitungszeiten und –Folgen die gleichen Maschinen teilen. Durch die verschiedenen Materialflüsse werden diese Anlagen häufig nach dem Verrichtungsprinzip gegliedert, bei dem statt des Materialflusses die Fertigungsverfahren als Gliederungsprinzip dienen. Dies wird als Werkstattfertigung bezeichnet (Schneider et al. 2005, 10ff).

Die Komplexität der PPS wird also durch mehrere Faktoren erhöht.

Im Gegensatz zur Großserienfertigung führen die geringen Stückzahlen pro Artikel und häufige Konstruktionsänderungen dazu, dass es weniger Erfahrungswerte und

mehr Produktionsabweichungen gibt. Weiterhin ist die Wertschöpfungstiefe oftmals höher, so dass die pünktliche Lieferung von Komponenten in der Verantwortung der hausinternen PPS im Gegensatz zu Lieferanten liegt. In einer solchen Werkstattfertigung konkurrieren viele Arbeitsgänge mit deutlich unterschiedlichen Bearbeitungszeiten um die gleichen Maschinen während sich die Bearbeitungsfolgen pro Auftrag unterscheiden.

Im Gegensatz zu Projektfertigern ist die Anzahl an Kundenaufträgen und deren Abhängigkeit von den gemeinsam genutzten Ressourcen wesentlich größer. Dadurch ist es unmöglich, für jeden Auftrag einen Projektleiter zu benennen, der dieses eigenverantwortlich planen und steuern kann.

Software zur Produktionsplanung kann dieses Dilemma lösen. Historisch begann die Entwicklung mit MRP-Systemen (Material Requirements Planning), welche auch in der Großserienfertigung zum Einsatz kommen (Orlicky 1975), (Dickersbach und Keller 2014, S 272 ff.). Diese berücksichtigen keine Kapazitäten, sondern arbeiten mit festen Durchlaufzeiten pro Artikel oder Arbeitsgang, die auf Grund von Erfahrungswerten abgeschätzt werden. In einer verketteten Fließfertigung mit einem grundlegenden Fertigungsprozess ist dies wesentlich einfacher abschätzbar als im Falle von sehr individuellen Produkten. Später kamen sogenannte Advanced Planning and Scheduling-Systeme (APS) sowie Leitstände dazu, welche Kapazitäten betrachten (Schuh und Stich 2012, S. 52).

Ein häufiger Kritikpunkt an diesen Systemen besteht darin, dass die Planung sehr sensibel auf Produktionsabweichungen reagiert. Dies unterminiert das Vertrauen in die Planungsergebnisse (Schuh und Stich 2013). In einer Umfrage unter 106 indonesischen Unternehmen sahen 64% der Befragten die Planungsinstabilität als wesentliches Problem an (Pujawan und Smart 2012). HAUPTVOGEL zeigt an einem Beispiel, dass bereits nach 72 Stunden nur noch die Hälfte der Warteschlange einer Maschine richtig vorhergesagt wird (Hauptvogel 2015, S. 174).

Andererseits wird die ereignisdiskrete Simulation (EDS) oftmals eingesetzt, um die Auslegung von Produktionssystemen zu überprüfen (Simini et. al. 2006). Dabei wird eine Produktion oder Teile davon in einer Software modelliert. Das Ziel dieser Simulationen ist es ein Verständnis für das Verhalten eines Produktionssystems zu gewinnen. Das wiederum bedeutet, dass im Gegensatz zu operativen Fragestellungen nicht einzelne Aufträge, sondern grundsätzliche Aussagen zur Leistung des Systems im Fokus stehen (Simini et. al. 2006). Für den Erfolg einer solchen Anwendung ist es entscheidend, dass die wesentlichen Ergebnisse auch bei Änderungen der Annahmen noch aussagekräftig sind. Deshalb verwenden viele Simulationsmodelle eine Sensitivitätsanalyse gegenüber stochastischen Störungen (Pegden 2019). Obwohl es Ansätze gibt, die diese Softwarepakete zur operativen Planung einsetzen, ist dies bisher noch nicht bei mehrstufiger Einzel- und Kleinserienfertigung der Fall. Im Rahmen dieser Arbeit wird überprüft, ob die dafür entwickelten Modelle auch sinnvoll in der operativen Produktionsplanung der Einzel- und Kleinserienfertigung eingesetzt

werden können. Aufgrund des bisherigen Einsatzzweckes erscheint die Arbeitshypothese plausibel, dass ein solches System weniger sensibel auf Produktionsabweichungen reagiert und diese Schwäche bestehender APS reduziert.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Die übergeordnete Zielsetzung dieser Schrift ist die schnelle und vor allem pünktliche Lieferung in der Einzel- und Kleinserienfertigung. In diesem Umfeld erwarten die Kunden ein breites Produktspektrum bei geringen Stückzahlen pro Artikel. Eine Änderung der Fertigungstechnologien oder eine fertigungsgerechtere Neukonstruktion der Produkte ist oftmals zu teuer, so dass eine Lösung im bestehenden Rahmenwerk notwendig ist.

Während sich für den Sondermaschinen- und Anlagenbau die Methoden des Projektmanagements und in der Großserienfertigung die Ansätze der Lean Production bewährt haben (siehe beispielsweise (Womack et al. 1990), (Womack und Jones 2003)) kommen diese Lösungen in der Einzel- und Kleinserienfertigung nicht in Frage.

Als Lösung haben sich Softwaresysteme etabliert, welche Aufgaben der PPS automatisieren und die Prognose von Terminen übernehmen. Diese Softwarepakete erfüllen bereits heute zwei wesentliche Aufgaben:

- Sie geben Handlungsempfehlungen für die Produktion, d.h. sie machen einen Vorschlag zur zeitlichen Zuordnung von Mitarbeitern, Materialien und Maschinenkapazitäten zu Aufträgen
- Sie prognostizieren Liefertermine und unterstützen damit die Angebotserstellung.

Dabei berücksichtigen die modernen APS-Systeme im Gegensatz zu den älteren MRP-Systemen bereits alle wesentlichen Restriktionen einer Produktionsplanung, d.h. sie koordinieren die Erstellung von Komponenten mit der Montage und betrachten Personal- und Maschinenkapazitäten.

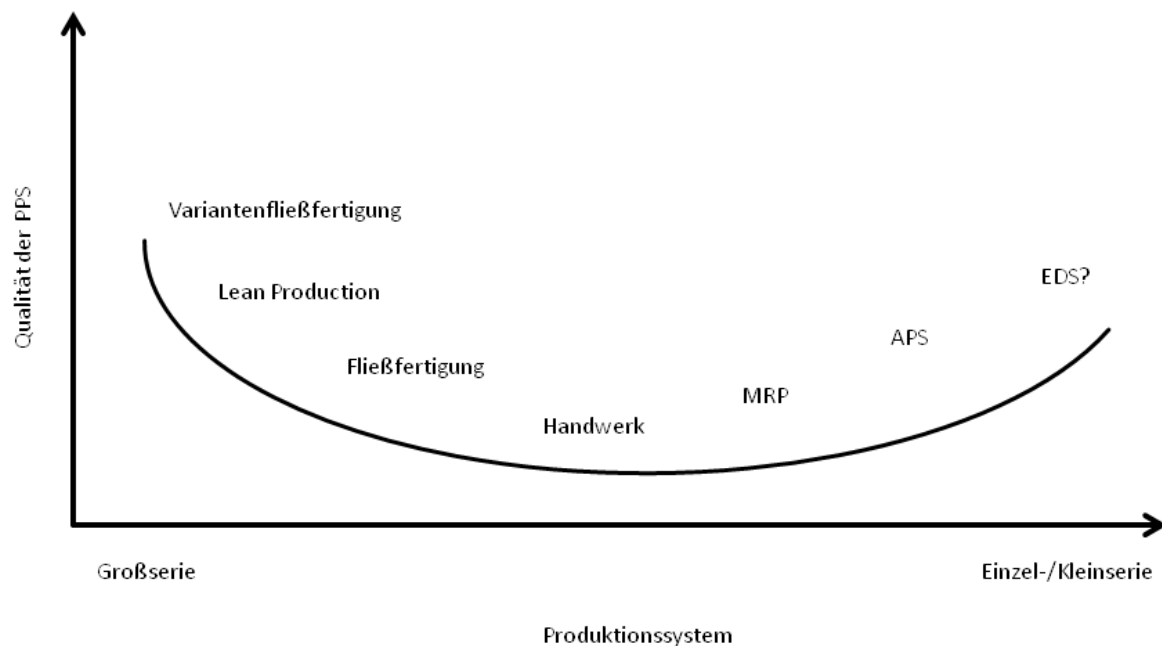


Abbildung 1: Zielsetzung dieser Arbeit

Abbildung 1 gibt einen Überblick über das Problemfeld. Während sich auf der einen Seite vom Handwerk ausgehend in der Großserienfertigung die Variantenfließfertigung entwickelt hat, wurden in der Einzel- und Kleinserienfertigung zunächst MRP-Softwaresysteme eingeführt, die keine Kapazitäten betrachten und sodann APS-Systeme, die diese Lücke schließen.

Allerdings reagieren diese APS-Systeme oftmals sehr empfindlich auf (unvermeidliche) Produktionsabweichungen, d.h. die Prognose der Liefertermine ist mit hohen Unsicherheiten behaftet (Schuh und Stich 2013), (Pujawan und Smart 2012), (Hauptvogel 2015, S. 174).

Die ereignisdiskrete Simulation (EDS) hat bereits in anderen Anwendungsgebieten gezeigt, dass sie auch unter großen stochastischen Unsicherheiten belastbare Prognosen abgibt.

In dieser Arbeit soll die EDS so erweitert werden, dass sie die oben genannten Aufgaben in der Einzel- und Kleinserienfertigung ausführen kann. Durch die hohe Wertschöpfungstiefe dieser Unternehmen muss ein solches Verfahren dabei sowohl die Fertigung von Komponenten als auch deren Montage zu Erzeugnissen simultan betrachten (Betrachtung mehrerer Dispositionstufen). Weiterhin ist in den untersuchten Unternehmen die Qualifikation und Verfügbarkeit von Mitarbeitern ein wesentlicher Engpass, so dass neben der Betrachtung von Material- und Maschinenverfügbarkeit auch die Mitarbeiterkapazitäten berücksichtigt werden müssen.

Der Erfolgsmaßstab dieser Arbeit besteht darin, dass der neu entwickelte Algorithmus weniger empfindlich auf die unvermeidlichen Produktionsabweichungen reagiert. Das äußert sich einerseits in einer realistischen Prognose der Liefertermine

und andererseits einer dynamischen Reaktion auf Abweichungen in der Steuerung der Produktion.

BRETZKE bemängelt in seiner grundsätzlichen Kritik der Operations Research-Ansätze, dass diese Probleme zu stark vereinfachen und den Bezug zur eigentlichen Aufgabenstellung verlieren (Bretzke 2016, Kapitel 3). Um dies zu verhindern soll neben der Erweiterung des eigentlichen Softwaresystems auch die Einbettung in die operativen Prozesse untersucht und validiert werden.

Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

Wie kann die ereignisdiskrete Simulation für die operative Produktionsplanung in der mehrstufigen Einzel- und Kleinserienfertigung genutzt werden?

Zur Beantwortung müssen folgende Unterforschungsfragen beantwortet werden:

- Wie kann das Planungssystem im operativen Betrieb genutzt werden um reale Verbesserungen in der Termintreue zu erreichen?
- Wie können die Daten sinnvoll modelliert werden um einen Planungsalgorithmus zu verwenden?
- Wie kann die ereignisdiskrete Simulation so erweitert werden, dass sie mit mehreren Dispositionsstufen umgehen und unnötig hohe Bestände vermeiden kann?
- Wie kann das Ergebnis sinnvoll bewertet und mit bestehenden Algorithmen verglichen werden?

1.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Nach ULRICH und HILL zeichnet sich die Wissenschaft vor allem durch die bewusste Bereitschaft zur ständigen, kritischen Überprüfung der getroffenen Aussagen aus (Ulrich 1975). Im gleichen Aufsatz unterscheidet ULRICH die Formalwissenschaften und die Realwissenschaften. Die ersten beschäftigen sich mit formalen Systemen welche nur auf ihre logische Wahrheit überprüfbar sind (wie z.B. die Mathematik). Die zweite Gruppe versucht empirisch wahrnehmbare Wirklichkeitsausschnitte zu beschreiben, zu erklären und zu gestalten.

Die Realwissenschaften wiederum können in die angewandten und die Grundlagenwissenschaften unterschieden werden. Erstere - auch Handlungswissenschaften genannt - analysieren menschliche Handlungsalternativen zur Gestaltung sozialer und technischer Systeme mit Hilfe von Entscheidungsmodellen und –Prozessen.

Entsprechend der Zielsetzung eine Entscheidungshilfe für die Produktionsplaner in realen Unternehmen zu entwickeln, ordnet sich diese Arbeit in die angewandten Realwissenschaften ein.

ULRICH unterscheidet drei Aspekte der Forschung: a) Entdeckungszusammenhang, b) Begründungszusammenhang und c) Verwendungszusammenhang.

Der Entdeckungszusammenhang beschäftigt sich mit der Frage, wie ein Wissenschaftler zu fruchtbaren, theoretischen Erkenntnissen kommt. Dabei ist diese Phase vorwissenschaftlich und garantiert keine optimale Lösung. In diesen Kontext gehören die Abgrenzung des Problems, des Objekt- oder Gültigkeitsbereiches und die Aufstellung von Arbeitshypothesen. Dabei wird bereits eine Prüfung der Zweckmäßigkeit gefordert. (Ulrich 1975).

Im vorigen Kapitel wurde der Objektbereich auf die PPS in der mehrstufigen Einzel- und Kleinserienfertigung festgelegt. Weiterhin wurden die Arbeitsthemen aufgestellt, dass zur Unterstützung eine Software benötigt wird und bestehende Ansätze noch deutliche Schwächen haben. Die Anzahl von mehr als 100 APS-Anbietern alleine am deutschen Markt einerseits (Trovarit AG) und die aufgeführte Literatur zu den bestehenden Defiziten dieser Systeme zeigen die Relevanz des Themas. Somit ist die Prüfung der Zweckmäßigkeit vorläufig zu bejahen.

Im Begründungszusammenhang wird gefordert, dass die Ergebnisse empirisch überprüft werden können. Dies kann einerseits durch eine Verallgemeinerung von einzelnen Beobachtungen (Induktion) als auch durch die logische Ableitung (Deduktion) erfolgen. In der Betriebswirtschaftslehre als Teil der Sozialwissenschaften ist eine endgültige und vollständige Beweisführung jedoch ausgeschlossen (Ulrich 1976). Angelehnt an den kritischen Rationalismus von POPPER können Hypothesen somit nie als endgültig wahr beschrieben werden, sondern nur vorläufig als richtig erkannt werden, bis das Gegenteil bewiesen wurde.

In dieser Arbeit wird die These aufgestellt, dass ein neuartiger Algorithmus im Sinne der genannten Zielsetzung bessere Ergebnisse liefert als bisherige Systeme. Naturgemäß können nicht alle bisher entwickelten Algorithmen mit allen in der Praxis vorkommenden oder theoretisch möglichen Produktionssystemen validiert werden. Diese Arbeit vergleicht daher am Beispiel eines repräsentativen Produktionssystems die Ergebnisse von verschiedenen häufig eingesetzten Verfahren. Die grundsätzlichen Überlegungen und Verfahren werden so weit offen gelegt, dass sie einer Überprüfung und ggf. Falsifikation zugänglich sind. Dieses induktive Vorgehen (vom Einzelfall auf die Allgemeinheit schließen) wird um deduktive Elemente ergänzt. Diese bestehen darin, dass aus den Eigenarten der Algorithmen mögliche Einflussfaktoren auf die Zielerreichung logisch abgeleitet und mit Beispieldaten induktiv überprüft werden. Auf diese Weise wird der Begründungszusammenhang erfüllt.

Als letzte Aufgabe wird von ULRICH im Verwendungszusammenhang gefordert, dass die wissenschaftlichen Aussagen eine gesellschaftliche Funktion haben. Das Kernziel der Betriebswirtschaftslehre ist die Erreichung eines maximalen Ergebnisses mit minimalen Mitteln. Eine verbesserte PPS kann dazu beitragen, dieses Ziel zu erreichen. Dies wird auch durch die weitverbreitete Verwendung von APS-Systemen belegt und ist damit ebenfalls erfüllt.

Als Vorgehensmodell nennen die Autoren folgende Schritte:

Zunächst werden terminologisch-deskriptiv die Begrifflichkeiten der Untersuchung und Kennzahlen zu ihrer Bewertung definiert. Danach werden aus empirischen Beobachtungen mögliche Zusammenhänge abgeleitet und im nächsten Schritt deduktiv in ein Modell überführt. Dessen Prognosen werden nun an konkreten Beispielen validiert um zu entscheiden, ob dieses vorläufig als geeignet angewendet werden kann. In dieser Arbeit wird zunächst das Problem der PPS formal an Hand der üblicherweise vorhandenen Daten definiert, sodann ein Modell zur Produktionsplanung erstellt und dieses am Beispiel eines tatsächlichen Unternehmens validiert.

1.4 Struktur dieser Untersuchung

In diesem Kapitel wurden die Aufgaben der Produktionsplanung und –Steuerung beschrieben und ihre Relevanz begründet. Die Vielzahl der Planungsobjekte und die Komplexität der Einzel- und Kleinserienfertigung begrenzen den Nutzen von Verfahren wie Projektplanung oder Lean Production. Stattdessen werden Softwaresysteme (APS) eingesetzt, die jedoch empfindlich auf Produktionsabweichungen reagieren. Die Aufgabe dieser Arbeit ist es einen neuen Algorithmus zu entwickeln, der robuster mit Störungen umgeht.

Im nächsten Kapitel wird die Planungsaufgabe formal beschrieben und ihre Freiheitsgrade und Randbedingungen definiert. In Kapitel drei wird der Stand der Technik sowohl aus wissenschaftlicher als auch praktischer Sicht beleuchtet und Stärken und Schwächen von bestehenden Lösungen diskutiert.

In Kapitel 4 werden die Forschungsfragen aufgegriffen und methodisch unterlegt um den wissenschaftlichen Anspruch zu erfüllen.

Kapitel 5 stellt ein Prozessmodell vor, welches erklärt, wie mit der Planung gearbeitet werden soll, welche Mitarbeiter welche Rollen übernehmen und wie Software und Menschen interagieren. Kapitel 6 konkretisiert die Datenstrukturen aus dem Kapitel 2 für die konkrete Anwendung und ihre Modellierung für das Planungsproblem.

In Kapitel 7 schließlich wird die Blackbox der Planung geöffnet und der neu entwickelte Algorithmus detailliert beschrieben.

Im Kapitel 8 wird das Ergebnis der Arbeit in einem Benchmark gegen Standardsysteme validiert und in Kapitel 9 ein Fazit gezogen.

2 Terminologie und Eingrenzung der Untersuchung

In diesem Kapitel wird zunächst die Struktur der Produktion im Betrachtungsbereich der mehrstufigen Einzel- und Kleinserienfertigung beschrieben und Begriffe und Datenstrukturen zur formalen Abbildung vorgestellt. Es folgt ein Abschnitt, in dem die wesentlichen Randbedingungen und Freiheitsgrade der Produktionsprozesse systematisiert werden. Danach werden Kennzahlen zur Bewertung eines Produktionsprozesses und der dazugehörigen Planung vorgestellt. Im weiteren Verlauf wird die Planungsaufgabe eingegrenzt und die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Begriffe Planung, Optimierung und Simulation herausgearbeitet. Dadurch wird diese Dissertationsschrift abgegrenzt und eingeordnet und andererseits die Zielsetzung, Randbedingungen und Bewertungskriterien der späteren Arbeit definiert.

2.1 Mehrstufige Einzel- und Kleinserienfertigung

2.1.1 Besonderheiten der Einzel- und Kleinserienfertigung

SCHNEIDER unterscheidet die Fertigung nach dem Wiederholungsgrad der Produktion (Schneider et al. 2005, 8ff). Er nennt die Ein-Produkt-Einzelfertigung, bei der in einem Zeitraum nur ein einziger Auftrag erstellt wird (z.B. Schiffbau, Anlagen und Schwermaschinenbau), die Mehrprodukt-Einzelfertigung, bei der mehrere Unikate gleichzeitig produziert werden und die Serienfertigung, bei der eine definierte Anzahl gleichartiger Artikel nach einheitlichen konstruktiven und technologischen Unterlagen hergestellt werden. Diese wiederum kann in Klein-, Mittel- und Großserien unterschieden werden. Zusätzlich wird nach Organisation von Fertigungstypen unterschieden. So gibt es die Werkstattfertigung, Fließfertigung, Baustellenfertigung und Gruppenfertigung (Schneider et al. 2005, 10ff).

Aus Sicht des Autors dieser Arbeit ist die Auflagengröße als solche nicht unbedingt zielführend. So zeigt die Zeitung Welt am Beispiel von MTU die Serienproduktion eines Schiffsdiesels mit einer Seriengröße von 25 Stück/Jahr (Welt Online 2018). Obwohl diese Losgröße sehr gering ist, folgt die Organisation doch dem gleichen Muster einer getakteten Fließfertigung wie im Großserienbau. Die MEYER Werft wiederum baut einzigartige Kreuzfahrtschiffe in einer Ein- oder Zweiprodukt-Einzelfertigung, nutzt jedoch ebenfalls viele Prinzipien der Produktion im Takt, in dem sogenannte Blöcke von einigen Hundert Tonnen Masse im Fließprinzip gefertigt und im Schiff verbaut werden.

Andererseits sind bei anderen Unternehmen auch bei größeren Serien von einigen Hundert Stück die Bearbeitungszeiten so gering, dass es sich nicht lohnt, dafür eine getaktete Fließfertigung über einzelne Bereiche (Fertigungsinseln) hinaus einzuführen. Stattdessen teilen sich unterschiedliche Produkte die gleichen Anlagen. Ein Beispiel dafür ist aus der persönlichen Erfahrung des Autors die Maschinenbau AG, bei der die vorgestellte Lösung entwickelt und eingesetzt wird.

Gerade in der angelsächsischen Literatur werden derartige Produktionsumgebungen als Job-Shop bezeichnet. Während Flow Shops nach dem Prinzip der Serienproduktion organisiert sind in dem jeder Auftrag dieselben Arbeitsplätze in der gleichen Reihenfolge durchläuft, gibt es im Job Shop m Maschinen und jeder Auftrag hat eine eigene, technologisch vorgegebene Sequenz von Arbeitsgängen (Pinedo 2016, S. 15).

Die –im Falle der Maschinenbau AG anzutreffende – Verallgemeinerung davon ist der Flexible Job Shop, bei dem innerhalb von Maschinengruppen eine von mehreren ausgewählt werden kann, es also Maschinenalternativen gibt.

Eine wesentliche Erschwernis bei der Planung – gerade im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung ist der hohe Anteil der Personalkosten und damit verbunden die Notwendigkeit, Personalressourcen explizit zu planen. Im verarbeitenden Gewerbe entfielen 2017 2,5% des Gesamtaufwandes auf Abschreibungen (und damit indirekt auf die Kosten der Maschinenkapazitäten), aber 18,4% auf Personal. Im Durchschnitt wurden 60% der Kosten durch Fremdbezug verursacht (DESTATIS 2018). Dies legt zumindest nahe, dass eine Fokussierung auf die Maschinenkapazität nicht ausreicht.

2.1.2 Stufenzahl in der Produktion

SCHNEIDER unterscheidet die Produktion nach Angebots- und Nachfrageorientierung. Bei der angebotsorientierten Produktion wird auf Grund von Prognosen ohne konkreten Kundenbedarf gefertigt, der Abverkauf erfolgt ab Lager („Make-to-Stock“). Im Gegensatz dazu steht die Auftragsfertigung, bei der erst mit der Produktion begonnen wird, wenn ein Kundenauftrag vorliegt. (Schneider et al. 2005, 7ff)

In der Praxis finden sich oftmals mehrstufige Produktionssysteme. Dabei werden abhängig vom Produktionsstadium beide Varianten angewandt. Insbesondere wenn die Varianz der Produktvarianten groß ist, diese jedoch Gleichteile verwenden, bietet es sich an einen Kundenentkopplungspunkt zu definieren. Die Komponenten werden aufgrund einer Prognose auf Lager produziert während die Endfertigung erst im Kundenauftrag erfolgt. Das führt zu mehreren Vorteilen: a) die Lieferzeit wird verkürzt, da nur Teile der Produktion durchzuführen sind b) Kundenwünsche können in der Montage individuell berücksichtigt werden c) die Zusammenfassung mehrerer Gleichteile in einen Fertigungsauftrag verringert die Rüstzeiten und minimiert die Anzahl der Fertigungsaufträge. (Schneider et al. 2005, S. 13).

GABLERS WIRTSCHAFTSLEXIKON definiert abweichend davon die mehrstufige Produktion darüber, dass ein Auftrag verschiedene Stufen oder Arbeitssysteme durchläuft (Voigt 2019). Diese Sequenz ist bekannt und im Rahmen eines Arbeitsplanes vorgegeben.

Diese Arbeit folgt jedoch der Definition von SCHNEIDER und TEMPELMEIER, wonach eine mehrstufige Produktion dann vorliegt, wenn es einen Zusammenhang zwischen Endprodukten, Baugruppen und Einzelteilen gibt (Tempelmeier 2008, 100ff; Kurbel

2003, 65ff). Das bedeutet, dass ein Artikel aus verschiedenen anderen Komponenten besteht. Alle Materialien können eingelagert werden, so dass eine zeitliche Entkopplung der Fertigung möglich ist. Jedes einzelne Produkt wiederum wird im Allgemeinen in einer festgelegten Sequenz von Arbeitsgängen gefertigt.

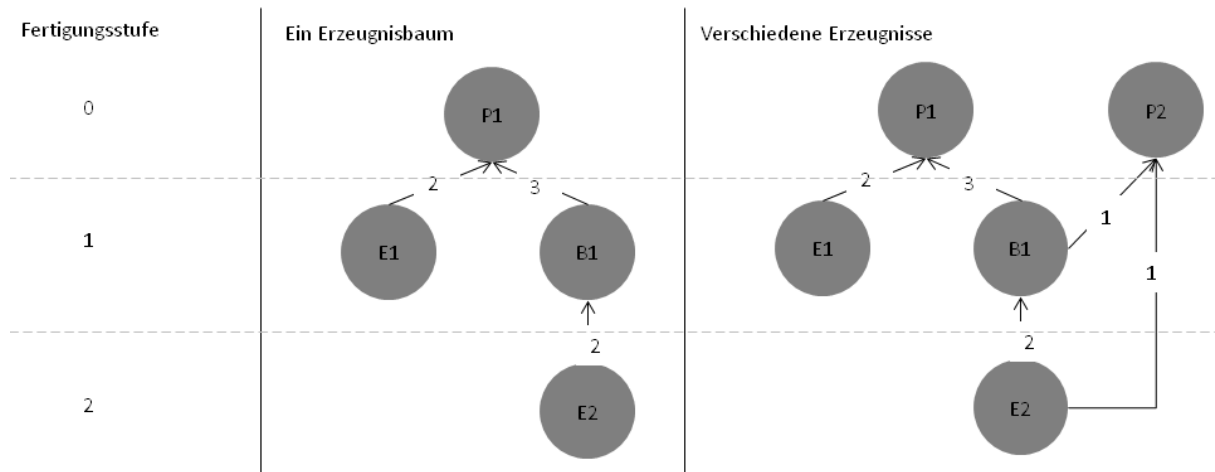


Abbildung 2: Mehrstufige Produktion

Abbildung 2 zeigt eine mehrstufige Produktion. Im ersten Teil wird für ein einzelnes Erzeugnis P1 gezeigt, aus welchen Bauteilen (B1) und Einzelteilen (E1, E2) sich dieses zusammensetzt. An den Kanten ist die Stückzahl angegeben. Wenn $2 \times P1$ gefertigt werden sollen, werden dafür $2 \times 2 = 4 \times E1$, $2 \times 3 = 6 \times B1$ und – indirekt durch die Verwendung von E2 in B1 – $6 \times 2 = 12 \times E2$ benötigt. Da es mehrere Produkte gibt, kommt es im Allgemeinen vor, dass Einzelteile oder Baugruppen in verschiedene Artikel eingehen. Im rechten Teil des Bildes ist erkennbar, dass B1 und E2 auch für P2 verwendet werden. Die Fertigungsstufen werden dabei entgegen dem Fertigungsablauf durchnummeriert, beginnend bei Erzeugnissen mit Stufe 0.

Es ist zu beachten, dass das Einzelteil E2 aus Sicht von P1 auf der Fertigungsstufe 2, aus Sicht von P2 dagegen sowohl auf Stufe 1 als auch 2 vorhanden ist (da es teilweise direkt eingeht). Die Dispositionsstufe beschreibt die maximale Fertigungsstufe eines Artikels im gesamten Produktionsprogramm. Für E2 entspricht sie demzufolge der Dispositionsstufe 2.

2.1.3 Informationstechnische Modellierung der Produktion

Die genannten Daten können für ein realistisches Unternehmen nicht mehr übersichtlich in graphischer Form dargestellt werden. In gängigen ERP-Systemen sind diese daher tabellarisch gepflegt. Die folgende Nomenklatur orientiert sich am marktführenden SAP-System.

Eine Materialstammtabelle beschreibt alle Artikel (in SAP Materialien) mit ihren spezifischen Eigenschaften. Dabei ist es zunächst egal, ob diese verkaufsfähig sind, es sich um Erzeugnisse, Baugruppen, Einzelteile oder auch Verbrauchs- und Büromate-

rialien handelt. Entscheidend ist jedoch, dass zwei Teile mit gleicher Schlüsselnummer untereinander austauschbar sind.

Die Arbeitsplantabelle bezeichnet für jedes eigengefertigte Material eine Sequenz von Arbeitsgängen. Jeder Arbeitsgang ist durch eine Vorgangsnummer (welche die Reihenfolge vorgibt und typischerweise in 10-er Schritten vergeben wird) einen Arbeitsplatz sowie eine Vorgabezeit (typisch getrennt in Rüst- und Auftragsfertigungszeit pro Stück, kurz „tr“ und „te“) angegeben. Der Arbeitsplatz wiederum wird im Folgenden synonym zu Maschine, Arbeitssystem verwendet und bezeichnet eine örtlich abgegrenzten Produktionsbereich, an dem die Bearbeitung eines Auftrages erfolgen kann (Kurbel 2003, 229ff).

Die Stücklistentabelle enthält für jedes Material die Schlüsselnummern der benötigten Bauteile und Komponenten (also wiederum eine Materialnummer) sowie die benötigte Stückzahl.

Beide Datenstrukturen – Arbeitsplan und Stückliste – können ggf. Varianten beinhalten, um zum Beispiel das Fertigungsverfahren abhängig von der Losgröße zu gestalten. Spätestens mit der Umsetzung eines Fertigungsauftrages wird aber eine bestimmte Alternative der Fertigung gewählt und unabhängig von der Herstellungsweise sind die Artikel mit gleicher Materialnummer am Schluss untereinander austauschbar.

Kopfmaterial	Komponente	Stückzahl	Bedarfvorgang
P1	E1	2	10
P1	B1	3	10
B1	E2	2	10

Tabelle 1: Beispiel für eine Stücklistenstruktur

Material	Vorgang	Arbeitsplatz	Beschreibung	TR	TE
P1	10	9989	Auslagern	0	100
P1	20	MGRO	Montage	0	200
P1	30	8023	Endkontrolle	0	100
B1	10	9989	Auslagern	0	100
B1	20	0768	Vordrehen	100	50
B1	30	0519	Bohren	100	40
B1	40	8023	Endkontrolle	0	50

Tabelle 2: Beispiel für eine Arbeitsplanstruktur

Die zugehörigen tabellarischen Daten werden in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt. Die Arbeitsplantabelle zeigt die notwendigen Arbeitsschritte für die beteiligten eigengefertigten Baugruppen und Erzeugnisse. Die Stücklistentabelle enthält die dazugehörigen Komponentenbedarfe und den Verweis auf den Arbeitsschritt, an dem diese verbaut und damit benötigt werden. Gerade bei komplexen Erzeugnissen kommt es vor, dass einzelne Teile nicht vorab ausgelagert, sondern im Montageprozess zugeführt werden. In diesem Falle müssen die Komponenten nicht bereits beim Start des Auftrages, sondern erst des entsprechenden Arbeitsganges zur Verfügung gestellt werden.

2.2 Formales Modell der Produktion und ihrer Randbedingungen

In diesem Abschnitt werden die Randbedingungen und Freiheitsgrade der Produktion formalisiert. Dabei werden die im vorigen Abschnitt erläuterten Stammdaten als gegeben und richtig vorausgesetzt. Weder wird hinterfragt, ob die modellierten Daten den Produktionsprozess richtig beschreiben noch werden Möglichkeiten zur technologischen oder organisatorischen Änderung von Abläufen betrachtet.

2.2.1 Abhängigkeiten von der Materialverfügbarkeit

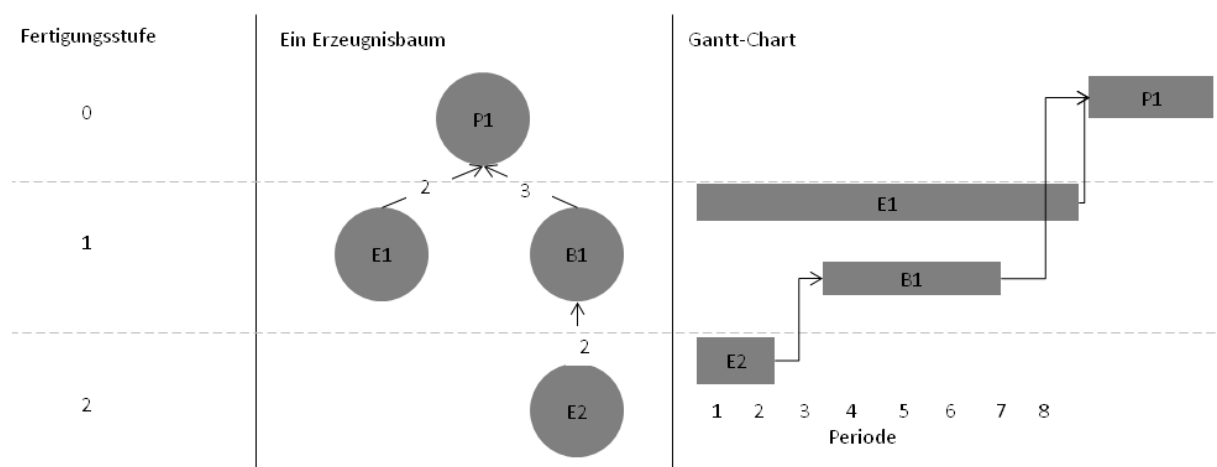


Abbildung 3: Auftragsnetz in der Produktion

Abbildung 3 zeigt einen möglichen und zulässigen Produktionsprozess für die daneben abgebildete Erzeugnisstruktur. Das Produkt P1 besteht aus den Baugruppen B1 und dem Einzelteil E1. Im rechten Teil wird die zeitliche Abfolge der Bearbeitung dargestellt. Dabei ist in diesem Fall zu beachten, dass die Montage von P1 erst in Periode 6 beginnen kann, wenn E1 zur Verfügung steht. B1 verbleibt damit von der Fertigstellung bis zum Verbrauch im Bestand.

Allgemein kann ein Arbeitsgang erst dann beginnen, wenn alle notwendigen Materialien zur Verfügung stehen. In diesem Fall verursachen sowohl E2 als auch B1 einen Bestand; ihre Fertigung könnte aus Sicht der Montage von P1 problemlos verzögert werden.

Andererseits erfordern die Rüstkosten oftmals eine Zusammenfassung von mehreren Bedarfen. In diesem Falle kann ein Bedarfsdecker mehrere Nachfolger haben, so dass im Allgemeinen jeder Arbeitsgang mehrere Vorgänger und jeder Auftrag mehrere Nachfolger haben kann. Der dringendste Bedarf bestimmt den gewünschten Zeitpunkt der Fertigstellung und erfordert ggf. einen temporären Bestand der Restmenge.

Nicht in allen Fällen muss das Material beim Auftragsstart verfügbar sein. Insbesondere bei komplexen Montageprozessen ist es oftmals ausreichend, die Komponenten im Laufe der Montage zuzuführen. In der Abbildung gilt dies für B1. Demzufolge beziehen sich die Stücklistenpositionen stets auf einen bestimmten Arbeitsgang im Fertigungsauftrag. Die entsprechenden Datenstrukturen wurden im vorigen Abschnitt beschrieben.

2.2.2 Abhängigkeiten von Übergangszeiten und Maschinenkapazitäten

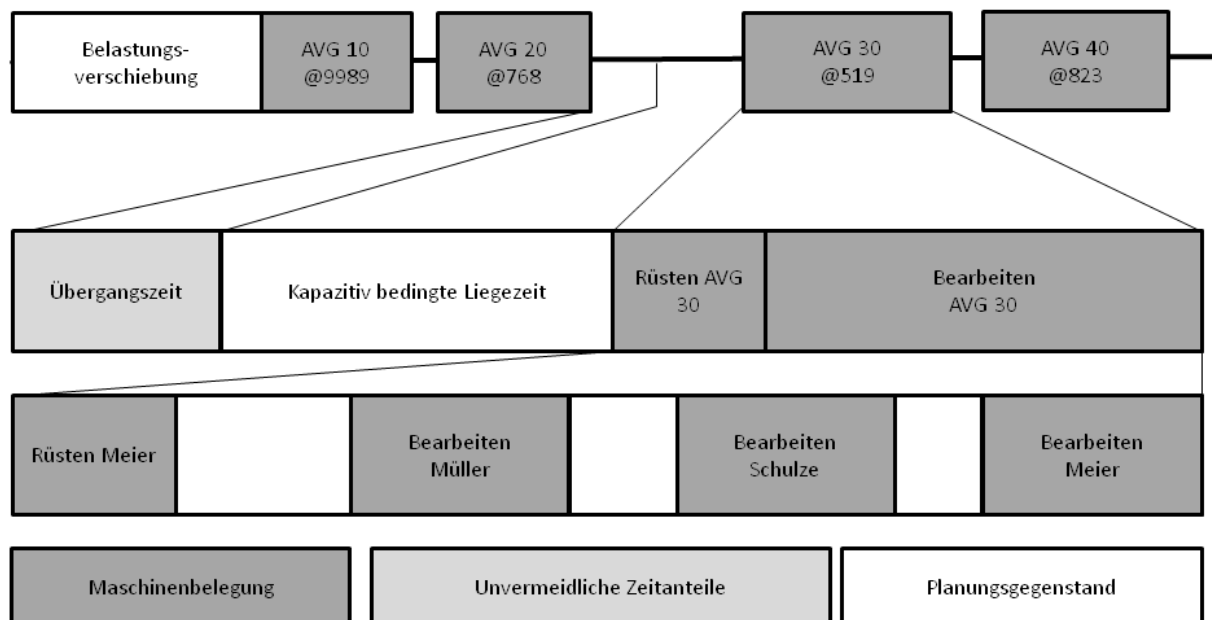


Abbildung 4: Zeitanteile in einem Arbeitsgang am Beispiel von B1

Abbildung 4 zeigt den Fertigungsauftrag B1. Dieser besteht entsprechend des Arbeitsplans aus Tabelle 2 aus den Arbeitsgängen 10, 20, 30 und 40.

Die Belastungsverschiebung beschreibt den Zeitanteil zwischen Auftragserfassung und Freigabe in die Produktion. Sie wird im Wesentlichen durch die Planung und ggf. fehlende Materialverfügbarkeit festgelegt. Sinnvollerweise wird diese von dem Bedarfsdatum des Auftrages (Vermeidung von Lagerbeständen), der Fertigungssituation (Vermeiden von zu großen Umlaufbeständen in der Produktion auf Grund absehbarer Produktionsengpässe) und der Verfügbarkeit der benötigten Materialien bestimmt.

Nach dem Bearbeitungsende von Arbeitsgang 20 schließt sich eine Übergangszeit an. In vielen Systemen ist dieser Zeitanteil pro Arbeitsplatz hinterlegt und beinhaltet Zeiten, die entweder technologisch bedingt notwendig (zum Beispiel abkühlen nach einer Wärmebehandlung) oder pauschaliert organisatorisch vorgegeben sind (zum Beispiel die Zeit bis der Auftrag zum nächsten Arbeitsplatz transportiert wird). Aus Sicht der Produktionsplanung ist dieser feste Zeitanteil unabhängig von der Kapazität immer einzuhalten, belegt aber keine Maschinenkapazität. Die Zeitanteile für das Rüsten und die Bearbeitung ergeben sich aus dem Arbeitsplan und erfordern Maschinenkapazität. Zu einem beliebigen Zeitpunkt kann nur ein Arbeitsgang pro Arbeitssystem bearbeitet werden. Die kapazitiv bedingte Liegezeit dagegen ergibt sich aus der Konkurrenzsituation mit anderen, in der Abbildung nicht dargestellten Aufträgen sowie fehlender Verfügbarkeit der Kapazität.

So kann eine Maschine zu einem beliebigen Zeitpunkt nur von einem Arbeitsgang belegt werden. Damit kommt es zu Warteschlangen von Aufträgen, die auf Grund fehlender Kapazität noch auf ihre Bearbeitung warten.

Rüst- und Bearbeitungsschritte werden häufig unterbrochen auf Grund der Personalsituation. So arbeiten in diesem Beispiel verschiedene Mitarbeiter in ihren Schichten an dem gleichen Auftrag. An Wochenenden oder auf Grund fehlender Personalverfügbarkeit kommt es immer wieder zu Unterbrechungen, die ebenfalls zu den kapazitiv bedingten Leerzeiten zählen.

Die Zeit zwischen Bearbeitungsstart und –Ende besteht damit aus einer Reihe von Belegungen, die durch Pausen unterbrochen sein können. Jede Belegung beinhaltet als Information einen Arbeitsgang, eine Maschinen- und in der Regel eine Personalressource sowie einen Start- und Endzeitpunkt.

Alle genannten Zeiten müssen strikt größer als Null sein. In Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung übersteigt häufig die kapazitiv bedingte Liegezeit die eigentlichen Bearbeitungs- und Übergangszeiten wesentlich.

2.2.3 Abhängigkeiten von der Personalverfügbarkeit

In vielen Fällen ist nicht das Arbeitssystem der eigentliche Engpass, sondern die Verfügbarkeit von qualifizierten Mitarbeitern. Dies kann als Qualifikationsmatrix dargestellt werden. Abbildung 5 zeigt eine solche Matrix. Die grauen Punkte kennzeichnen, welche Maschinen (M1-M4) durch welche Mitarbeiter bedient werden können. So kann Meier nur die Anlage M3, aber nicht M1, M2 und M4 verwenden. Die schwarzen Punkte bezeichnen eine mögliche Maschinenbelegung. Aktuell werden auf diese Weise 3 von 4 Arbeitssystemen und 3 von 4 Mitarbeitern ausgelastet.

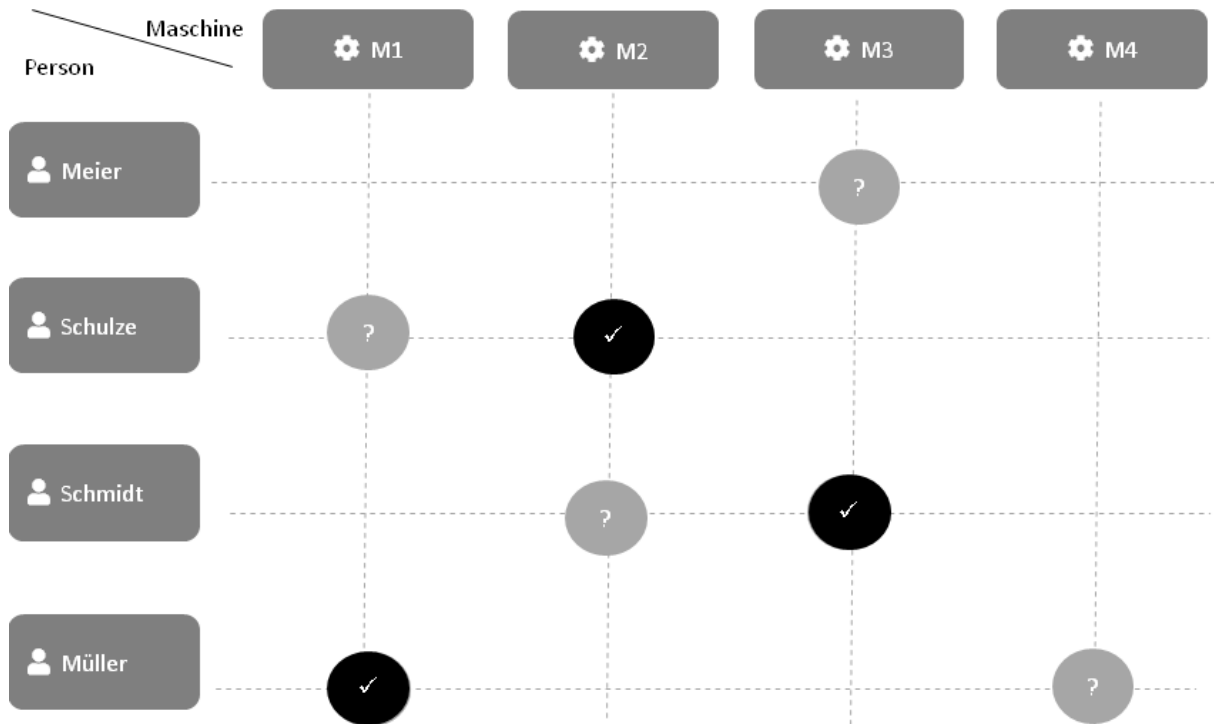


Abbildung 5: Qualifikationsmatrix und Maschinenbelegung

Dabei ist ersichtlich, dass diese Belegung nicht optimal ist: Wenn Müller auf M4 wechselt, kann Schulze M1 übernehmen. Dadurch wird M2 für Schmidt frei und Meier kann M3 bedienen. Auf diese Weise wird die Auslastung auf 4 Maschinen erhöht – durch optimierte Planung kann die Leistung um 33% (von 3 auf 4) gesteigert werden.

Wenn Mitarbeiter fest einem einzigen Arbeitssystem zugeordnet sind, kann die Planung auf die Anlagen beschränkt werden. Im Allgemeinen ergeben sich aber Optimierungspotentiale durch die simultane Planung von Maschinen- und Personalkapazität. Dabei muss die Qualifikation der Mitarbeiter ebenso berücksichtigt werden wie deren Anwesenheit entsprechend eines Schichtkalenders.

2.2.4 Freiheitsgrade in der Produktion

LÖDDING beschreibt in seinem Standardwerk „Verfahren der Fertigungssteuerung“ modellhaft die Freiheitsgrade, die in der Produktion existieren und ihre gesetzmäßigen Auswirkungen.

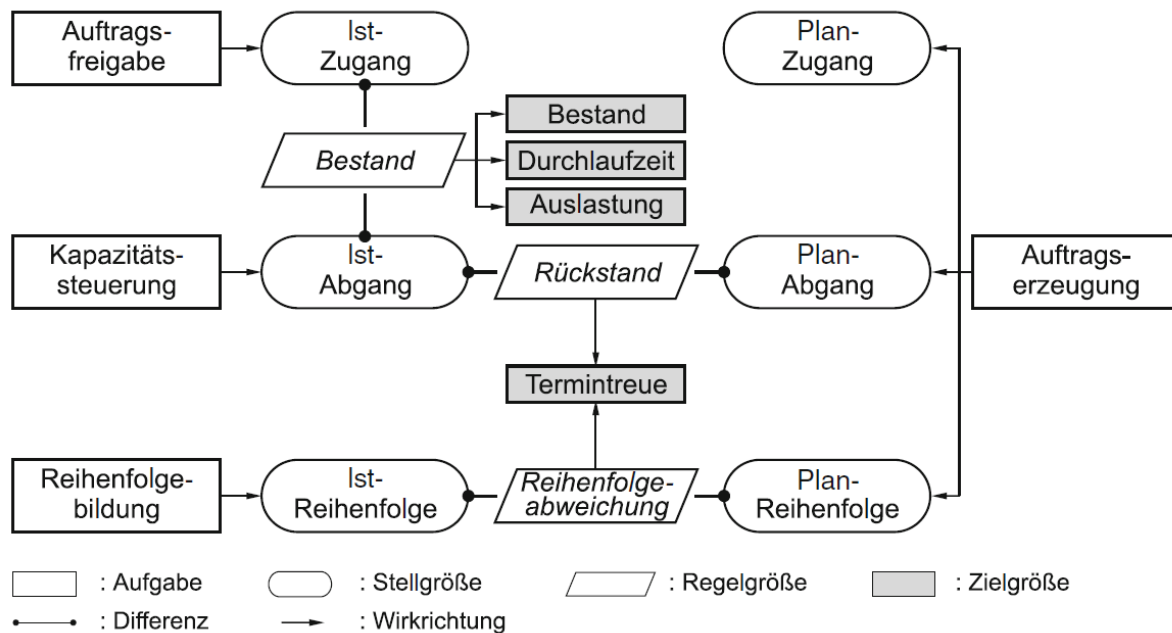


Abbildung 6: Modell der Fertigungssteuerung nach LÖDDING

Dazu definiert er folgende Aufgaben der Fertigungssteuerung (Lödding und Wiendahl 2005, S. 9):

- **Auftragsfreigabe** – Sie legt den Zeitpunkt und damit die Reihenfolge fest, in der Aufträge in die Fertigung freigegeben werden.
- **Kapazitätssteuerung** – Sie legt fest, welche Mitarbeiter wie lange an welchen Arbeitssystemen arbeiten und damit die zur Verfügung stehende Kapazität.
- **Reihenfolgebildung** – Sie entscheidet, in welcher Reihenfolge die Aufträge an einem Arbeitssystem bearbeitet werden sollen.
- **Auftragserzeugung** – Sie legt die Plantermine und Planmengen für Zu- und Abgänge für die Fertigung fest.

Die Auftragserzeugung enthält zwei Komponenten: Einerseits die Ermittlung der Bedarfe, die sich rechnerisch (im Falle der hier fokussierten Auftragsfertiger) aus den Kundenbedarfen ergeben und damit keinen echten Freiheitsgrad darstellen und zweitens der Festlegung von Losgrößen, d.h. der Entscheidung ob mehrere einzelne oder ein größerer Auftrag gefertigt werden sollen.

Wenn alle genannten Freiheitsgrade festgelegt sind und die Stammdaten der Produktion gepflegt sind, kann aus diesen Informationen ein Start- und Endtermin pro Arbeitsgang festgelegt werden. Dazu muss ab dem Zeitpunkt der Auftragsfreigabe die festgelegte Kapazität in der festgelegten Reihenfolge den Arbeitsgängen zugeordnet werden, damit ergeben sich die entsprechenden Termine. Wenn im Umkehrschluss Termine auf Ebene der Vorgänge festgelegt wurden, werden dadurch auch die geschilderten Freiheitsgrade festgelegt. Dies ist für die Auftragsfreigabe (Termin

des ersten Arbeitsganges) und Reihenfolge (Sortierung nach Starttermin) unmittelbar einsichtig. Doch auch die Kapazitätsfestlegung kann durch Summierung der Bearbeitungszeiten der Belegungen festgelegt werden. Wenn die Belegungen darüber hinaus auch die Information enthalten, welcher Mitarbeiter den Auftrag zu welchem Zeitpunkt bearbeiten soll, ist auch die Zuordnung von Mitarbeitern zu Maschinen und deren genutzte Kapazität bekannt.

Die Entscheidung dieser Freiheitsgrade ist damit äquivalent zur Festlegung von Terminen pro Arbeitsgang.

2.2.5 Zwischenfazit

Die Produktionsplanung in einer mehrstufigen Einzel- und Kleinserienfertigung muss die gleichzeitige Verfügbarkeit von Material, Personal und Maschinen sicherstellen. Dabei dürfen keine Ressourcen doppelt belegt werden und aus praktischen Gründen müssen Übergangszeiten zwischen den Arbeitsgängen eingehalten werden. Alle dafür notwendigen Daten zum Ressourcenbedarf werden über Arbeitsplan und Stückliste vollständig bestimmt. Es bleibt jedoch als Freiheitsgrad a) der Zeitpunkt der Auftragsfreigabe b) die Zuordnung von Personal zu Maschinen (Kapazitätssteuerung) und c) die Reihenfolgenbildung an den Arbeitsplätzen sowie d) die Auftragserzeugung bzw. Losgrößenentscheidung (Lödding und Wiendahl 2005, S. 9):.

Die Festlegung dieser Freiheitsgrade wiederum ist äquivalent zur Berechnung von Terminen pro Arbeitsgang.

Diese Freiheitsgrade und Restriktionen sollten simultan betrachtet werden, um eine sinnvolle Abstimmung zu ermöglichen. Diese Multi-Ressourcen-Planung verspricht bessere Ergebnisse als eine (womöglich individuell optimierte) Planung der einzelnen Ressourcen da sich ansonsten zwischen den Teilplänen Widersprüche ergeben können.

Die Prognose von Fertigungsdurchlaufzeiten ist dabei nicht ausreichend, da auch die Belastungsverschiebung, d.h. der Zeitpunkt der Auftragsfreigabe in die Produktion, prognostiziert werden muss. Erst die Summe dieser beiden Zeitelemente erlaubt eine Prognose für den Liefertermin eines Auftrages.

Im Themenfeld Materialverfügbarkeit gibt es verschiedene Optimierungsebenen:

1. Die Koordination erfolgt durch (extern festgelegte) Ecktermine. Eine verspätete Komponente hat keinen Einfluss auf die Montageplanung; es kommt zu unzulässigen Plänen.
2. Der Wareneingang der Komponenten wird registriert, der Plan bleibt durch die Verschiebung der Montage zulässig. Es werden aber keine Versuche unternommen, die Termine aufeinander abzustimmen.
3. Die terminliche Lage der Baugruppen wird aktiv so gesteuert, dass Bestände minimiert werden bei einem zulässigen Produktionsplan. Zu frühe Komponenten werden verzögert, zu späte bevorzugt in Kapazitäten eingeplant.

4. Die Materialreservierungen werden aktiv getauscht, d.h. abhängig von der Terminlage auch Neuzuordnungen von Beständen und früheren Bedarfsdeckern vorgenommen.
5. Die Auftragserzeugung wird revidiert indem beispielsweise Lose gesplittet oder andere Fertigungsverfahren/Auswärtsvergabe erzwungen wird.

Diese Arbeit fokussiert sich auf die Optimierungsebene 3, weitergehende Optimierungen müssten mit dem Stammdatensystem (i.d.R. einem ERP-System) integriert werden.

2.3 Kennzahlen

Diese Arbeit orientiert sich bei der Bewertung einer Produktion an dem Kennzahlensystem von LÖDDING. Im zweiten Abschnitt werden Kennzahlen diskutiert, die die Qualität einer Prognose beschreiben.

2.3.1 Logistische Kennzahlen

Im Interesse einer einheitlichen Definition werden die logistischen Kennzahlen in Anlehnung an LÖDDING beschrieben (Lödding und Wiendahl 2005, 21ff).

	Leistung	Kosten
Extern	Lieferzeit Lieferterminabweichung Liefertreue	Preis
Intern	Durchlaufzeit Terminabweichung Terminstreue	Bestand Auslastung Verzugskosten

Abbildung 7: Logistische Kennzahlen nach LÖDDING

Die Kennzahlen können nach zwei Dimensionen unterschieden werden. Externe sind solche, die sich direkt auf den Kunden auswirken und von diesem selber beurteilt werden können. Die internen dagegen sind nur dem Produktionsunternehmen bekannt und geben Aufschluss über weitere Ursachen.

In der zweiten Dimension werden die Kennzahlen danach unterschieden, ob sie primär die Kosten oder die Leistung messen.

Lieferzeit

Die Lieferzeit ist definiert als die Zeitdauer zwischen Auftragseingang und Auslieferung des Auftrages (Lödding und Wiendahl 2005, S. 22). In der Leistungsverpflichtung sagt das produzierende Unternehmen üblicherweise einen Liefertermin zu (Wiendahl und Kluth 2018). Daraus ergibt sich auch die entsprechende Zeitspanne.

Lieferterminabweichung

Die Lieferterminabweichung bezeichnet die Differenz aus geplantem und tatsächlichem Lieferdatum. Die Abweichung kann dabei sowohl gegenüber dem zugesagten als auch dem vom Kunden gewünschten Liefertermin berechnet werden. (Lödding und Wiendahl 2005, 27ff)

Liefertreue

Die Liefertreue bezeichnet den prozentualen Anteil der innerhalb einer definierten Liefertermintoleranz gelieferten Aufträge. Diese Toleranz wird dazu in Betriebskalendertagen definiert, so dass zum Beispiel Aufträge die in ± 5 Tagen zum zugesagten Liefertermin ausgeliefert werden, als pünktlich gelten. Dazu werden die nach dieser Definition pünktlichen durch die Gesamtzahl geteilt. Betrachtet werden nur tatsächlich ausgelieferte Aufträge. Die Toleranz muss von den Unternehmen definiert werden und kann unterschiedlich für eine verfrühte oder verspätete Lieferung definiert werden. Die Liefertermineinhaltung ist der Anteil der Aufträge, die vorzeitig oder pünktlich, aber nicht zu spät fertig werden.

Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit eines (Fertigungs-) Auftrags ist definiert als die Zeitdauer zwischen der Auftragsfreigabe in der Produktion und dem Bearbeitungsende eines Auftrags. Sie beeinflusst stark die gesamte Lieferzeit. Eine Streuung der Durchlaufzeit erschwert die Einhaltung von Lieferterminen (Lödding und Wiendahl 2005, S. 32). Wie im vorigen Kapitel erläutert, ist die Durchlaufzeit jedoch nicht alleine verantwortlich für die Lieferzeit, es muss auch die Vorlauf- bzw. Belastungsverschiebung bis zur Auftragsfreigabe mit betrachtet werden die wiederum einerseits von Planungsentscheidungen und andererseits der Materialverfügbarkeit von Komponenten bestimmt wird.

Terminabweichung und Termintreue

Analog zur Bewertung der externen Lieferterminabweichung und –Treue können die gleichen Kennzahlen auch für Fertigungsaufträge oder –Vorgänge definiert werden. Dabei kann sowohl auf Start- als auch Endtermine abgestellt werden. (Lödding und Wiendahl 2005, 32ff)

Bestand

Der Bestand wirkt sich direkt auf die Kapitalbindung, indirekt (vgl. Kapitel 2.2.1) auf die Durchlaufzeiten und damit die übrigen bisher definierten Kennzahlen aus. Er wird grundsätzlich unterschieden in einen Lagerbestand und einen Fertigungsbestand (WIP = Work in Progress). Der Lagerbestand umfasst Roh-, Halb- und Fertigwaren. Dieser Bestand wird typischerweise in Mengeneinheiten oder bei heterogenen Produkten in Geldeinheiten angegeben. (Lödding und Wiendahl 2005, 36ff)

Der Fertigungsbestand besteht aus den freigegebenen, nicht abgearbeiteten Fertigungsaufträgen. Neben dem monetären Wert kann er in Anzahl der Aufträge oder in der dafür benötigten Produktionskapazität (d.h. der Summe der noch nicht abgearbeiteten Vorgabezeiten) gemessen werden.

Hohe Lagerbestände ermöglichen eine schnelle Lieferung, verursachen aber durch die Kapitalbindung und den Flächenbedarf ihrerseits Kosten. Niedrige Fertigungsbestände wiederum können schnell zu einer mangelnden Auslastung der Fabrik auf Grund von Materialengpässen führen.

Leistung und Auslastung

Die Leistung ist physikalisch definiert als Quotient von Arbeit und Zeit. An einem Arbeitssystem kann diese in fertig gestellten Arbeitsgängen (oder alternativ deren Vorgabezeit in Betriebsstunden) pro Periode gemessen werden. Sie wird auch als Ausbringung oder in der englischsprachigen Literatur als Throughput bezeichnet. (Lödding und Wiendahl 2005, 39ff)

Die Auslastung wiederum beschreibt das Verhältnis aus der Leistung zur Kapazität einer Periode. Dabei weist LÖDDING ausdrücklich darauf hin, dass eine hohe Auslastung kein Selbstzweck sein sollte. Langfristig ist es wünschenswert, die Kapazität an die Nachfrage anzupassen. Kurzfristig jedoch sind die Kosten für die Anlagenkapazität (und in geringerem Umfang auch das Personal) festgelegt. Weiterhin gibt es in der Regel in einem Produktionssystem einzelne Engpässe. Ein verbesserter Durchsatz an anderen Arbeitssystemen trägt damit nicht automatisch zu einer höheren Systemleistung bei (Goldratt und Cox 2013).

Verzugskosten

Die Verzugskosten ergeben sich einerseits aus Vertragsstrafen oder den Mehrkosten, die durch Expresslieferungen oder ungeplante Überstunden entstehen. Schwerer zu quantifizieren sind die nachteiligen Effekte für die Reputation aus dem Vertrauensverlust von Nicht-Einhaltung von Terminen. (Lödding und Wiendahl 2005, S. 41)

2.3.2 Resilienz, Robustheit und Stabilität der Planung

Resilienz umschreibt in zahlreichen wissenschaftlichen Disziplinen einen erfolgreichen Umgang mit exogenen Störungen (Wink 2016). Der Begriff kommt einerseits

aus der Psychologie und andererseits der Fähigkeit eines Materials sich elastisch zu verformen und anschließend in seine Ausgangslage zurückzukehren. Dies spiegelt sich am ursprünglichen lateinischen Wort „resilire“ (zurückspringen).

Im Zusammenhang mit der PPS bedeutet dies also die Fähigkeit eines (Produktions)-Planes Abweichungen und Störungen so zu kompensieren, dass er – analog zu einer Feder – unbeschädigt in seinen Ursprungszustand zurückfindet, zumindest aber weiterhin funktionsfähig bleibt (Wink 2016).

Die Begriffe Planungsstabilität, Robustheit und vor allem (ERP/Scheduling)-Nervosität tauchen in der Literatur immer wieder auf. Bereits mit der Entwicklung von MRP-Verfahren in den 70-er Jahren wurde dies diskutiert. GENIN liefert eine gut nachvollziehbare Einteilung in Stabilität und Robustheit. Das Erste ist das Gegenteil von Nervosität. Diese bezeichnet die relevanten Anpassungen an den Mengen pro Periode in MRP-Plänen. Robustheit dagegen kennzeichnet eine geringfügige Änderung von Charakteristiken trotz diverser Störfaktoren (Genin et al. 2007).

In Anlehnung daran wird in dieser Arbeit die Resilienz in zwei Ebenen betrachtet. Störungen der Produktion erfordern einerseits Änderungen am Plan, die unter Umständen die Fertigung beeinflussen und das Vertrauen in die Planung unterminieren (Stabilität bzw. Nervosität). Die (geringe) Anzahl von Planänderungen ist also ein Maß für die Stabilität. Eine solche ermöglicht es der Produktion, sich rechtzeitig auf einen Plan einzustellen. Die Robustheit dagegen bezeichnet die Auswirkungen auf das Ergebnis, in diesem Falle also die Liefertermine.

Dabei sind die beiden Größen nicht deckungsgleich. So können häufige Planänderungen notwendig werden, um Störungen zu kompensieren und dennoch den Planliefertermin zu halten. Umgekehrt kann eine Fixierung der Planung dazu führen, dass eine Kompensation der Abweichungen nicht mehr möglich ist und die Termintreue sinkt. (Genin et al. 2007)

2.4 Operative Produktionsplanung

Angesichts der großen Menge an Literatur gibt es zahlreiche unterschiedliche und häufig widersprüchliche Definitionen. Insbesondere die folgenden Ausführungen zur Einteilung in strategische, taktische und operative Planungsebenen werden in der Literatur zum Teil verschieden gehandhabt. Im Interesse der Konsistenz folgt diese Arbeit wo immer möglich den anerkannten Lehrbuchdefinitionen von weitreichend zitierten Autoren.

2.4.1 Einordnung in die Unternehmensplanung

WÖHE gliedert die Unternehmensplanung in vier Teile. In der Grundsatzplanung werden zeitlich unbefristet Festlegungen getroffen. Dazu gehören Branchenzugehörigkeit, Führungskonzeption, Informations- und Ausschüttungspolitik, Finanzierungsgrundsätze usw. (Wöhe und Döring 2013, 76ff).

Die strategische Planung soll Erfolgspotentiale sichern und erschließen sowie Risiken vermeiden. Dazu werden im Rahmen der strategischen Analyse – häufig mit der SWOT-Methode – unternehmensbezogene und umweltbezogene Einflussfaktoren analysiert. Sie entwickelt keine konkreten Handlungsprogramme für die Funktionsbereiche, sondern dient der Vorgabe und Koordinierung der nachfolgenden Planungsebenen.

Parameter	Taktische Planung	Operative Planung
Planungsziel	Optimierung langfristig wirkender Kapazitäten	Feinplanung auf Basis der gegebenen Kapazitäten
Planungszeitraum	Mehrere Jahre (Dauer der Kapitalbindung)	Maximal ein Jahr
Planungsgegenstände	• Struktur des Produktions- und Absatzprogramms • Stammpersonalkapazität • Betriebsmittelkapazität • Langfristige Lieferverträge ua.	• Bestellmengen • Einzelaufträge • Maschinenbelegung • Eigen- und Fremtransport u.a.
Erfolgmaßstäbe	Ein- und Auszahlungen	Ein- und Auszahlungen, Erlöse, Kosten, Deckungsbeiträge

Abbildung 8: Gegenstände taktischer und operativer Planung nach WÖHE

Abbildung 8 wurde aus WÖHE (Wöhe und Döring 2013, S. 77) übernommen. Sie zeigt die Abgrenzung zwischen der hier fokussierten operativen Planung und der taktischen Planung. Diese Pläne gibt es in jedem Funktionsbereich. Das ermöglicht eine Zuordnung zu aufbauorganisatorischen Verantwortlichen:

- Forschungs- und Entwicklungsplanung
- Absatzplanung
- Produktions- und Beschaffungsplanung
- Personalplanung
- Investitions- und Finanzierungsplanung

2.4.2 Hierarchische Planung

Dabei ist unmittelbar erkennbar, dass die einzelnen Teilpläne koordiniert werden müssen um zueinander konsistent zu sein. Dies betrifft sowohl die zeitlichen (strategisch/taktisch/operativ) als auch die sachlichen Abhängigkeiten. Insbesondere gibt es Interdependenzen zur Abstimmung von Absatzplanung einerseits und Kapazitätsplanungen im Bereich Personal und Investitionen andererseits. Beide beeinflussen die Produktions- und Beschaffungsplanung.

In der Regel ist der Absatz der Engpass, so dass es sich anbietet mit dessen Planung zu beginnen. Gerade die fokussieren Einzel- und Kleinserienfertiger arbeiten in der Regel als Auftragsfertiger, d.h. sie produzieren nur wenige Komponenten ohne

Kundenauftragsbezug und verzichten daher oft auf eine dedizierte Absatzplanung. Stattdessen werden die tatsächlichen Kundenaufträge als Planungsgrundlage verwendet.

Die operative Produktionsplanung setzt gemäß dieser Definition die Kapazitäten und Produktionsbedarfe (sowohl Mengen und Termine als auch Technologien wie sie in Arbeitsplan und Stückliste definiert wurden) voraus. Sie beschäftigt sich mit der Frage, wie unter diesen Randbedingungen ein sinnvolles Ergebnis erreicht wird und legt dazu konkret die „Termin-, Kapazitäts- und Mengenbezogene Fertigung und Montage“ fest (Schuh und Stich 2012). Sie nimmt damit die Fertigungsstammdaten aus Kapitel 2.1.3, die zur Verfügung stehenden Kapazitäten und den Absatzplan (in der Regel auf Basis von Kundenaufträgen und einigen wenigen prognosegestützten Vorplanungsbedarfen) als gegeben an und versucht unter diesen Randbedingungen ein möglichst gutes Ergebnis zu erzielen.

Damit legt sie Termine auf Arbeitsgangs (und damit auch Kundenauftragsebene) fest unter Berücksichtigung der Randbedingungen der Produktion aus Kapitel 2.2.

2.4.3 Aachener PPS-Modell

Das Aachener PPS-Modell wurde bereits 1998 in Buchform veröffentlicht (Schuh und Stich 2012). Dabei lehnt es in seiner Beschreibung sehr eng an die typischen Module von ERP-Software im betrieblichen Alltag an.

Das Werk definiert verschiedene Sichten auf die PPS. Für diese Arbeit ist vor allem eine Beschreibung der Aufgaben der PPS relevant (Schuh und Stich 2012, 30ff). In der zugehörigen Abbildung wird der Fokus dieser Dissertation rot markiert.

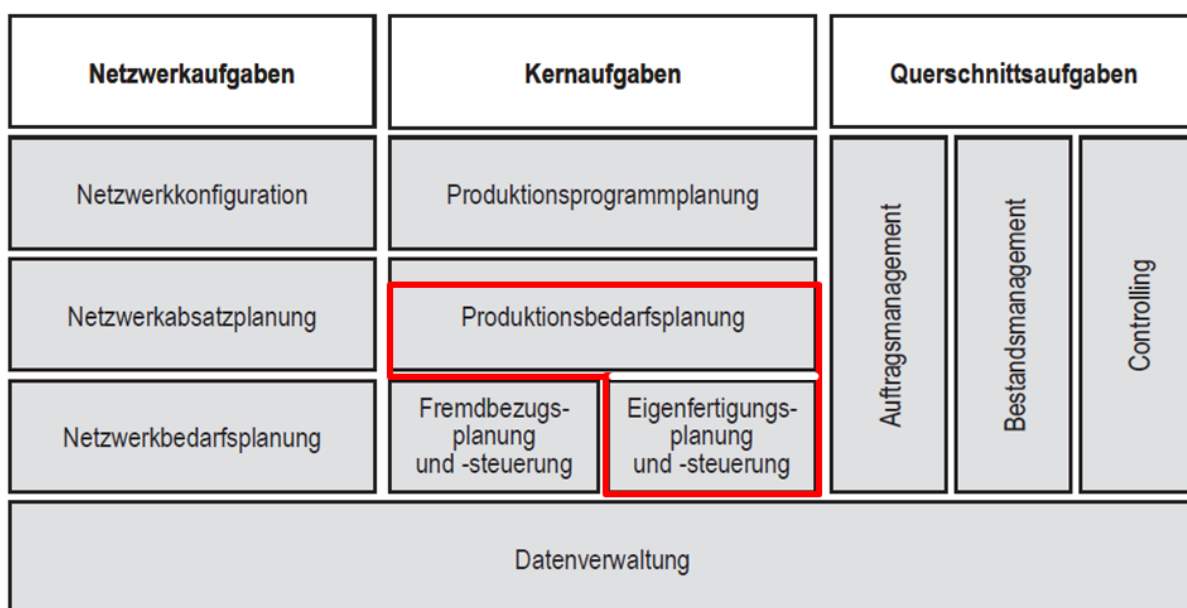


Abbildung 9: Aachener PPS-Modell nach Schuh und Stich

Die Produktionsprogrammplanung plant rollierend und periodisch die Absatzmengen pro Produkt. Entsprechend der Definition aus Kapitel 2.4.2 ist sie ein Kernbestandteil der taktischen Planung. Das Erfolgskriterium besteht darin, sowohl die Markterwartungen als auch die eigenen Produktions- und Beschaffungskapazitäten zu berücksichtigen, so dass dieser Plan realistisch umgesetzt werden kann. Um den Planungs- und Berechnungsaufwand gering zu halten, wird dabei oftmals eine Verdichtung auf Produktgruppen vorgenommen.

In der Praxis erfolgt dabei die Planung durch Auflösung der Stücklisten im sogenannten MRP-Lauf ohne Berücksichtigung von Kapazitäten. Mit Kenntnis der benötigten Aufträge können summarisch Kapazitäten abgeschätzt und Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung vorgenommen werden. Die typischerweise eingesetzten Verfahren zeigen zwar Kapazitätsengpässe auf, unterstützen aber nicht die Prognose der tatsächlichen Liefertermine.

Im Falle der reinen Auftragsfertigung, der häufig in der Einzel- und Kleinserienfertigung vorliegt, kann diese Phase auch entfallen.

Die operative Planung nach Wöhe wird in diesem Rahmen zweigeteilt in die Produktionsbedarfsermittlung und die Eigenfertigungsplanung und –Steuerung. In beiden Stufen werden die Produktionsfaktoren wie Material, Betriebsmittel, Personal, Transport- und Fertigungshilfsmittel zeitlich den Aufträgen zugeordnet. Dies geschieht auch heute noch häufig stufenweise (siehe Kapitel 3.1.3) mit einem immer höheren Detaillierungsgrad, obwohl die Rückkopplungen ein optimales Ergebnis verhindern. Allerdings gibt es mittlerweile weitere Verfahren unter dem Gattungsbegriff Advanced-Planning-Systeme, die eine simultane Planung vornehmen. (Schuh und Stich 2012, S. 44).

2.4.4 Internet of Production

Abbildung 10 zeigt das in Aachen entwickelte Internet of Production (IoP), (Schuh et al. 2017). Herzstück ist ein Schaubild, welches alle Phasen des Produktlebenszyklus des Unternehmens umfasst. Dabei liegt der Fokus auf den Informationsflüssen. Dieses Bild ist gut geeignet, den neu zu entwickelnden Algorithmus in die IT-Struktur der Unternehmen einzuordnen.

Das Bild gliedert sich zunächst in die 3 Phasen von der Produktentwicklung, der Fertigung und zuletzt der Nutzung (und ggf. des Recyclings) des Produktes. Dabei werden diese in einem Unternehmen stets parallel stattfinden. Während sich einige Produkte noch entwickeln werden sich andere über Jahre hinweg in der Produktion und gleichzeitig in der Nutzung befinden.

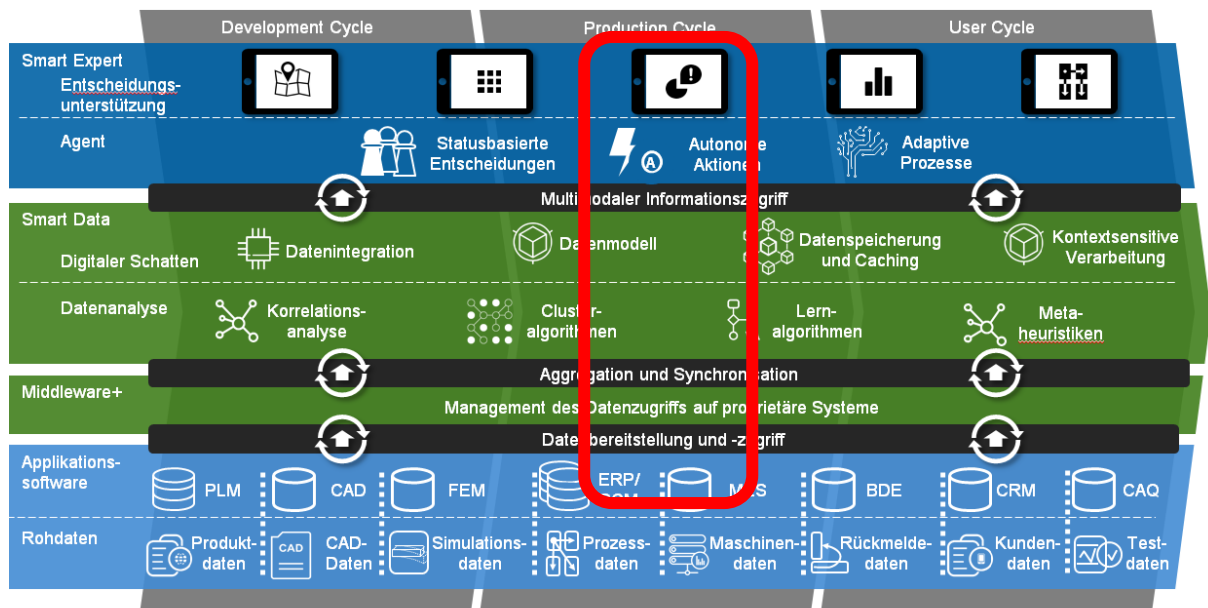


Abbildung 10: Internet of Production

Auf vertikaler Ebene postuliert das Bild, dass es weiterhin die etablierten IT-Systeme geben wird, die typischerweise bestimmten Prozessen und Phasen des Lebenszyklus zugeordnet werden können. Die Vision hinter dem IoP besteht darin, dass die Daten aus den verschiedenen Systemen in einem digitalen Schatten zusammengeführt werden. Methoden der künstlichen Intelligenz oder des Machine Learnings können nun spezielle Optimierungsprobleme lösen und Ergebnisse in Form von Apps dem Benutzer übersichtlich zur Verfügung stellen. Dadurch wird ein Best-of-Breed-Ansatz ermöglicht, bei dem relativ schnell spezialisierte Lösungen für bestimmte Probleme entwickelt und in die Architektur integriert werden können.

Welche Inhalte genau in den digitalen Schatten gehören, ist Gegenstand aktueller Forschung. Klar ist jedoch, dass es sich dabei nur um relevante Daten handeln soll, das heißt, dass nur so viel wie notwendig und nicht so viel wie möglich darin gespeichert wird. BLUM zeigt exemplarisch ein mögliches Datenmodell und geht auf die Schwierigkeiten der Datenkonsistenz ein (Blum 2019, S. 125).

Die Produktionsplanung bzw. Produktionsfeinplanung gegen begrenzte Kapazitäten hat dieses Konzept bereits vor Jahren vorweg genommen. Darin stellen verschiedene Systeme – aber typischerweise Enterprise Resource Planning (ERP) – ihre planungsrelevanten Daten zur Verfügung. Diese werden von einem Advanced Planning System (APS) über Nacht optimiert. Das genaue Optimierungsziel ist dabei unternehmensspezifisch, aber das Ergebnis besteht aus Terminen für jeden Arbeitsgang. Diese wiederum werden in das ERP und ggf. Manufacturing Execution System (MES) übernommen um den Mitarbeitern ihre Arbeitsprozesse vorzugeben.

2.4.5 Alternative Einordnungen

Grundsätzlich folgt die Literatur dem hierarchischen Planungsansatz, wonach sukzessiv Absatz, Produktion, Beschaffung und Investitionen geplant werden. SCHNEIDER benutzt die gleiche Gliederung (Schneider et al. 2005, S. 15) während BRONNER unter operativer Planung eine mittelfristige Planung mit 3-5 jährigem Zeit-horizont und damit eher die taktische Planung nach WÖHE versteht (Bronner 2001, S. 57).

Einige Autoren fassen die Absatzplanung als Teil der operativen Produktionsplanung auf (Günther und Tempelmeier 2016, 127ff), (Schneider et al. 2005, S. 14). Viele Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung arbeiten jedoch nach dem Prinzip der Auftragsfertigung, d.h. es werden im Wesentlichen konkrete Kundenaufträge (im Gegensatz zu einem prognoseorientierten Bedarf) eingeplant. Weiterhin können die Mengen aus dem Absatzplan in Form von virtuellen Kundenaufträgen übernommen oder durch die typisch eingesetzten Losgrößen- und Bestandspolitiken implizit eine anonyme Lagerfertigung sichergestellt werden. Diese Arbeit betrachtet deshalb die Absatzplanung als vorgelagerten Schritt.

2.5 Abgrenzung von Simulation und Planung

2.5.1 Simulation

Die VDI-Norm 3663 für die Themenfelder Logistik-, Materialfluss- und Produktionssysteme definiert eine Simulation als „ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“. (VDI 3633).

Die Norm verlangt also eine (realistische) Nachbildung eines realen Systems, die Möglichkeit in diesem Modell Parameter zu verändern und Experimente durchzuführen. Die Definition fordert weiterhin, dass die gewonnenen Einsichten verwendet werden und damit einen praktischen Nutzen haben. Die Übertragung auf die Wirklichkeit kann sich dabei denklogisch nur auf die Zukunft beziehen, da die Vergangenheit nicht mehr verändert werden kann. In der Norm wird ebenfalls gefordert, dass das Modell die Realität hinreichend genau abbildet, da ansonsten keine sinnvolle Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist.

2.5.2 Ereignisdiskrete Simulation

Die VDI-Norm 3633 beschreibt speziell die Simulation von Materialfluss, Logistik- und Produktionssystemen. Sie konkretisiert die diskrete Simulation dahingehend, dass sich der Modellzustand durch Ereignisse sprunghaft verändert (VDI 3633, S. 10). Eine ereignisdiskrete Variante davon wird dadurch gekennzeichnet, dass die Eintrittszeitpunkte durch die Ereignisse selber festgelegt werden (VDI 3633, S. 11). Anwendungsfall eines solchen Modells ist die Materialflusssimulation (VDI 3633, S. 18).

Diese dient der Analyse von geplanten Materialflusssystemen, um beispielsweise die Leistungsfähigkeit einer Systemvariante nachzuweisen und ggf. zu verbessern.

Kapitel 3.1.6 beschreibt aktuelle Forschungsarbeiten zu diesem Thema, Kapitel 7.2 eine konkrete Implementierung. An dieser Stelle soll die Definition nur beispielhaft erläutert werden. So können Bearbeitungsstart und –Ende eines Arbeitsgangs an einem Arbeitsplatz als Ereignis modelliert werden. Mit dem Beginn der Bearbeitung wird der Status der Anlage auf belegt geändert, mit dem Bearbeitungsende wird die Maschine freigegeben und Nachfolgevorgänge in eine Warteschlange eingefügt. Sobald der Arbeitsplatz wieder zur Verfügung steht (Ereignis) wird aus der Warteschlange ein Vorgang ausgewählt, das Bearbeitungsende berechnet und als Ereignis mit dem berechneten Enddatum in eine entsprechende Datenstruktur eingetragen.

Damit wird der Zustand des Modells durch die Warteschlange der bereiten Vorgänge einerseits und die Ereignisse als aktuellem Belegungsstatus der Arbeitsplätze andererseits beschrieben.

2.5.3 Planung und Optimierung

WÖHE und DÖRING definieren Planung als „die gedankliche Vorbereitung zielgerichteter Entscheidungen“ (Wöhe und Döring 2013, S. 73). Diese ist also immer zukunftsgerichtet und handlungsorientiert. Da es in der Regel mehrere Entscheidungsalternativen gibt, können auch mehrere Pläne entstehen. Wenn die Zielsetzung (beispielsweise hoher Gewinn oder kurze Lieferzeiten) bekannt sind, können die verschiedenen Alternativen bewertet und eine bestmögliche ausgewählt werden. Somit können die Phasen Zielbildung, Problemanalyse, Ermittlung und Bewertung der Alternativen unterschieden werden (Wöhe und Döring 2013, 73ff).

Die Notwendigkeit einer Planung ergibt sich aus ihren Funktionen: Die Auswahl einer guten von mehreren möglichen Handlungsalternativen erfüllt die Optimierungsfunktion. Der verbindliche Plan dient der Koordination der Beteiligten. Durch klare Aufgabenstellungen kann auch die Motivation der Mitarbeiter erhöht werden. Während der Ausführung vereinfacht die Existenz einer Planung die Problemfrüherkennung und zeigt im Rahmen der Flexibilität看funktion ggf. mögliche Anpassungen auf, insbesondere wenn Handlungsalternativen bereits im Planungsprozess untersucht und dokumentiert werden. (Pfohl und Stölzle 1996).

2.6 Zwischenfazit

Der Titel dieser Dissertationsschrift lautet: „Nutzung der ereignisdiskreten Simulation (EDS) für operative Produktionsplanung von mehrstufiger Einzel- und Kleinserienfertigung“. Die genannten Begriffe wurden definiert und in die entsprechenden Ordnungsrahmen der betriebswirtschaftlichen und produktionstheoretischen Lehrbücher eingeordnet.

In einer realen Produktion existieren zahlreiche Handlungsalternativen. So können Herstellungsprozesse verändert, Lieferanten ausgetauscht oder die Entscheidung für eine hausinterne Fertigung bzw. Fremdvergabe revidiert werden. Diese Entscheidungen liegen auf der taktischen oder gar strategischen Planungsebene und werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Da in einer Einzel- und Kleinserienfertigung die Aufträge vom Kunden in der Regel vorgegeben werden (Auftragsfertigung) und sich die Sekundärbedarfe aus den Stammdaten eindeutig ableiten lassen und andererseits gängige ERP-Systeme diese Funktion regelmäßig implementieren, wird die Frage der Auftragserzeugung für diese Arbeit weitgehend ausgeklammert.

Auf Ebene der operativen Produktionsplanung müssen damit die Freiheitsgrade:

- Auftragsfreigabe, d.h. Entscheidung über den Start der Produktion
- Maschinenbelegung, d.h. Zuordnung von Mitarbeitern zu Arbeitsplätzen
- Reihenfolgeplanung, d.h. Entscheidung der Abarbeitungsreihenfolge

sinnvoll festgelegt werden. Dabei sind aus vorgelagerten Stufen das Kapazitätsangebot, die Nachfrage in Form von Kundenaufträgen (und in geringem Umfang prognoseorientierten Vorplanungsbedarfen) und Mitarbeiter sowie Maschinenkapazitäten vorgegeben. Diese Freiheitsgrade entsprechen der Festlegung von Terminen auf Vorgangsebene. Dabei gelten als Randbedingungen:

- Keine Doppelbelegung von Ressourcen (Maschinen oder Mitarbeitern)
- Ein Vorgang kann nur bearbeitet werden, wenn Mitarbeiter, Maschine und Material zur Verfügung stehen
- Fest definierte Übergangszeiten zwischen Vorgängen müssen eingehalten werden.

Die Planung kann durch geschickte Wahl der Freiheitsgrade die logistische Leistung eines Unternehmens beeinflussen durch:

- Kürzere Durchlauf- und Lieferzeiten sowie höhere Auslastung
- Niedrigere Bestände

Die Kostenminimierung der Produktion durch andere Fertigungsverfahren oder die Zusammenfassung von Aufträgen zur Rüstzeitminimierung ist dagegen nicht Gegenstand dieser Arbeit, da sie auf anderen Planungsebenen angesiedelt ist. Neben den genannten Kennzahlen ist es wichtig, nicht nur „gute“ Empfehlungen zu geben, sondern diese auch bei Produktionsabweichungen einzuhalten. In diesem Sinne ist es wesentlich, die Lieferterminabweichung zu minimieren bzw. die Termintreue zu maximieren (Robustheit der Planung). Von untergeordneter Bedeutung ist dagegen, einen einmal gefassten Plan möglichst exakt einzuhalten (Stabilität).

Alle vorgestellten Systeme (Simulation, Optimierung, Planung) bilden ein Modell dieser komplexen Realität, welches die Einhaltung der Prämissen (Kapazitäten, Aufträge usw.) sicherstellt. Die Güte dieses Modells wird in allen Fällen an Hand von Kennzahlen bewertet. Zwar hat die Planung eine Optimierungsfunktion, in der sie

aus verschiedenen Alternativen die beste auswählt, die Praxis begnügt sich jedoch oftmals mit einer sinnvollen Lösung um den Aufwand gering zu halten. Dafür kommen oftmals auch in sogenannten Optimierungssystemen einfache Heuristiken zum Einsatz. Andererseits darf eine (Materialfluss)-Simulation nicht wesentlich schlechtere Handlungsalternativen annehmen als später in der Realität auftreten, da ansonsten ihre Ergebnisse an Aussagekraft verlieren.

In der technischen Umsetzung gibt es ebenso große Überschneidungen. So werden vermehrt Softwaresysteme eingesetzt, die Daten aus den betrieblichen Standardsystemen extrahieren und um berechnete Termine ergänzen.

Insofern stellt sich die Frage, ob bestehende Planungs- und Optimierungslösungen durch Simulationstechniken ersetzt werden können und welche Vor- und Nachteile ggf. damit verbunden sind. Dazu darf der Unterschied in der Lösungsgüte zwischen einem dedizierten Optimierungssystem und einer Simulation ein gewisses Maß nicht überschreiten. Wenn diese Qualität aber vergleichbar ist, bieten die Verfahren welche für die Simulation entwickelt wurden, potentielle Vorteile wie einfache Benutzbarkeit, kurze Rechenzeiten und hohe Resilienz gegenüber Fehlern in den Eingangsdaten.

3 Stand der Erkenntnisse

In den ersten beiden Kapiteln wurde festgelegt, dass eine Software zur Berechnung von Terminen auf Vorgangsebene entwickelt werden soll. Dabei wurden auch die notwendigen Daten und Randbedingungen eines machbaren Produktionsplanes ausführlich erläutert.

Die Anforderungen an diese Termine waren

- Koordination von Komponenten und Montageprozessen zur Bestandsminimierung und allgemein die Berücksichtigung von Materialverfügbarkeiten
- Die Berücksichtigung von Personal- und Maschinenkapazität sowie der zugehörigen, möglichen Qualifikation

Neben den bekannten Verfahren zur Erfüllung der Planungsaufgabe wird im letzten Teil Literatur vorgestellt, die sich mit der Bewertung von Planungsverfahren vorstellt und schließt mit einer Betrachtung zur Einbindung der Software in die betrieblichen Prozesse.

3.1 Ansätze zur Festlegung von Terminen

Dieses Kapitel diskutiert zunächst die bekannten Verfahren zur Festlegung von Terminen und ihre Eignung für das gewählte Problem. Im Interesse der Vollständigkeit werden auch Algorithmen diskutiert, die nicht alle gestellten Anforderungen erfüllen, aber bei geschickter Wahl der Parameter dennoch eine sinnvolle Unterstützung geben können. Auf Grund der Bedeutung für diese Arbeit werden die Verfahren auf Basis von Prioritätsregeln, insbesondere die ereignisdiskrete Simulation, in eigenen Unterkapiteln behandelt.

3.1.1 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden theoretische Grundlagen diskutiert.

Aus dem Gesetz von Little ergibt sich, dass die Durchlaufzeit eines Auftrages durch die Produktion proportional zum Bestand (d.h. der Anzahl anderer Aufträge in der Produktion) und umgekehrt proportional zur Leistung (d.h. der Anzahl der fertig gestellten Aufträge pro Zeiteinheit) ist (Hopp und Spearman 2001, S. 223). Da die Leistung durch die Kapazität begrenzt wird, kann eine Reduzierung des Bestandes durch eine spätere Auftragsfreigabe die Durchlaufzeit reduzieren und vorhersehbarer machen.

Die Kingman-Gleichung erweitert die Vorhersage der Durchlaufzeit um den Einfluss stochastischer Faktoren (Hopp und Spearman 2001, S. 270). Daraus kann abgeleitet werden, dass bei einer Volllauslastung der Ressourcen und stochastischen Schwankungen in der Ankunftsrate von Aufträgen sowie Maschinenverfügbarkeiten die

Durchlaufzeit extrem stark ansteigt. Dabei sind die Auswirkungen von wenigen großen Abweichungen stärker ausgeprägt als viele geringfügige Abweichungen.

Weitere Grundlagenarbeiten beschäftigen sich mit der Reihenfolgebildung an Arbeitssystemen und untersuchen dazu verschiedene Prioritätsregeln. Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass keine Prioritätsregel in einem komplexen Job-Shop ein (wie auch immer geartetes) optimales Ergebnis liefert (Ramasesh 1990).

Das Erreichen eines solchen Optimums ist nachweislich NP-hart worunter die Informatik versteht, dass es sehr wahrscheinlich keinen Algorithmus gibt, der in sinnvoller Rechenzeit eine Lösung findet (Blazewicz et al. 2019, S. 100).

Allerdings können in speziellen Problemstellungen, bei denen nur eine Maschine betrachtet wird, Aussagen bewiesen werden: So ist Earliest-Due-Date (d.h. die Sortierung der Aufträge nach ihrem (gewichteten) Liefertermin) hinsichtlich der Termintreue relativ gut und im schlechtesten Fall beweisbar 1,5 Mal schlechter als das (unbekannte) Optimum (Blazewicz et al. 2019, S. 102).

3.1.2 Analytische Verfahren

Aus dem Gesetz von Little wurde von verschiedenen Autoren gefolgert, dass der Bestand an Fertigungsaufträgen in der Produktion begrenzt werden muss und eine Reihe von Verfahren zu diesem Zweck entwickelt.

Konkrete Verfahrensbeschreibungen finden sich bei LÖDDING in den entsprechenden Kapiteln für Workload Control, Belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BoA), Engpasssteuerung bei mehreren Engpässen, dezentraler bestandsorientierter Fertigungssteuerung und CONWIP (Lödding und Wiendahl 2005). Weitere Verfahrensbeschreibungen u.a. zu MRP-C, CONWIP und Kanban werden von HOPP und SPEARMAN beschrieben (Hopp und Spearman 2001)

Diesen Verfahren ist gemein, dass sie die Auftragsfreigabe in die Produktion verzögern. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Freigaberegeln, die sich jedoch stets am Umlaufbestand der Aufträge orientiert. Selbst bei konstanten und kurzen Durchlaufzeiten in der Produktion muss nunmehr der Zeitpunkt der Auftragsfreigabe (entspricht der Dauer der Belastungsverschiebung) prognostiziert werden. Dazu bieten diese Verfahren keine Hilfestellung an und sind damit nicht in der Lage, Termine auf Vorgangsebene und letzten Endes Lieferterminprognosen abzugeben. Die Koordination von Terminen über mehrere Dispositionsstufen wird überhaupt nicht betrachtet. Darüber hinaus ist auch die Vorhersage der Durchlaufzeit nicht uneingeschränkt möglich, da Materialabrisse und Blockierungen nicht ausgeschlossen werden können und die Leistungserbringung reduzieren. Zusammenfassend können diese Verfahren in der Steuerung der Produktion hilfreich sein, berechnen jedoch keine Termine.

3.1.3 Reine Materialverfügbarkeit

In diesem Abschnitt werden Verfahren vorgestellt, die zumindest auf Auftragsebene Termine festlegen und den Anspruch haben, die Produktion von Komponenten und deren Montage auf einander abzustimmen, jedoch zahlreiche andere Einschränkungen haben, die wichtigste davon, dass sie keine Kapazitäten betrachten.

Stochastische Verfahren

Stochastische oder verbrauchsorientierte Verfahren sind in vielen kommerziellen ERP-Systemen implementiert. „Diese basieren auf den Verbrauchswerten der Vergangenheit und schließen mithilfe der Prognose oder von statistischen Verfahren auf den zukünftigen Bedarf“ (Dickersbach und Keller 2014, S. 260). Sie erzeugen Aufträge und legen Bedarfstermine pro Auftrag fest. (Günther und Tempelmeier 2016, S. 128ff). Eine Prognose über Kundenliefertermine erfolgt nicht, da keine Stücklistenbeziehungen betrachtet werden.

Material Requirements Planning (MRP)

Dieses Verfahren wurde zuerst in den 1970-ern entwickelt und ist mittlerweile ebenfalls weit verbreitet (Orlicky 1975; Dickersbach und Keller 2014, 272ff). Es ermittelt ausgehend vom Kundenprimärbedarf über eine Stücklistenauflösung den Sekundärbedarf. Wenn dieser Bedarf nicht aus bereits bestehenden Beständen oder eingeplanten Zugängen befriedigt werden kann, erzeugt der Algorithmus neue Aufträge und führt auch für diese eine entsprechende Stücklistenauflösung aus.

Das Verfahren betrachtet keine Kapazitäten und geht davon aus, dass Probleme bei der Beschaffung in einer Dispositionsstufe gelöst werden, d.h. selbst wenn erkennbar ein Bedarf nicht rechtzeitig befriedigt werden kann, erfolgt keine Anpassung des Kundentermins – der Plan ist nicht zulässig. Somit erfolgt die Koordinierung von Komponenten und Montage nur in eine Richtung – rückwärts. Wenn Probleme auf untergeordneter Ebene entstehen, führt dies zu keiner Änderung an bereits eingeplanten Aufträgen.

TEMPELMEIER stellt fest, dass es sich hierbei um keine Planung, sondern eine Bedarfsrechnung handelt, die keine Kapazitäten berücksichtigt und insgesamt nicht machbare Pläne erzeugt (Tempelmeier 2006).

Verfügbarkeitsprüfung

Das natürliche Gegenstück zum MRP ist die ebenfalls oftmals implementierte Verfügbarkeitsprüfung (Available-to-Promise, ATP (Stadtler und Kilger 2000, S. 180)). Darin wird für einen Bedarf (z.B. Kundenauftrag) geprüft, ob der bestehende Bestand und fest eingeplante Zugänge für eine Belieferung ausreichen bzw. zu welchem Datum eine Lieferung möglich ist. Diese Prüfung betrachtet aber zumindest in SAP (SAP AG 2019; Dickersbach und Keller 2014, 390ff) keine untergeordneten Komponenten, sondern nur die direkten Stücklistenpositionen. Wenn also Teile für eine Baugruppe fehlen, spiegelt sich dies nicht in der Verfügbarkeitsprüfung des Erzeug-

nisses wieder. Damit ist auf Ebene des Kundenauftrages nicht ersichtlich, ob dieser überhaupt unter Materialverfügbarkeitsgesichtspunkten realistisch ist bzw. ob die bedarfsdeckenden Fertigungsaufträge ihrerseits realistisch sind unter dem Aspekt der Materialverfügbarkeit.

MRP-II

MRP-II erweitert das MRP-Verfahren nur geringfügig indem nicht nur auf Auftrags-ebene, sondern für jeden Vorgang Termine mit Hilfe von festen Durchlaufzeiten ermittelt werden. Daraus ergeben sich Kapazitätsbedarfe die entsprechend gepflegten Kapazitätsangeboten gegenüber gestellt werden können. Eine Lösung der Abweichungen muss jedoch manuell gefunden werden. Am Beispiel von SAP R/3 beschreiben DICKERSBACH und KELLER den Kapazitätsabgleich mit einem Grobplanungsprofil (Dickersbach und Keller 2014, 200ff) sowie die Verrechnung von Absatzplan und realen Bedarfen (Dickersbach und Keller 2014, 230ff) und die Einstellungen zur Terminierung bei der Auftragsfreigabe (Dickersbach und Keller 2014, 282ff).

Kombinierte Vorwärts- und Rückwärtsplanung

Um wenigstens unter dem Aspekt der Materialverfügbarkeit konsistente Pläne zu ermitteln, wurde in vielen Systemen eine kombinierte Vorwärts- und Rückwärtsplanung mit festen Durchlaufzeiten implementiert. (Schuh und Stich 2012). Dabei wird analog zum MRP-Verfahren zunächst rückwärts geplant, anschließend entsprechend der Verfügbarkeitsprüfung – jedoch über alle Dispositionsstufen hinweg – eine Vorwärtsplanung durchgeführt. Der zugesagte Termin kann in diesem Falle einfach aus dem Maximum aus frühestem und spätestem Termin bestimmt werden. (Schuh und Stich 2012). Obwohl ein solches Verfahren konzeptionell einfach ist, bietet das SAP R/3 als marktführendes System diese Funktion nicht vollumfänglich. Dort werden Termine in der Regel nur einmal bei Eröffnung des Auftrages berechnet und nicht an veränderte Rahmenbedingungen angepasst (Dickersbach und Keller 2014, 373ff). Weiterhin wird im SAP-System nur die unmittelbar vorgelagerte und nachgelagerte Fertigungsstufe berücksichtigt, andere Systeme schreiben diese Information über alle Dispositionsstufen fort.

Zwischenfazit

Zusammenfassend erfüllen die beschriebenen Systeme die Aufgaben von Auftrags-erzeugung, -Freigabe und Reihenfolgeplanung, jedoch nicht der Kapazitätszuordnung. Mit Ausnahme der kombinierten Vorwärts- und Rückwärtsplanung sind die erzeugten Pläne nicht einmal hinsichtlich der Materialverfügbarkeit in sich stimmig.

3.1.4 Reine Kapazitätsverfügbarkeit

In diesem Abschnitt werden Verfahren vorgestellt, die Kapazitäten betrachten, jedoch hinsichtlich der Materialverfügbarkeit unvollständig sind.

Shifting Bottleneck Heuristik

Das Verfahren basiert auf der Idee von GOLDRATT und COX, dass jede Produktion durch ihren Engpass bestimmt wird und es die wichtigste Aufgabe ist, diesen zu versorgen (Goldratt und Cox 2013).

Zunächst wird an Hand verschiedener Kennzahlen der Engpass einer Produktion bestimmt und für diesen eine Reihenfolge festgelegt. Dadurch ergeben sich Restriktionen für die Start- und Endzeitpunkte der übrigen Arbeitsgänge. Im Wesentlichen wechselt der Algorithmus zwischen der Planung der jeweils kritischsten Maschine und einem Reihenfolgenproblem (Srinivasan 2012). Für das Reihenfolgeproblem kann entweder eine Optimierung mittels Branch-and-Bound (Srinivasan 2012), (Pinedo 2016, 193ff) oder wiederum eine Heuristik mit Hilfe von Reihenfolgeregelungen (Mönch und Rose O. 2004) verwendet werden.

Das Verfahren betrachtet ausschließlich Maschinenkapazitäten und berücksichtigt weder Personal noch Materialengpässe.

Constraint Propagation

Diese Verfahrensklasse wurde auch auf andere Probleme angewandt und gehört zum Standardmethodenkasten des Operations Research. Im Kontext einer Produktionsplanung legt das System für jeden Arbeitsgang mittels Vorwärts- und Rückwärts-terminierung früheste Start- und Endtermine fest. Aus der Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Aufträgen ergeben sich Randbedingungen (Constraints) die diese Terminfenster weiter verengen. Nachdem die Randbedingungen festgelegt und damit der Lösungsraum verringert wurde, bleiben in aller Regel dennoch Freiheitsgrade bestehen. Die Festlegung dieser Freiheitsgrade – zum Beispiel die Entscheidung über die Reihenfolge zweier Aufträge – wird zunächst probeweise getroffen, aber ggf. im Rahmen eines Backtrackings revidiert (Pinedo 2016, S. 207). Auch in diesen Fällen ist die Laufzeit oftmals sehr hoch und es werden im Wesentlichen Kapazitäten, aber keine Materialverfügbarkeiten betrachtet.

Vollständige Enumeration und Branch-and-Bound

Eine optimale Lösung kann theoretisch durch das Ausprobieren aller denkbaren Produktionspläne gefunden werden. Branch-and-Bound ist ein allgemeines Verfahrenskonzept, welches versucht den Lösungsraum einzuschränken. Dennoch sind diese Verfahren für reale Produktionsprobleme auf Grund ihrer Laufzeit nicht anwendbar.

Leitstände, Prioritätsregeln und MES

In vielen Unternehmen wird die Planungslogik des ERP-Systems um Leitstände ergänzt. Diese sind entweder eigene Softwarelösungen oder Teil eines anderen Softwarepaketes, typischerweise entweder Teil des ERP oder eines Manufacturing Exe-

cution Systems (MES). Die Planung beschränkt sich in diesen Fällen jedoch in aller Regel auf freigegebene Fertigungsaufträge, für die das Material bereits verfügbar ist. (Kletti und Schumacher 2011, 16ff), (Kurbel 2003, 229ff). Ein Marktüberblick der Trovarit AG zeigt, dass nur ein Bruchteil der Systeme sich überhaupt mit der Materialverfügbarkeit beschäftigt (Trovarit AG 2018, 150ff).

Zwischenfazit

Die genannten Verfahren berechnen Termine auf Vorgangsebene die mit den Kapazitäten abgestimmt sind. Sie betrachten jedoch die Materialverfügbarkeit bzw. Koordination von Aufträgen über mehrere Dispositionsstufen gar nicht und häufig nur die Maschinenverfügbarkeit. In der industriellen Praxis werden häufig Verfahren kombiniert, in denen zunächst durch ein MRP oder eine Durchlaufterminierung Ecktermine festgelegt werden und dann im kurzfristigen Bereich die Aufträge durch einen Leitstand gegen begrenzte Kapazität geplant werden. Ein wesentliches Problem ist dabei, dass Liefertermine über mehrere Dispositionsstufen nur im MRP geplant werden ohne zu wissen, ob diese überhaupt machbar sind. Wenn sich in der kurzfristigen Feinplanung eine Verletzung der Ecktermine ergibt ist häufig unklar, wie der MRP-Plan angepasst werden soll.

3.1.5 Kapazitäts- und Materialverfügbarkeit

Die bisher betrachteten Verfahren betrachten entweder Materialverfügbarkeiten (vgl. Kapitel 3.1.3) oder Kapazitäten (vgl. Kapitel 3.1.4). In diesem Abschnitt werden Verfahren beschrieben, die sowohl Personal-, Material- und Maschinenverfügbarkeiten betrachten.

Lineare Programmierung

Eine Standardmethode des Operations Research ist der Einsatz von linearen Gleichungssystemen. HOPP und SPEARMAN zeigen exemplarisch eine Implementierung (Hopp und Spearman 2001, S. 538). Weitere Modellierungen finden sich u.a. bei HELBER (Helber 2014). Dabei werden Lagerzu- und Abgänge als Gleichungen modelliert und als Zielfunktion der Deckungsbeitrag optimiert. Jedoch berechnen diese Ansätze keine Termine auf Auftragsebene und erfordern grobe Vereinfachungen, zum Beispiel durch die Bildung von relativ groben Zeitrastern. Insbesondere die praktisch notwendige Begrenzung auf ganzzahlige Werte (z.B. können Fertigungslose nur in einer diskreten Anzahl gefertigt werden) erhöht die Rechenzeit oftmals auf ein nicht praktikables Maß. Deshalb empfiehlt die SAP die entsprechenden Verfahren in ihrem APS-System nur für die Grobplanung einzusetzen und damit festzustellen, ob ein Absatzprogramm überhaupt machbar ist (Dickersbach 2009, 277ff).

Metaheuristiken

GLOVER und KOCHENBERGER definieren im Vorwort zu ihrem Übersichtswerk: “Metaheuristics, in their original definition, are solution methods that orchestrate an interaction between local improvement procedures and higher level strategies to create a

process capable of escaping from local optima and performing a robust search of solution space” (Glover und Kochenberger 2003).

Es sind – wie der Name sagt – Näherungslösungen, die bestimmte Prinzipien auf verschiedene Problemstellungen anwenden. Dazu wird eine Fitnessfunktion definiert, die die Qualität einer Lösung (z.B. im Sinne von Auslastung, Durchsatz, Liefertermineinhaltung o.Ä.) bewertet und versucht eine Startlösung systematisch zu verbessern.

TASGETIREN untersucht mit gutem Erfolg die Anwendung von Partikelschwarmoptimierung und genetischen Algorithmen (GA) auf die Reihenfolgenbildung an einer einzelnen Maschine und deren Auswirkung auf die durchschnittliche Verspätung (Fatih Tasgetiren et al. 2006). SANDER plant in einer Fließfertigung mit Alternativmaschinen simultan die Maschinenbelegung und Reihenfolge mit GA (Sander 1994). WANG kombiniert Simulated Annealing mit genetischen Algorithmen und kommt dabei zu etwas besseren Ergebnissen als mit einem reinen Ansatz. (Wang und Zheng 2001).

OMKUMAR et al nutzen Ant Colony Optimization um eine mehrstufige Produktion zu planen, jedoch sind sie auf konvergierende Auftragsnetze beschränkt und versuchen gar nicht erst, Komponenten explizit zu koordinieren (Omkumar und Shahabudeen 2009). Ähnliches gilt für LIN der genetische Algorithmen verwendet um einen mehrstufigen Job-Shop zu planen (Lin et al. 2020).

PONGCHAROEN nutzt GA in einem mehrstufigen Produktionssystem (Pongcharoen et al. 2004). In diesem Beispiel verwenden sie zwei Produkte mit einer 4-stufigen Stückliste und maximal 135 Arbeitsgängen pro Auftrag. Sie weisen jedem der höchstens 270 (2x135) Arbeitsgänge eine Ident-Nummer zu und konkatenieren diese zu einem String. Dieser wird als Genom verwendet und durch die üblichen Operationen gekreuzt und mutiert. Dabei werden umfangreiche Reparaturmechanismen eingesetzt, um bei der Kreuzung/Mutation verloren gegangene Reihenfolgenbedingungen wiederherzustellen. Obwohl ihre Ergebnisse sehr positiv sind, ist es schwer vorstellbar, sinnvoll mit mehreren zehntausend Arbeitsgängen und entsprechend langen Chromosomen zu agieren.

GÜNTHER untersucht in seiner Dissertationsschrift eine ganze Reihe von derartigen Ansätzen mit gutem Erfolg, jedoch nur im Umfeld der Personaleinsatzplanung (Günther et al.).

Insgesamt sind dem Autor dieser Arbeit keine Arbeiten bekannt, die simultan Auftragsstart, Kapazitätsplanung und damit die Zuordnung von Mitarbeitern zu Maschinen sowie die Reihenfolgenbildung, d.h. die wesentlichen Aufgaben eines APS ausführen. Darüber hinaus beschränken sich alle zitierten Quellen zur Produktionsplanung auf deutlich weniger als 100 Fertigungsaufträge.

Job-Based-Sequencing

Ein häufig eingesetztes Verfahren ist die Erweiterung der kombinierten Vorwärts- und Rückwärtsplanung (vgl. Kapitel 3.1.3) um Kapazitäten. Dabei werden die einzuplanenden Aufträge nacheinander in Lücken im Kapazitätsgebirge eingeplant. Dieses Verfahren wird hier ausführlicher vorgestellt auf Grund der großen praktischen Bedeutung und weil es als einziges hier betrachtetes Verfahren alle Anforderungen uneingeschränkt erfüllt.

Die Arbeitsgänge eines Auftrages werden rückwärts eingeplant. Sobald die Planung sich als unmöglich herausstellt, weil sie in die Vergangenheit greifen müsste, stellt das System stattdessen auf eine Vorwärtsplanung um. Im Gegensatz zum Verfahren in Kapitel 3.1.3 wird dabei aber die Kapazität berücksichtigt. Dies geschieht dadurch, dass für jeden Arbeitsgang die bereits geplanten Maschinenbelegungen überprüft werden.

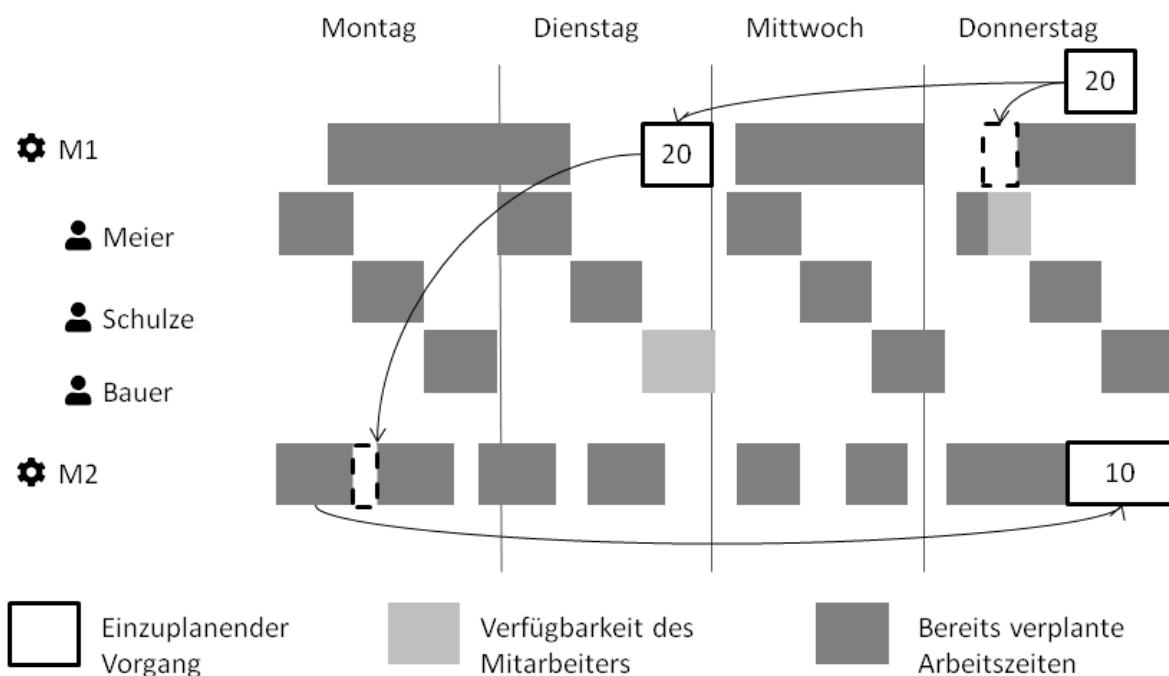


Abbildung 11: Job-based-Sequencing

Abbildung 11 zeigt den Ablauf an einem Beispiel. In der Graphik sind zwei Maschinen und die dafür qualifizierten Mitarbeiter dargestellt. Diese arbeiten versetzt auf Früh-, Spät- und Nachtschicht. Die Anlage M2 repräsentiert einen Ofen, der keinen Mitarbeiter für die Bearbeitung benötigt. Sowohl Mitarbeiter als auch Maschinen sind bereits teilweise durch andere Aufträge belegt.

Ein Auftrag mit zwei Arbeitsgängen soll rückwärts eingeplant werden. Der Arbeitsgang Nummer 20 benötigt ca. 1 Schicht zur Bearbeitung. Am Donnerstag gibt es zwar an der Maschine M1 eine ausreichende Belegungslücke, aber die Mitarbeiterkapazität reicht nicht aus, um den Vorgang abzuarbeiten. Deshalb muss eine vorhergehende Lücke in der Belegung gefunden werden, die sowohl Maschinen- als auch Personalkapazität gleichzeitig zur Verfügung stellt. Eine solche findet sich am Dins-

tag mit der Bearbeitung durch Bauer. Nach der Einplanung von Arbeitsgang 20 wird mit Arbeitsgang 10 fortgefahren. Dieser benötigt keine Mitarbeiter, aber Maschine M2. Diese ist bereits belegt. Keine Belegungslücke am Montag oder Dienstag ist lang genug um die Bearbeitung von Vorgang 10 aufzunehmen. Demzufolge muss das System umstellen auf eine Vorwärtsplanung und den Vorgang am Donnerstag einplanen. Da dies die Reihenfolgebedingung zu Vorgang 20 verletzt, muss auch dieser Vorgang erneut und diesmal in die Zukunft eingeplant werden.

Analog zur Durchlaufterminierung kann dieses Verfahren einfach auf mehrere Dispositionstufen erweitert werden.

Dieses Beispiel zeigt bereits Konsequenzen dieser Planungslogik:

- Arbeitsgänge mit langen Vorgabezeiten können nur schwierig eingeplant werden, da es nur wenige Lücken mit ausreichender Zeitdauer gibt
- Es bleiben Lücken zwischen den Aufträgen bestehen, die Planauslastung verringert sich dadurch.
- Eine geringfügige Änderung an einer Belegung (z.B. eine erhöhte Bearbeitungsdauer) führt dazu, dass die meisten Aufträge ihre Belegung beibehalten, die verbliebenen aber drastisch umgeplant werden.

Vorteilhaft ist die logische Erweiterung der Durchlaufterminierung und die schnelle Ein- oder Neuplanung eines einzelnen Auftrages. Da bestehende Belegungen nicht angepasst werden, können die Auswirkungen direkt begrenzt werden.

Beispiele für diese Einplanungslogik finden sich bei GULYÁSSY und VITHAYATHIL an der Heuristik von SAP APO (Gulyássy und Vithayathil 2014, 463 ff). Weitere Quellen finden sich bei DICKERSBACH und KELLER für SAP R/3 (Dickersbach und Keller 2014, 418ff). Im Falle von SAP R/3 wird die Kapazität jedoch nur durch das Kapazitätsprofil der Maschine, nicht durch Mitarbeiter beschrieben. BOTHE und NISSEN beschreiben eine Feinplanung am Beispiel der Mahle AG (Bothe und Nissen 2003, 59ff, 101ff). GEORGI beschreibt die Methode unter dem Namen Lückensprungmethode und vergleicht verschiedene Reihenfolgen für die Einplanung der Aufträge (Georgi 1995, 120ff).

Bucket-Based-Planning

Das Verfahren JBS kann auch mit diskreten Perioden ausgeführt werden. In diesem Falle wird statt minutengenauer Lücken ein „Bucket“ eingeplant. Ein Beispiel für dieses System ist die Software „3-Liter-PPS“ von LFCONSULT (LFConsult 2018). Anstatt minutengenau Lücken zu planen wird nur geprüft, ob die Tages- oder Wochenkapazität für die Summe der eingeplanten Arbeitsgänge ausreicht. Die grundsätzlichen Vor- und Nachteile sind identisch, allerdings ist dieses Verfahren in der Berechnung potentiell schneller, verlangt jedoch eine sinnvolle Diskretisierung der Bucketgrößen. Einerseits müssen diese groß genug sein, um jeden Arbeitsgang aufnehmen zu können, andererseits geben sie einen Mindestabstand zwischen zwei Arbeitsgängen vor.

Zwischenfazit

Die lineare Programmierung betrachtet zwar alle wesentlichen Restriktionen, ist aber nur bedingt für reale Problemgrößen geeignet und berechnet in der Regel keine Termine auf Vorgangsebene. Die Anwendungen von Metaheuristiken ist Gegenstand intensiver Forschungen, fokussiert sich aber auf die Belegungsreihenfolge und wurde bislang nur für relativ kleine Probleme untersucht.

Eine Klasse von Verfahren, die weitgehend angewandt wird, sind Job-Based-Sequencing und Bucket-Based-Planning. Beide Algorithmen planen Aufträge nacheinander in Lücken im Kapazitätsgebirge. Sie haben jedoch gravierende Schwächen in dem sie langlaufende Aufträge diskriminieren, die Kapazitäten nicht vollständig nutzen und vor allem sehr empfindlich auf geringfügige Änderungen in den Eingangsdaten bzw. Produktionsabweichungen reagieren.

3.1.6 Ereignisdiskrete Simulation

Diese Dissertationsschrift beschäftigt sich mit der Erweiterung einer ereignisdiskreten Simulation. Die meisten Ansätze beschränken sich dabei auf die Simulation einer Produktion mit dem Ziel, allgemeine Aussagen zu erreichen und vernachlässigen die Materialverfügbarkeit komplett. Es gibt jedoch einige neuere Arbeiten, die auch mehrstufige Produktionen betrachten, jedoch noch nicht alle Anforderungen an eine operative Produktionsplanung erfüllen.

In Kapitel 2.5.2 wurde die ereignisdiskrete Simulation (EDS) definiert. Im Kapitel 7.2 wird eine konkrete Implementierung vorgestellt. Daher verzichtet dieser Abschnitt auf eine ausführliche Beschreibung des Algorithmus. Im Wesentlichen ergänzt eine EDS Prioritätsregeln um ein Verfahren, das deren Anwendung in einer Art Zeitraffer simuliert.

BANGSOW beschreibt am Beispiel der Software „Plant Simulation“ die Simulation von Produktionsumgebungen (Bangsow 2011). Diese Software steht stellvertretend für zahlreiche kommerzielle Simulationsumgebungen und kann exemplarisch als Vertreter dienen.

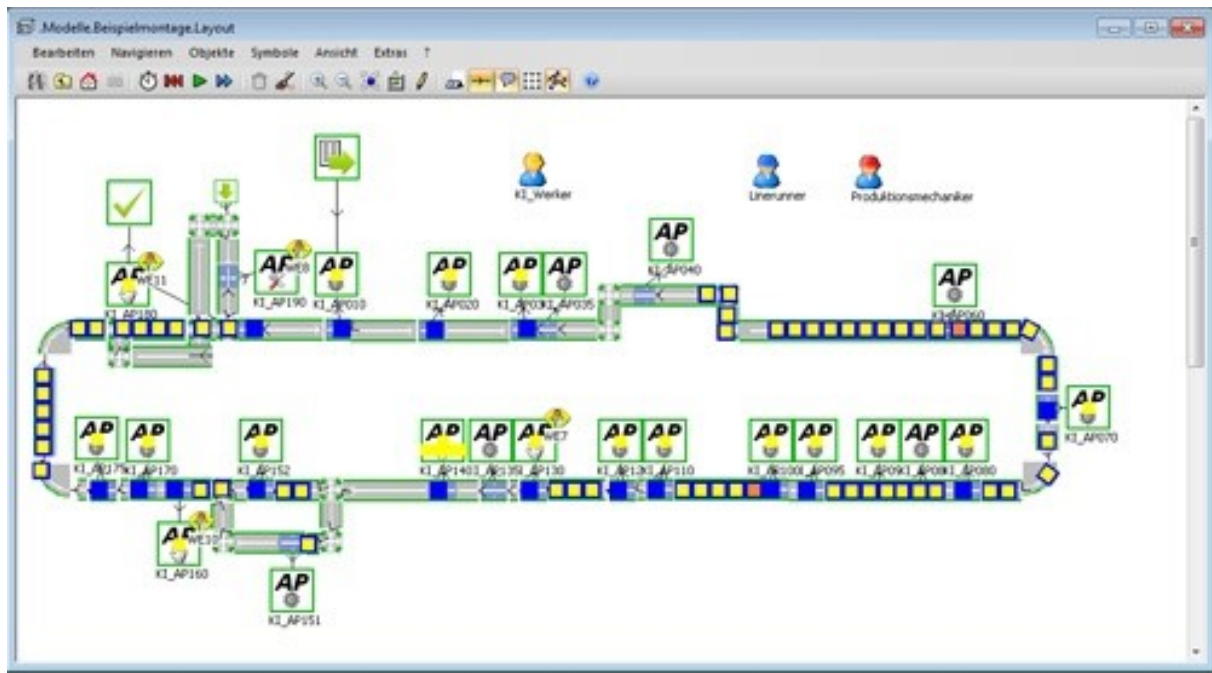


Abbildung 12: Layout in Plant Simulation

Das Modell wird durch die Platzierung von Bausteinen auf einem Layout erstellt (siehe Abbildung 12: Layout in Plant Simulation mit Genehmigung der SIMPlan AG). Dabei gibt es verschiedene Materialflussbausteine. Diese werden in bewegliche (Fahrzeuge, Förderhilfsmittel, Fördergut) und unbewegliche (z.B. Förderer, Arbeitsplätze usw.) unterschieden (Bangsow 2011, S. 57). Die Bausteine können interaktiv per Mausklick und Dialogen konfiguriert werden. Dabei können auch Schichtkalender (Bangsow 2011, S. 65) und Werker (Bangsow 2011, 301ff) simuliert werden. Diese Werker werden aus einem zentralen Pool zugeordnet und bewegen sich – abhängig von den gewählten Einstellungen – mit einer endlichen Geschwindigkeit zu einem Arbeitsplatz, an dem sie benötigt werden. Insgesamt ist die Simulation deutlich detaillierter, da sie beispielsweise auch die Transportzeiten mit Geschwindigkeiten simuliert. Typisch ist die Modellierung, die vom Layout und der Platzierung von Objekten ausgeht. Sehr oft werden die einzelnen Aufträge nicht aus einem ERP übernommen, sondern durch Verteilungsfunktionen nach statistischen Parametern (z.B. Ankunftsrate) erzeugt.

Durch E-Mail-Verkehr mit dem Autor wurde geklärt, dass es zwar keine Standardbibliothek, aber sehr wohl Implementierungsleitfäden gibt, um ein Routing über Arbeitspläne zu modellieren. Weiterhin wurde bestätigt, dass in Plant Simulation die Modellierung von Kanban oder ähnlichen Lagerbausteinen möglich ist, diese jedoch die Komponenten nicht koordinieren. Wörtlich schrieb Stefan Bangsow in der Korrespondenz „Sie müssen jedoch die Funktionsweise der Simulation bedenken. Die Simulation berechnet den Zugang der untersten Fertigungsstufe nicht, sie registriert sie lediglich und reagiert darauf“.

ROCKWELL AUTOMATION, die die Software ARENA vertreibt, beschreibt in ihren Erfolgsgeschichten einige typische Anwendungsfälle (Rockwell Automation 2019). Die-

sen ist gemein, dass ein Materialfluss in einer einzigen Dispositionsstufe und mit wenigen Artikeln modelliert wurde, um die Auslegung eines Produktionssystems zu prüfen und Parameter wie die Pufferflächen zu dimensionieren.

SIMINI beschreibt in seinem etwas älteren Übersichtsaufsatz die gleiche Stoßrichtung als weitaus dominierendes Anwendungsgebiet der ereignisdiskreten Simulation (Simini et. al. 2006). Zusammenfassend wird EDS in der Regel zur Simulation eines vorgegebenen Produktionssystems eingesetzt. Dabei kommt es nicht auf einzelne Aufträge oder eine optimale Fertigungsplanung an, sondern vielmehr darauf auch bei sehr ungenauen Daten und unter Berücksichtigung von stochastischen Störungen zu entscheiden, ob eine Auslegung und Dimensionierung (z.B. Kapazitäten, Lagerflächen, Anzahl der Transportmittel usw.) des Produktionssystems „funktioniert“.

ROY beschreibt die unterschiedlichen Modelle der Produktionsplanung (Ressourcenbasiert wie Shifting Bottleneck, Job-basiert (JBS) und zeitbasiert (EDS)). Der Artikel beschreibt den Einsatz der EDS zur operativen Planung von Pressen (Roy und Meikle 1995). Dabei weist er trotz der erkennbaren Vorteile auf zwei Nachteile der EDS hin: Die fehlende Unterstützung für mehrere Dispositionsstufen sowie eine mangelhafte Auslastung von Engpässen, da die Planung immer nur den aktuellen Zeitpunkt betrachtet und die Auswirkungen auf die Auslastung von Folgearbeitsplätzen nicht berücksichtigt. Wörtlich schreibt er: „DES works on the basis of process routes and does not use a Bill of material (...) Its use is limited – at least in the case of large and complex enterprises as a shop/cell planning tool“.

NOWITZKI beschreibt eine Reihe von Anwendungen der EDS, in keiner davon werden mehrstufige Produktionsnetzwerke geplant. Die Aufsätze, die dieser Anforderung am Nächsten kommen sind eine Supply-Chain-Simulation für Just-in-Sequence-Verfahren, bei denen es jedoch um die Abschätzung verschiedener Lieferstrategien (Verlagerung von Montageprozessen und Werken zur Minimierung von Transportzeiten) geht. (Engelhardt-Nowitzki und Nowitzki 2008). Ein anderer Aufsatz beschäftigt sich mit der Modellierung der Kommissionierung (Engelhardt-Nowitzki und Nowitzki 2008, 154ff)

PRAJAPAT untersucht Aufsätze zu den Schlüsselbegriffen ereignisdiskrete Simulation, Montage und Optimierung. Von den 52 untersuchten Aufsätzen ergaben sich folgende Erkenntnisse (Prajapat und Tiwari 2017):

- Die Anzahl der Veröffentlichungen nahm zu
- Die wichtigsten Branchen waren Automobil- und Elektronikmontage (beides variantenreiche Fließfertigungen mit nur einer Dispositionsstufe)
- Es wurden fast nur kommerzielle Softwaresysteme zur Modellierung genutzt
- Der Modellierungsaufwand wurde als hoch eingeschätzt

Fokussierte Themen waren die Sequenzierung von Produkten, Auslegung von Puffern und die Planung des Mitarbeiterereinsatzes. Die Materialverfügbarkeit wurde in keinem Artikel betrachtet, der Fokus lag lediglich auf einer Dispositionsstufe.

Ansätze zur Berücksichtigung von Materialverfügbarkeiten

ELEY gibt in seiner Monographie „Einführung in die ereignisdiskrete Simulation“ Beispielimplementierungen für Arbeitspläne (Eley 2012, 99ff) und Kanban-Kreisläufe (Eley 2012, 203ff) in Plant Simulation an. Die Arbeitspläne werden bei ihm jedoch zufällig initialisiert, im Falle der Kanban-Modellierung wird für jeden Artikel eine Montagestation angelegt. Eine solche Modellierung verbietet sich jedoch bei sehr vielen Artikelnummern.

Der Softwarehersteller SIMIO vermarktet sein Produkt dagegen als Feinplanungssystem. Dabei ist der größte Wettbewerbsvorteil laut eigenen Aussagen, dass der deterministisch bestimmte Produktionsplan durch die stochastische Simulation von Abweichungen auf Robustheit geprüft wird. So kann für jeden Auftrag eine Spannbreite von Lieferterminen angegeben werden. Diese wiederum entstehen aus einer Vielzahl von Berechnungsläufen, in denen zufällige Abweichungen simuliert werden. (Pegden 2019).

Im Bereich der Planung von Komponenten beschäftigt sich PROTH mit Bestellpolitiken (PROTH et al. 1997), DESMET mit der Festlegung von Sicherheitsbeständen (Desmet et al. 2010). Beide nutzen die ereignisdiskrete Simulation lediglich als Bestätigung ihrer analytischen Modelle. KUYUMCU entwickelt in seiner Dissertation ein analytisches Beschreibungsmodell zur Erklärung von (mangelhafter) Termintreue durch Reihenfolgenvertauschungen und Fertigungsrückstand. Das Simulationsmodell auf Basis von Plant Simulation wird ebenso nur zur Validierung genutzt (Kuyumcu). Auch in diesem Fall wird nur eine Fertigungsstufe fokussiert.

KYLE untersucht eine operative Produktionsplanung in der Möbelindustrie. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Verfahren wird hier explizit die Koordination des Materialflusses von Tischplatten und –Beinen beschrieben, die im späteren Verlauf gemeinsam gebeizt und montiert werden (Kyle und Ludka 2000). Dabei werden mehrere Hundert Artikelnummern betrachtet und die Modellerstellung beschrieben. Die Koordination des Materialflusses erfolgt jedoch relativ einfach, in dem zusammengehörigen Teile gemeinsam in die Produktion freigegeben und anschließend ausreichend große Lagerplätze vorgehalten werden, um die Komponenten gemeinsam in die Folgeprozesse einzuschleusen. Angesichts des verhältnismäßig ähnlichen Arbeitsprozesses und der kurzen Bearbeitungszeiten ist dies in diesem Fall ausreichend, in komplexeren Werkstattfertigungen mit sehr unterschiedlichen Komponenten jedoch unterkomplex.

REEJA führt eine neue Prioritätsregel ein, die darauf abzielt, in einem mehrstufigen Job-Shop („Assembly Job Shop“, AJS) die Komponenten aufeinander abzustimmen (Reeja und Rajendran 2000). Dazu wird in einem Auftragsnetz der kritische Pfad bestimmt und die Vorgänge auf diesem Pfad höher priorisiert als parallele Komponenten. Die Aufträge werden jedoch sofort in die Produktion freigegeben, damit werden die Bestände erhöht und lange Durchlaufzeiten für niedrig priorisierte Aufträge in Kauf genommen. Weiterhin wurden in diesem Aufsatz nur konvergierende Auftrags-

netze untersucht in denen ein Auftrag maximal einen Nachfolger hat. PEREIRA und SANTORO erweitern diese Arbeiten durch den Vergleich von verschiedenen Prioritätsregeln auf ein künstliches AJS-Problem (Pereira und Santoro 2011).

LU untersucht eine fiktive mehrstufige Produktion und kombiniert verschiedene Prioritätsregeln mit verschiedenen Freigabeverfahren (Lu et al. 2011). Diese basieren zunächst auf einer Durchlaufterminierung und einer überlagerten belastungsorientierten Auftragsfreigabe. Sie sehen einen großen Einfluss in der Wahl der Algorithmen und Parameter. Die Auftragsfreigabe berücksichtigt die Netzabhängigkeiten jedoch nur durch feste Starttermine auf Grund einer Durchlaufterminierung.

Alle zuletzt genannten Arbeiten weisen darauf hin, dass die Literatur zu Montageprozessen und mehrstufige Auftragsnetzen im Vergleich zur reinen Job-Shop-Problematik noch sehr viele Lücken aufweist.

3.1.7 Alternative Prioritätsregelbasierte Verfahren

Algorithmus von Giffler/Thompson

Der Algorithmus von GIFFLER und THOMPSON unterscheidet sich im internen Aufbau von einer ereignisdiskreten Simulation, führt aber im Ergebnis ebenfalls zu einer Belegung, in der Arbeitsgänge so wie früh wie möglich auf Grund einer Prioritätsregel auf Maschinenressourcen eingeplant werden. Eine Erweiterung auf die Betrachtung von Personalkapazitäten (oder allgemein Multi-Ressourcen-Planung) erscheint schwieriger zu implementieren (Zäpfel und Braune 2005, Kapitel 3).

Multi-Agenten-Systeme

Eine andere Art der Implementierung sind Multi-Agenten-Systeme. Diese Systeme bieten einen Implementierungsrahmen und können sowohl für JBS-ähnliche Einplanungen (der Auftragsagent fordert Belegungslücken vom Maschinenagenten an) als auch Prioritätsregelbasierte Ansätze, bei denen Vorgangsagenten eine Belegung anfordern, eingesetzt werden. In diesem Falle ergeben sich ähnliche Produktionspläne wie bei einer ereignisdiskreten Simulation.

MUNKELT UND KROCKERT beschreiben in einem Aufsatz einen solchen prioritätsbasierten Ansatz für eine mehrstufige Produktion (Munkelt und Krockert 2018). In dieser Arbeit treffen Kundenaufträge auf Grund einer stochastischen Verteilungsfunktion dynamisch ein und werden sofort im Lot-for-Lot-Verfahren in Fertigungsaufträge umgesetzt. Auf diese Weise wird zwar eine mehrstufige Produktion mit Hilfe von Prioritätsregeln geplant, allerdings gibt es Einschränkungen:

- Es findet keine Zusammenfassung von Losen zusammen – jeder Fertigungsauftrag ist genau an einen Montageauftrag gebunden.

- Die Komponentenaufträge werden nicht verzögert, d.h. wenn durch einzelne Fehlteile / Kapazitätsengpässe die Montage verzögern, entstehen hohe Bestände an Komponenten.

Diese Arbeiten wurden vor kurzem um eine dynamische Rüstop Optimierung erweitert, die verschiedene Fertigungsaufträge an den Arbeitsplätzen zusammenfasst (Krockert 2021). Eine andere Erweiterung verwendet die Durchlaufzeit von bereits fertig gestellten Fertigungsaufträgen, um die Auftragsfreigabe zu verzögern (Munkelt und Krockert 2020). Dabei wird während der Simulation fortwährend eine obere Grenze für die Durchlaufzeit der gerade abgeschlossenen Aufträge ermittelt, diese Durchlaufzeit wird für die Freigabe von neuen Aufträgen genutzt. Das ignoriert jedoch, dass die Durchlaufzeit eines Auftrages maßgeblich von seiner Priorität abhängt (die Durchlaufzeit eines niedrig priorisierten Auftrages bestimmt die Freigabe eines hoch priorisierten Auftrages und andersherum) und die Zukunft nicht unbedingt aus der Vergangenheit ableitbar ist.

3.1.8 Kombinierte Verfahren

Die zuletzt beschriebenen Verfahren betrachten nur Kapazitäten, im Standardfall jedoch keine Koordination von Komponenten zu Erzeugnissen. Eine Reihe von Arbeiten versucht dieses Problem zu lösen, indem verschiedene Verfahren kombiniert werden.

PRAJAPAT beschreibt in seiner Literaturübersicht 16 Arbeiten, die verschiedene Optimierungsverfahren (davon 8 Metaheuristiken) mit ereignisdiskreter Simulation kombinieren, in der Regel um Verfahrensparameter wie zum Beispiel Reihenfolgenregelungen mit KI-Verfahren auszuwählen (Prajapat und Tiwari 2017).

STURMVOLL benutzt ereignisdiskrete Simulation um Losgrößenentscheidungen im MRP/ERP festzulegen (Stumvoll). Dazu werden Mindest- und Maximallosgrößen im ERP schrittweise variiert und die Konsequenzen der Planung simuliert. Das optimale Ergebnis wird später als Losgrößenpolitik im ERP übernommen.

MOON benutzt eine Kombination aus MRP und EDS (Moon und Phatak 2005). Dabei werden die Planungsergebnisse der EDS verwendet, um die mittleren Durchlaufzeiten im MRP anzupassen. Dabei werden mehrere Durchläufe ausgeführt bis die Systeme konvergieren und auf diese Weise indirekt das MRP um eine Kapazitätsplanung ergänzt.

PEREIRA und SANTORO beschreiben eine ähnliche Implementierung, bei der eine mehrstufige Feedbackschleife genutzt wird um eine mehrstufige Produktion zu planen. Sie nutzen eine Durchlaufterminierung um Ecktermine festzulegen und auf Basis dieser Prioritäten mehrere prioritätsregelbasierte Planungen mit stochastischen Abweichungen auszuführen. Die geglätteten Durchlaufzeiten aus diesem Simulationslauf werden genutzt um die Durchlaufterminierung zu parametrieren und somit iterativ das Modell zu verfeinern und darüber hinaus auch noch die Auswahl der ver-

wendeten Prioritätsregel zu optimieren (Pereira und Santoro 2011). Sie betrachten jedoch ebenso wie Moon nur eine Durchlaufzeit pro Ressource, nicht deren zeitliche Änderung und ausschließlich konvergierende Auftragsnetze, d.h. kein Auftrag bedient mehrere Montageaufträge.

GRAVES beschreibt ein Verfahren, bei dem ereignisdiskrete Simulation zur Auftragsfreigabe verwendet wird (Graves und Milne 1997). Dabei werden Aufträge in einem ersten Durchlauf frühzeitig freigegeben. Auf Grund der beobachteten Durchlaufzeiten (die auf Grund von Littles Gesetz vom WIP abhängen) wird die Auftragsfreigabe verzögert. Dazu werden Aufträge nur dann freigegeben, wenn eine Simulation eine Durchlaufzeit verspricht, die geringer als ein vorgegebener Schwellwert ist. Sie kommen zu dem Schluss, dass ihr Verfahren besser als CONWIP und vergleichbar zu Starvation Avoidance (CONWIP unter Berücksichtigung von Maschinenausfällen) ist. Dabei wird jedoch nur der einzelne Auftrag, nicht der Zusammenhang zu einem Auftrags/Montagenetz betrachtet. Gleiches gilt für die im vorigen Kapitel zitierte Arbeit von KROCKERT (Munkelt und Krockert 2020).

3.1.9 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden zunächst theoretische Grundlagen der Planung dargestellt und sodann eine Reihe von Verfahren, die zumindest Teile des Planungsproblems lösen. Zuletzt wurden kombinierte Verfahren vorgestellt.

Verfahren	Termine auf Arbeitsebene Personalverfügbarkeit Maschinenverfügbarkeit Materialverfügbarkeit Anwendbarkeit					Bemerkung
Analytische Verfahren						Termine werden nicht direkt berechnet
Nur Materialverfügbarkeit						
Stochastische Verfahren						Termine nur auf Auftragsebene
MRP						Termine nur auf Auftragsebene
Verfügbarkeitsprüfung						Termine nur auf Auftragsebene
MRP II						
Vorwärts- und Rückwärts terminierung						
Nur Kapazitätsverfügbarkeit						
Shifting Bottleneck Heuristik						Nur Maschinenkapazität
Constraint Propagation						
Leitstände, MES						
Vollständige Enumeration						Nicht ausführbar bei größeren Probleme
Branch-and-Bound						
Material- und Kapazitätsverfügbarkeit						
Job-Based-Sequencing (JBS)						Sehr empfindlich bei Störungen
Bucket-Based-Planing						Analog zu JBS
Metaheuristiken						Sehr abhängig von Umsetzung
Lineare Programmierung						Hauptsächlich für Grobplanung
Prioritätsregelbasierte Verfahren						
Ereignisdiskrete Simulation						
Multi-Agenten-Systeme						

Abbildung 13: Vergleich der Verfahren

Abbildung 13 gibt einen Überblick über die vorgestellten Verfahren. Die analytischen Verfahren aus Kapitel 3.1.2 berechnen überhaupt keine Termine, die infiniten Planungsverfahren aus Kapitel 3.1.3 betrachten keine Kapazitäten. Selbst die Materialverfügbarkeit wird mit Ausnahme der kombinierten Vorwärts- und Rückwärtsplanung nicht über alle Dispositionsstufen sichergestellt.

Die Verfahren der finiten Planung aus Kapitel 3.1.4 betrachten zwar die Kapazitäten, allerdings nur teilweise Personalverfügbarkeiten und keine Materialverfügbarkeiten.

Die Lineare Programmierung und Metaheuristiken sind kaum für reale Problem anwendbar. Von den vorgestellten Verfahren sind nur „JBS“ und „Bucket-based-Planning“ in der Lage, Termine auf Vorgangsebene unter Berücksichtigung von Personal-, Maschinen- und Materialverfügbarkeit festzulegen und dabei Komponenten und Erzeugnisse zu koordinieren. Sie reagieren jedoch sehr empfindlich auf Produktionsabweichungen; der Algorithmus selber verursacht drastische Terminverschiebungen bei geringen Änderungen der Eingangsdaten.

Prioritätsregelbasierte Verfahren und insbesondere die ereignisdiskrete Simulation dagegen erscheinen sehr viel besser geeignet. Sie reagieren robust auf Störungen,

können detaillierte Personal- und Maschinenkapazitäten berücksichtigen, sind jedoch nur bedingt in der Lage mit mehrstufigen Auftragsnetzen umzugehen. Die bisherigen Arbeiten sind beschränkt, in dem sie:

- Nicht an realen Produktionsproblemen in einer operativen Planung getestet wurden
- In der Regel auf konvergierende Auftragsnetze beschränkt sind, in den denen ein Bedarfsdecker maximal einen Bedarf bedient, in der Realität werden jedoch durch Mindestlosgrößen oftmals sehr unterschiedliche Bedarfstermine für einen Fertigungsauftrag vorliegen.
- Aufträge tendenziell zu früh freigeben, da sie nicht versuchen, die parallelen Komponenten in Auftragsnetzen zu koordinieren, sondern stattdessen bestenfalls an Hand einer einfachen Durchlaufterminierung Freigabetermine berechnen. Dies berücksichtigt nicht die Unterschiede in der tatsächlichen Durchlaufzeit, die sich durch unterschiedliche Prioritäten und zeitlich schwankende Kapazitätsangebote ergeben.

Die Versuche diese Verfahren mit anderen Systemen zu kombinieren erfordern aufwändige Schnittstellen und agieren nur über die Anpassung von globalen Parametern wie bspw. der Durchlaufzeiten in einem MRP, sie berücksichtigen damit nicht die zeitliche Abhängigkeit der Durchlaufzeit von der terminlichen Auftragslage. Dies gilt insbesondere für die hierarchische Planung, bei der zunächst ohne Kapazitäten Termine festgelegt werden und danach in einem Leitstand kurzfristig geplant wird. Dabei werden Kapazitätsprobleme erst dann erkannt, wenn dem Kunden bereits lange ein Liefertermin versprochen wurde und selbst dann ist die Interaktion bzw. Abstimmung der groben und feinen Teilpläne überaus kompliziert.

Daraus ergibt sich der Forschungsbedarf, eine ereignisdiskrete Simulation so zu erweitern, dass sie komplexe Auftragsnetze aus Komponenten und Montageaufträgen koordiniert. Dabei soll in einem System ein machbarer Plan entstehen, der Material-, Personal- und Maschinenverfügbarkeit betrachtet. Die Forschungsergebnisse der Literatur legen zumindest nahe, dass ein solcher Ansatz die Sicherheit der Terminvorhersage unter stochastischen Störungen erhöhen kann. Deshalb soll dieser neu entwickelte Ansatz mit einem JBS-Verfahren verglichen werden um die Vor- und Nachteile zu ermitteln.

3.2 Benchmarks

Dieses Unterkapitel geht auf den Forschungsstand zur Bewertung von Planungs- und APS-Verfahren ein. Dies beginnt mit systematischen Vergleichen verschiedener Algorithmen zur Planungsqualität, in einem zweiten Abschnitt werden Untersuchungen zur Robustheit und Planungsstabilität vorgestellt.

3.2.1 Bewertung der Planungsqualität

Es gibt eine Reihe von Benchmarkdatensätzen, die spezielle Planungsprobleme beschreiben. Beispiele dafür sind Datensätze der British Telecom zur Routenoptimierung von Servicetechnikern (Günther et al., 61ff), generelle Instanzen zu Traveling Salesman Problemen (Peterson 1990), die Optimierung einer Maschinenreihenfolge (Fatih Tasgetiren et al. 2006) und andere. VAN HOORN gibt einen Überblick über Benchmarkdatensätze und Lösungen (im Wesentlichen Metaheuristiken), jedoch beschränkt auf maximal 20 Maschinen und ohne Berücksichtigung von Materialverfügbarkeiten (van Hoorn 2018).

Die hier ausgewählten Beispiele betrachten deshalb nur vergleichbare Problemstellungen. Sie implementieren verschiedene Algorithmen und vergleichen die numerisch bewertete Lösungsgüte (z.B. Routenlänge, Fehlerpunkte, gewichtete Verspätung). Dabei betragen die Abweichungen der Algorithmen vom Optimum und untereinander nur 25% (Peterson 1990), weniger als 2,8% (Fatih Tasgetiren et al. 2006) und weniger als 25% in den meisten Fällen (Günther et al.)

Die Dissertationsschrift von GÜNTHER beurteilt sehr tiefgehend verschiedene Lösungsansätze für drei Fragestellungen in der Personaleinsatzplanung. Dabei vergleicht er systematisch verschiedene Metaheuristiken und Multi-Agenten-Systeme auf ihre Leistung. Das für diese Arbeit relevanteste Problem besteht in der Zuordnung von Mitarbeitern zu Arbeitsplätzen (Günther et al., 29ff). Während bei der Produktionsplanung die Personal-/Maschinenzuordnung in einer Periode die Warteschlangen und damit den Personalbedarf der Folgeperioden bestimmt, setzt er diesen Bedarf als bekannt voraus. Das Multi-Agenten-System für dieses Problem entspricht einer ähnlichen Heuristik wie die später beschriebene Implementierung dieser Schrift und liefert ähnlich gute Ergebnisse wie die dedizierten Optimierungen der Metaheuristiken, allerdings bei deutlich geringerer Berechnungsdauer (Günther et al., S. 261). Die Abweichung zur besten Lösung beträgt etwa 10% und ist besser als einige Metaheuristiken. In einer anderen Fragestellung von Auftragszuordnung zu Servicetechnikern ist der agentenbasierte Ansatz etwa 17% schlechter als die beste Lösung, aber immer noch im Mittelfeld der getesteten Verfahren (Günther et al., S. 294). Lediglich in dem sehr verschieden gelagerten Problem einer Schichtplanerstellung schneidet das Agentensystem deutlich schlechter ab.

GEORGI vergleicht in einem selbstgenerierten Datensatz für Job-Shop-Probleme die Planungsergebnisse von Prioritätsregeln, einem Job-Based-Sequencing (dort Lückensprungverfahren genannt) sowie einer selbst erstellten Variante des Hill Climbing als Umplanungsverfahren. Er kommt zu dem Ergebnis, dass für die meisten Zielsetzungen, insbesondere zur Maximierung der Termintreue, Prioritätsregeln besser abschneiden als die alternativen Verfahren. Dabei wiederum haben sich Schlupforientierte Regeln als besonders geeignet herausgestellt (Georgi 1995, 204ff).

ENNS vergleicht am Beispiel eines kleinen Flow-Shops Job-Based-Sequencing (dort blocking scheduling genannt) und ereignisdiskrete Simulation (Enns 1996). Die Kernergebnisse zeigen, dass EDS kürzere Durchlaufzeiten, eine geringere Streuung und dramatisch bessere Termintreue („mean Tardiness“) und Stabilität gegenüber Störungen aufweist als JBS. Weiterhin wird gezeigt, dass die Terminzusagen vom System generiert werden sollten anstatt externe Ecktermine auf Basis von Standarddurchlaufzeiten zu verwenden. Zuletzt zeigt sich, dass im Falle von EDS Reihenfolgeregeln, welche die Restlaufzeit berücksichtigen (Schlupf/Critical Ratio) gut geeignet sind während die laufende Neupriorisierung¹ im Falle von JBS zu großen Problemen führt. Die verwendete Problemgröße ist jedoch weit von realistischen Fragestellungen entfernt.

MUNKELT und KROCKERT beschäftigen sich schwerpunktmäßig mit den Vor- und Nachteilen einer zentralen Planung im Vergleich zu einem dezentralen Multi-Agenten-Ansatz (vgl. Kapitel 3.1.7). In der ursprünglichen Arbeit vergleichen sie ihren Ansatz mit einem zentralistischen Planungsansatz, der eine kombinierte Vorwärts- und Rückwärtsplanung mit festen Durchlaufzeiten um eine separate Planung gegen begrenzte Kapazitäten (Verfahren von Giffler/Thompson) ergänzt (Munkelt und Krockert 2018). Sowohl der zentrale als auch dezentrale Ansatz erreichen ohne Produktionsabweichungen vergleichbare Leistungen, im Falle von moderaten Produktionsabweichungen jedoch bricht die Termintreue des zentralen Ansatzes ein; in einem Experiment beträgt die Termintreue 18% im Vergleich zu 100% (dezentraler Ansatz). Dabei stellte sich natürlich die Frage, warum zwei prioritätsregelbasierte Ansätze (Giffler/Thompson plant auf Grund der gleichen Prioritätsregel wie das MAS) so unterschiedliche Ergebnisse erreichen. Aus der Korrespondenz mit den Autoren ergab sich die Vermutung, dass Rückwärtsplanung und damit verbundene spätere Auftragsfreigabe den zur Verfügung stehenden Puffer reduziert und zusätzlich die Zeitabstände zwischen den Planungsläufen eine Reaktion auf Abweichungen unterbunden haben.

Zusammenfassend gibt es nur wenige Untersuchungen, die Ergebnisse einer operativen Produktionsplanung zwischen verschiedenen Algorithmen (im Gegensatz zur Parametrierung eines Algorithmus) miteinander vergleichen. Diese wenigen Ergebnisse zeigen jedoch ebenso wie Untersuchungen in angrenzenden Bereichen, dass Prioritätsregeln oftmals sehr gut im Vergleich zu anderen Ansätzen abschneiden.

3.2.2 Bewertung der Stabilität und Robustheit der Planung

Im MRP-Umfeld kritisiert DONSELAAR (van DONSELAAR 1992) die Nervosität des Verfahrens. Diese entsteht beispielsweise dadurch, dass ein monatlicher Bedarf von

¹ In der Arbeit wurde versucht die Einplanungsreihenfolge an Hand der verbliebenden Restlaufzeit (Schlupf) des Auftrages vorzunehmen. Dies führte im Zeitverlauf zu veränderten Reihenfolgen und damit deutlich abweichenden Terminen.

40 Stück vorliegt und das System alle 3 Monate einen Auftrag über 120 Stück aufgelegt hat. Wenn im ersten Auftrag Ausschuss auftritt und nur 119 Stück zugesagt werden können, werden alle folgenden Aufträge um jeweils 3 Monate vorgezogen. Seine Alternative des Line Requirement Planning verzichtet jedoch auf eine Losbildung und ist damit ungeeignet für Produktionsumgebungen mit hohen Rüstkosten.

Ho (Ho * 2005) untersucht verschiedene Ansätze, um die Änderungsmitteilungen des MRP-Verfahrens zu begrenzen, d.h. bestimmte Mitteilungen zu ignorieren. Im Wesentlichen implementiert er einen Filtermechanismus der Alarmmeldungen unterdrückt.

HAUPTVOGEL untersucht ein praktisch eingesetztes kommerzielles Job-Based-Sequencing-System und stellt fest, dass innerhalb von wenigen Tagen mehr als die Hälfte der Fertigungstermine neu geplant wird

GENIN untersucht in einem linearen Optimierungsmodell, wie sich Fixierungshorizont, ereignisorientierte Planung und ständige Aktualisierung auf die Leistung auswirken (Genin et al. 2007). Dabei zeigt sich, dass eine häufige Aktualisierung die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht, aber auch die Nervosität vergrößert.

PUJAWAN und SMART befragen indonesische Unternehmen und kommen zu dem Schluss, dass Planungsinstabilität für fast 2/3 der Befragten ein großes oder sehr großes Problem darstellt (Pujawan und Smart 2012).

3.3 Einbettung in die Prozesslandschaft

Das Ziel dieser Dissertationsschrift ist es, einen verbesserten APS-Algorithmus zu entwickeln. Für die praktische Nutzung spielen neben der Leistung des Verfahrens auch nicht-technische Aspekte eine Rolle. Deshalb werden ausgewählte Arbeiten hier zitiert:

LAMBECK befragte 184 Unternehmen über die Bedienung ihres ERP-Systems. (Lambeck et al. 2014 - 2014). Die Teilnehmer bewerten die Systeme insgesamt mittelmäßig bis gut. Sie bescheinigen sich selber gute Prozesskenntnisse und die Konsequenzen ihrer Aktionen im System beurteilen zu können, mehr Schwierigkeiten sehen sie darin, im System die richtigen Funktionalitäten zu finden. Aus mehreren möglichen Verbesserungen wurden verbesserte Menüführung, Suchfunktionalitäten und bessere Statusinformationen (Pflichtfelder, Fortschrittsbalken etc.) am häufigsten genannt. Neuartige Visualisierungen und neue Ein-/Ausgabegeräte wie Tablets, Smartphones usw. wurden deutlich skeptischer gesehen.

Langlaufende Fallstudien zeigten die Bedeutung einer robusten Planung (Fransoo et al. 2011, S. 238), in weiteren Fallstudien führte die Planungsnervosität zum Abbruch und Neustart von APS-Projekten (Fransoo et al. 2011, S. 265).

Das Forschungsprojekt PROSENSE untersuchte unter Anderem, wie lange es dauert, bestimmte Fragen in der Fertigungssteuerung zu beantworten. Dabei benötigten die

Fertigungssteuerer zwischen 5- und 10 Minuten um das terminbestimmende Teil eines Kundenauftrages ausfindig zu machen (Schuh und Fuß 2015, 125ff). Eine schnellere Analyse würde auf diese Weise die Qualität der Fertigungssteuerung unabhängig von den verwendeten Algorithmen deutlich erhöhen.

DAVIS und KOTTEMANN untersuchten bereits 1994 einige psychologische Aspekte von IT-Systemen, namentlich die Kontrollillusion (Davis und Kottemann 1994). Dabei bekamen Probanden eine Softwareumgebung, in der sie den Absatz der letzten Perioden sahen und Kapazitäten erhöhen oder senken konnten, um mit möglichst geringem Ressourceneinsatz die eintreffenden Aufträge zu befriedigen. In einem Szenario hatten sie keine Hilfsmittel, in einem zweiten konnten sie verschiedene mögliche Szenarien durchspielen und vergleichen. Im dritten Szenario bekamen sie eine Hilfestellung, die auf Basis eines einfachen Trendmodells den zukünftigen Bedarf vorhersagte. Die Nutzung dieses Trendmodells hätte wesentlich geringere Kosten erzielt als eine manuelle Planung, dennoch verzichteten viele Teilnehmer auf die Nutzung der Vorhersage sondern entschieden selber. Die Simulationsmöglichkeiten führten dazu, dass die Probanden wesentlich länger für die Aufgabe benötigten, jedoch keine besseren Ergebnisse erzielten. Die Autoren schlussfolgern daraus, dass a) Menschen häufig ihre eigenen Fähigkeiten zur Planung überschätzen und angebotene Hilfsmittel nicht nutzen (Trendfolgemodell) und b) die Nutzung von verschiedenen Szenarien die Komplexität erhöht ohne jedoch die Qualität zu verbessern. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass Benutzer Simulationsmöglichkeiten und eigene Steuerungseingriffe bevorzugen, auch wenn diese nachweislich schlechtere Ergebnisse liefern als die Anwendung von Heuristiken.

DÖRNER beschreibt im Detail viele psychologische Aspekte dieser Kontrollillusion (Dörner 2017). Dazu gehört insbesondere, dass Menschen den Erfolg ihrer Handlungen selten hinterfragen und zu Aktionismus neigen.

3.4 Zwischenfazit

In Kapitel 2 wurde das Ziel der Festlegung von Terminen auf Arbeitsgangsebene unter Berücksichtigung von Material-, Personal- und Maschinenverfügbarkeit definiert. Dabei ist es besonders wichtig, nicht nur die einzelnen Fertigungsaufträge zu betrachten, sondern das gesamte Auftragsnetz aus Komponenten und Montageaufträgen sinnvoll zu koordinieren um eine zu frühe und eine zu späte Lieferung zu vermeiden.

Am Beginn des Kapitels wurden verschiedene Verfahren zur Lösung dieser Aufgabenstellung vorgestellt. Davon ist aktuell nur das Job-Based-Sequencing und dessen Variante des Bucket-Based-Planning in der Lage alle Anforderungen zu erfüllen. Weiterhin zeigen sie, dass die Planungsstabilität, aber auch Fragen der Benutzerführung noch wesentliche Stolpersteine beim praktischen Einsatz von APS-Systemen sind.

Systematische Untersuchungen zur Bewertung von Planungssystemen zeigen, dass komplexe Optimierungen häufig nicht notwendig sind und bereits einfache Prioritätsregeln gute Ergebnisse liefern und dabei häufig robuster gegenüber Störungen sind. Allerdings sind Prioritätsregelbasierte Verfahren und insbesondere die ereignisdiscrete Simulation nur bedingt geeignet mit mehrstufigen Auftragsnetzen wie sie in dieser Arbeit untersucht werden zurechtzukommen.

Auch wenn der Fokus dieser Arbeit auf Algorithmen und der Messung ihrer Leistungsfähigkeit liegt, ist die Einbettung in die System- und Prozesslandschaft der Unternehmen ein wesentlicher Erfolgsfaktor in der Praxis. Im Prinzip wird von vielen Benutzern die Nutzung von Software befürwortet und akzeptiert. Allerdings gibt es oftmals ein geringes Vertrauen in die Systemvorschläge, die oftmals – auch entgegen objektiver Erfolgskriterien – vom Anwender übersteuert werden.

Eine Planungslösung sollte damit folgende Anforderungen erfüllen:

- Einen machbaren Plan berechnen (Personal-, Maschinen- und Materialverfügbarkeit)
- Einen ausreichend guten Plan berechnen (Auslastung, Durchsatz, Bestand)
- Diesen Plan auch bei Störungen nur geringfügig verändern
- Diesen Plan dem Anwender erklären und ihm die Möglichkeit zum Eingreifen geben, nicht zuletzt um psychologische Anforderungen zu erfüllen.

Die EDS erscheint als ein vielversprechender Ansatz, kann aber noch nicht vollständig mehrere Dispositionsstufen planen. Das Verfahren JBS ist das einzige bisher bekannte Verfahren, welches alle Anforderungen erfüllt, jedoch sehr empfindlich auf Produktionsstörungen reagiert.

4 Forschungskonzeption

Diese Arbeit orientiert sich am Forschungsrahmen nach Ulrich. Dieser nennt 3 Phasen der Forschung. Der Entdeckungszusammenhang definiert das Problem und grenzt dieses ab. In den vorigen Kapiteln wurde klar, dass es bereits bestehende Lösungen zur Unterstützung der operativen Produktionsplanung gibt und deren Einsatz prinzipiell zweckmäßig ist und einen gesellschaftlichen Nutzen durch verbesserte Ressourcenauslastung stiftet.

Damit ist der grundsätzliche Sinn für die erste (Entdeckungszusammenhang) und die letzte Phase (Verwendungszusammenhang) belegt. Darüber hinaus muss jedoch im Begründungszusammenhang schlüssig dargelegt werden, dass die wissenschaftliche Arbeit einen Fortschritt gegenüber dem Status Quo darstellt. Diese Anforderungen sowie die Methodik werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels konkretisiert.

In den bisherigen Kapiteln wurde der Bedarf an einer Software zur Unterstützung der operativen Produktionsplanung in der mehrstufigen Einzel- und Kleinserienfertigung motiviert. Diese muss Termine auf Vorgangsebene ermitteln, die sicherstellen, dass Material, Maschinen- und Personalkapazitäten zur Bearbeitung zur Verfügung stehen.

In Kapitel 3 wurde der Stand der Erkenntnisse aufbereitet. Daraus ergaben sich in Abschnitt 3.4 noch zahlreiche Defizite, die Ansatzpunkte für eine theoretische und praktische Verbesserung ergeben. Dabei erscheint die ereignisdiskrete Simulation als eine gute Ausgangsbasis, insbesondere in Hinblick auf robuste Planungsergebnisse trotz der unvermeidlichen Produktionsabweichungen. Ihre aktuell wesentliche Einschränkung ist, dass die Vorwärtsplanung zu hohen Beständen führt, da sie die Aufträge einzeln plant ohne die Abhängigkeiten zwischen Komponenten und Aufträgen zu berücksichtigen.

Entsprechend der in Kapitel 2.2.4 dargelegten Optimierungsstufen der Materialverfügbarkeit kann sie bestenfalls auf Ereignisse (Materialzugang) reagieren, diese jedoch nicht koordinieren.

In den nächsten Unterkapiteln werden zunächst die inhaltlichen Anforderungen an die Softwarelösung definiert. Es folgt die Definition von formalen Anforderungen an den Begründungszusammenhang und zuletzt wird ein Überblick über die verwendeten Methoden gegeben.

4.1 Inhaltliche Anforderungen

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an die Softwarelösung definiert. Diese leiten sich einerseits aus der Aufgabendefinition in Kapitel 2 und andererseits den Defiziten in Theorie und Praxis aus Kapitel 3.4 ab.

4.1.1 Zielsetzung der Arbeit

Entsprechend der Forschungsfragen soll in dieser Arbeit geklärt werden, ob die ereignisdiskrete Simulation für die operative Produktionsplanung eingesetzt werden kann und wenn ja, welche Vor- und Nachteile diese gegenüber anderen Algorithmen besitzt.

Im Stand der Erkenntnisse zeigte sich im Umfeld der EDS:

- Hoher Aufwand der Modellerstellung, fehlende Integration in die operativen (ERP)-Systeme.
- Fast kompletter Verzicht auf die Synchronisation von Komponenten in Auftragsnetzen, daher bisher nicht anwendbar für mehrstufige Produktionsplanung.
- Fokussierung auf Aussagen zur Systemleistung, nicht zu einzelnen Aufträgen in der Benutzerführung und den Untersuchungen.

Die neue Software, die den Kern dieser Arbeit ausmacht, soll somit aus ERP-Daten (weitgehend) automatisch ein Simulationsmodell der Produktion erzeugen und Termine pro Arbeitsgang festlegen. Im Gegensatz zu Softwarepaketen wie Plant Simulation ist die neue Software auf die Simulation/Planung einer Fabrikproduktion beschränkt, im Gegensatz zu einem konkreten Modell in Plant Simulation jedoch erlaubt es die neue Software, andere Unternehmen schnell und effizient anzubinden und das Modell automatisch aus ERP-Daten zu erzeugen.

Diese Termine müssen dabei die Restriktionen von Material-, Personal- und Maschinenverfügbarkeit berücksichtigen. Wesentlich ist dabei die Koordinierung von verschiedenen Aufträgen an Hand der Materialflussbeziehungen. Ein typischer Anwendungsfall ist dabei, dass ein Zukaufteil für die Montage fehlt; in diesem Falle führt die bisher verwendete EDS-Logik dazu, dass die übrigen Komponenten und Baugruppen zu früh gefertigt wurden. In der neuen Lösung sollen diese so verzögert werden, dass alle Komponenten möglichst gleichzeitig zum Montagebeginn fertig gestellt werden.

Für den praktischen Einsatz sind darüber hinaus Berichte, Ansichten und Analysen notwendig, die es den Mitarbeiter ermöglichen, die Planungsergebnisse nachzuvollziehen und umzusetzen. Diese müssen im Vergleich zu Systemen wie Plant Simulation stärker auf den einzelnen Auftrag und weniger auf die Leistung „der Fabrik“ ausgerichtet werden.

4.1.2 Abgrenzung der Lösung

In Anlehnung an LÖDDING wird die Auftragserzeugung nicht betrachtet, sondern durch das ERP als gegeben vorausgesetzt. Nur dieses verfügt über die notwendigen Stammdaten um einen sinnvollen Arbeitsplan / Lieferanten auszuwählen und die Losgröße festzulegen.

Die Personal- und Maschinenkapazität ist vorgegeben und nicht Planungsgegenstand. Dies ist auch in der betrieblichen Praxis sinnvoll, da die Abstimmung von Arbeitszeitmodellen – jenseits von Optimierungsüberlegungen – auch durch gesetzliche Anforderungen, Abstimmungen mit dem Betriebsrat usw. festgelegt wird. Allerdings ist die Verteilung der Mitarbeiter auf die Arbeitsplätze, die Reihenfolgenbildung an diesen und die Auftragsfreigabe Gegenstand der Planung.

Durch die simultane Betrachtung von Personal- und Maschinenverfügbarkeit muss der Algorithmus eine Multi-Ressourcenplanung durchführen. Diese könnte konzeptionell um die Betrachtung von Fertigungshilfsmitteln, Lagerflächen oder Ähnlichem ergänzt werden. Jede Modellbildung ist eine Verkürzung der Realität, sollte jedoch die wesentlichen Einflussgrößen betrachten. Im Interesse eines nachvollziehbaren Modells konzentriert sich die Arbeit auf die oben genannten regelmäßig auftretenden Engpässe und betrachtet außer Material-, Personal- und Maschinenverfügbarkeit keine weiteren Restriktionen die in einzelnen Unternehmen durchaus eine kritische Rolle spielen können.

Die Lösung betrachtet keine reihenfolgeabhängige Rüstzeiten (und damit Potentiale in der Auftragsreihenfolge) da diese Daten (Rüstzeitmatrizen) in typischen ERP-Systemen nicht gepflegt sind und aus ähnlichen Gründen keine überlappende Produktion.

Um eine Vergleichbarkeit der Systeme sicherzustellen, wird im Rahmen dieser Arbeit auch keine Veränderung an den Materialreservierungen vorgenommen. Das bedeutet, dass die Zuordnung von Bedarfsdecker (z.B. Bestellungen, Fertigungsaufträgen, Beständen) zu Bedarfen aus dem ERP übernommen wird. Allerdings werden durch das System sehr wohl die Termine aller beteiligten Aufträge neu berechnet.

Da die technischen Produktionsfragestellungen nicht betrachtet werden, werden sämtliche Stammdaten aus dem ERP ungeprüft übernommen.

4.2 Formale Anforderungen

Neben den inhaltlichen Anforderungen muss eine wissenschaftliche Arbeit auch formalen Anforderungen genügen.

In Kapitel 1.3 wurde der Forschungsrahmen nach ULRICH für diese Arbeit gewählt. Bereits in diesem Kapitel wurde ausgeführt, dass der Entdeckungszusammenhang vorwissenschaftlich ist, d.h. die Problemstellung und der Entwurf einer Lösung die kreative Aufgabe des Wissenschaftlers ist und sich einer stringenten Methodik entzieht.

Im Begründungszusammenhang dagegen fordert HILL, dass die Ergebnisse nachvollziehbar und empirisch validiert werden. Nach der Theorie des kritischen Rationalismus von POPPER können Hypothesen somit nie als endgültig wahr beschrieben werden, sondern nur vorläufig als richtig erkannt werden, bis das Gegenteil bewiesen wurde. Daher fordert die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) in ihren Leitlinien

zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis u.a. dass eigene Erkenntnisse kritisch hinterfragt und der wissenschaftliche Diskurs ermöglicht wird (DFG 2013, Leitlinie 1). Dazu gehört, dass Erkenntnisse so detailliert beschrieben werden, dass Dritte diese bestätigen oder widerlegen können (DFG 2013, Leitlinie 12).

BRETZKE erkennt an, dass die Entwicklung eines mathematischen Modells bzw. einer Lösungsheuristik ein wissenschaftliches Vorgehen ist, kritisiert aber den häufig fehlenden praktischen Problembezug sowie die vorzeitige Verengung auf ein „mathematisch lösbares Modell“ dieses Forschungsansatzes (Bretzke 2016, Kapitel 3). Stattdessen fordert er Machbarkeit und Nützlichkeit, somit solle sich Wissenschaft nicht an der Methodik, sondern der Qualität der Ergebnisse messen lassen (Bretzke 2016, S. 215). Bereits in der Einleitung wurde dargelegt, dass die operative Produktionsplanung ein durchaus praxisrelevantes Optimierungssystem darstellt welches nicht auf „den Elfenbeinturm der Forschung“ beschränkt ist.

PATZAK nennt die folgenden 5 formalen Anforderungen an ein System (Patzak 1982, 309ff), dies gilt damit auch für ein Softwaresystem zur Unterstützung der PPS.

- Empirische Richtigkeit
- Formale Richtigkeit
- Produktivität
- Handhabbarkeit
- Geringer Aufwand

Die empirische Richtigkeit zielt darauf ab, dass die Aussagen des Modells auf die Realität übertragbar sind. Die Vielzahl an bestehenden APS-Systemen zeigt schlüssig die prinzipielle Übertragbarkeit von Produktionsplanungsergebnissen auf die Realität.

Die formale Richtigkeit ist die Widerspruchsfreiheit entsprechend der Modellannahmen. In diesem Falle entspricht dies der Einhaltung der gewählten Restriktionen und wird später noch einmal ausführlicher ausgeführt. Produktivität, Handhabbarkeit und geringer Aufwand wiederum werden durch den mehrjährigen Einsatz der Lösung bei der Maschinenbau AG bewiesen, dies entspricht damit auch der Machbarkeit nach BRETZKE.

Zusammenfassend bemisst sich der Erfolg dieser Arbeit daran, dass die Erkenntnisse nachvollziehbar, anwendbar und nützlich sind. Die Nützlichkeit wiederum muss sich einerseits in der Praxis, aber auch im Vergleich zu alternativen Verfahren beweisen, d.h. sie muss Vorteile gegenüber dem Stand der Technik aufweisen. Dabei hat sich in den Ingenieurwissenschaften gezeigt, dass Versuche ein probates Mittel sind.

4.3 Methodisches Vorgehen

In Kapitel 2.4 wurde die Planungsaufgabe inhaltlich abgegrenzt und in Kapitel 4.1 konkretisiert. Im vorigen Kapitel wurde gefordert, dass die Lösung einerseits hand-

habbar ist und mit geringem Aufwand produktiv genutzt werden kann und andererseits „besser“ ist als bestehende Lösungen.

Die Vielzahl von bereits eingesetzten Softwaresystemen zur Unterstützung der operativen Produktionsplanung zeigt, dass diese Problemstellung eine praktische Relevanz und grundsätzliche Nützlichkeit aufweist. Der nunmehr 5-jährige Einsatz der neuen Lösung bei der Maschinenbau AG zeigt, dass auch das konkrete System die Kundenanforderungen an Handhabbarkeit und Produktivität erfüllt. In Kapitel 5 wird die Einbettung in die Prozess- und Systemlandschaft noch einmal vorgestellt und in Kapitel 8.5 über den praktischen Einsatz berichtet.

Um sicherzustellen, dass die Lösung „besser“ ist als die bestehenden Systeme, wird – neben der praktischen Erfahrung – die Methode des Versuchs gewählt. Dazu wird das neu entwickelte System nach Methoden der Versuchsplanung bzw. „Design of Experiment“ systematisch mit bestehenden Systemen verglichen.

4.3.1 Grundsätze der Versuche und Versuchsplanung

KLEPPMANN geht der Frage nach, ob Versuche überhaupt notwendig sind oder die Beobachtung eines Prozesses schon ausreicht (Kleppmann 2013, S. 7). Übertragen auf die vorliegende Fragestellung könnte die Termintreue der Unternehmen bei Einsatz verschiedener APS-Systeme verglichen werden um Rückschlüsse auf die Qualität des Algorithmus zu ziehen. Somit könnte eine Umfrage unter APS-Nutzern zur Beurteilung der Qualität dienen. Allerdings führt Kleppmann aus, dass dies nicht ausreicht, denn:

„Bei geplanten Versuchen werden die Prozessparameter gezielt verändert. Wenn die Änderungen der Ergebnisse (Zielgrößen) durch die Änderung der Prozessparameter an- und wieder abgeschaltet werden kann, ist der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang dadurch nachgewiesen. Allerdings kann nur der Effekt derjenigen Prozessparameter (Faktoren) erkannt werden, die im Versuchsplan enthalten sind“ (Kleppmann 2013, S. 7).

Aus diesem Grund werden verschiedene Algorithmen unter gleichen Randbedingungen systematisch verglichen, dabei werden die Faktoren untersucht, die sich aus der betrieblichen Praxis und systematischen Überlegungen aus der Literaturrecherche ergeben haben. Dieses Vorgehen bietet den weiteren Vorteil, dass auch die zu Grunde liegenden Ursachen für Terminverschiebungen bei Bedarf genauer untersucht und reproduziert werden können.

Als Ziel der Versuche nennt KLEPPMANN entweder die Leistung eines Prozesses zu verbessern oder diese robuster zu gestalten, d.h. unempfindlicher gegenüber unvermeidlichen Störungen, die nicht (oder nur sehr teuer) verhindert werden können (Kleppmann 2013, S. 7). In dieser Arbeit werden beide Zielsetzungen untersucht.

4.3.2 Auswahl der Steuer-, Ziel- und Störgrößen

In der Definition eines Versuches müssen zunächst die relevanten Untersuchungsfaktoren festgelegt werden. Diese werden nach Steuer-, Ziel- und Störgrößen unterschieden.

Zielgrößen beschreiben das Ergebnis eines Versuches. Einflussgrößen sind Größen, die die Versuchsergebnisse (Zielgrößen) möglicherweise beeinflussen, sie lassen sich in Steuergrößen unterscheiden, die bewusst vom Benutzer vorgegeben werden und in Störgrößen, die von außen einwirken und nicht vorgegeben werden können. (Kleppmann 2013, S. 12–13).

Im vorliegenden Fall wurden bereits in Kapitel 2.3 mögliche **Zielgrößen** definiert. Durch die operative Produktionsplanung und damit Software beeinflussbar sind die Höhe der Umlauf- und Lagerbestände, Auslastung der Ressourcen sowie der Durchsatz durch die Produktion. Neben diesen Größen, die die Qualität eines Produktionsplanes bewerten, gibt es die Termintreue, die letzten Endes aussagt, wie gut diese Vorhersage eingehalten wurde trotz diverser Störungen. Da die Termintreue aus Sicht der Systemanwender regelmäßig die wichtigste Zielgröße ist (Schuh und Stich 2013), wird besonders viel Wert darauf gelegt, die Auswirkungen von Störungen auf die Termintreue zu untersuchen.

Störgrößen sind die Abweichungen zwischen Plan und Realität, die zu einer Verringerung der Termintreue führen. In Kapitel 2.2.4 wurden die Freiheitsgrade in der Produktion definiert. Diese werden durch die Software festgelegt, aber natürlich kann es dabei zu Abweichungen kommen. Somit ergeben sich die Störgrößen als Abweichungen zwischen Plan und Ist hinsichtlich:

- Der Bearbeitungsreihenfolge an Arbeitsplätzen, bspw. weil ein Auftrag wegen technischer Klärungen, fehlenden Werkzeugen oder aus anderen Gründen übersprungen wird.
- Abweichungen der Kapazität, bspw. durch Krankheit von Mitarbeitern, Maschinenausfällen oder einer abweichenden Maschinen/Mitarbeiterzuordnung.
- Abweichungen von Materialzugängen, bspw. die vorzeitige oder verspätete Anlieferung von fremdbeschafften Materialien bzw. auswärts vergebenen Arbeitsgängen.

Mengenabweichungen, z.B. durch Ausschuss, und Strukturabweichungen (manuelle Umplanung von Arbeitsgängen) werden nicht betrachtet, da dieser Fall die Neuerzeugung von Fertigungsaufträgen erfordert, die nicht durch die Software vorgesehen ist. Im Übrigen ist zumindest bei der Maschinenbau AG diese Art der Produktionsabweichung eher eine Ausnahme. Für die Auftragsfreigabe kann – im Gegensatz zu Produktionsarbeitsgängen – angenommen werden, dass diese eingehalten wird.

Steuergrößen sind die durch das Unternehmen selber zu beeinflussenden Randbedingungen der operativen Produktionsplanung. Im konkreten Fall sind dies einerseits die verwendeten Algorithmen und andererseits ihre Parametrierung. Aus Kapitel

3.1.9 ergibt sich, dass von den untersuchten Verfahren nur das Job-Based-Sequencing (JBS) in praktisch relevanten Problemgrößen alle Anforderungen an eine operative Produktionsplanung erfüllt. Weiterhin ist dieses Verfahren in der Praxis weit verbreitet und soll somit als Vergleichsmaßstab dienen. Kommerziell verfügbare Systeme legen aus nachvollziehbaren Gründen ihre Implementierungsdetails nicht offen, doch auch in der Forschung gibt es keine frei verfügbaren Implementierungen dieser Algorithmen. Aus diesem Grund wird neben der eigentlichen Lösung eine Software auf Basis von JBS entwickelt und verglichen. Die Auswahl des Algorithmus ist damit die wesentliche Steuergröße für die Versuchsplanung.

Eine weitere, untergeordnete Steuergröße ist die Wahl von Pufferstrategien, mit denen die Termintreue erhöht werden kann, jedoch zu Lasten der zugesagten Lieferzeiten. Nach HOPP und SPEARMAN kommen dazu Zeit-, Kapazitäts- und Bestandspuffer in Frage (Hopp und Spearman 2001, 294ff). Die Festlegung von Bestandspuffern erfordert genaue Kenntnis von Verbrauchsprognosen die in der Einzel- und Kleinserienfertigung nur schwer durchzuführen sind. Deshalb beschränkt sich die Untersuchung auf die Unterplanung von Kapazitäten und die Überplanung von Übergangszeiten, da diese Parameter in allen gängigen Systemen problemlos eingestellt werden können.

4.3.3 Auswahl der Datengrundlagen

Offensichtlich ist es unmöglich den neuen Algorithmus auf alle denkbaren Unternehmen mit ihren unterschiedlichen Produktionsstrukturen anzuwenden. Deshalb wird im Rahmen der Validierung das neue Verfahren mit einem Datensatz eines realen Maschinenbauunternehmens verglichen. Dieses Unternehmen ist in vielerlei Hinsicht typisch für den gewählten Bezugsrahmen.

Die Maschinenbau AG

- Fertigt in einer Werkstattproduktion
- Verfügt über ausgeprägte Make-to-Stock-Teile, die in Losen von mehr als 1.000 Stück gefertigt werden
- Aber ebenso über zahlreiche Komponenten, die in kleinen Losen oder als Unikate gefertigt werden
- Eine Kundenauftragsbezogene Montage
- Engpässe, die abhängig von Produkt und Auftragsmix variieren zwischen fehlenden Komponenten (Materialverfügbarkeit), Personal- und Maschinenengpässen.
- Wenig überraschend für hochindividuelle Projekte im Verhältnis zu Serienherstellern zahlreichen Störungen und Produktionsabweichungen

Dazu kommen im Vergleich zu anderen Unternehmen jedoch eine große Aufgeschlossenheit gegenüber modernen Planungsverfahren und eine umfangreiche Datengrundlage mit recht genauen (aber natürlich nicht perfekten) Arbeitsplänen und

Vorgabezeiten. Dieses Planungsproblem beinhaltet damit alle Schwierigkeiten und Sonderfälle, die unter den genannten inhaltlichen Anforderungen relevant sind.

4.3.4 Grundlagen der Versuchsplanung

KLEPPMANN weist daraufhin, dass in einem Versuch trotz aller Sorgfalt stochastische Abweichungen und Messfehler entstehen. Eine Möglichkeit, dies zu verhindern ist die mehrfache Versuchsdurchführung und Mittelwertbildung (Kleppmann 2013, S. 2). Darauf kann jedoch verzichtet werden, wenn die Unterschiede zwischen den Zielgrößen sehr viel größer sind als die Streuung der Messwerte. Insbesondere ist ein Verzicht auf statistische Verfahren gerechtfertigt, wenn die Standardabweichung der Messwerte weniger als ein Fünftel der Unterschiede zwischen den Steuergrößen ausmacht (Kleppmann 2013, S. 3).

Im Versuchsaufbau werden deterministische Algorithmen verwendet, die garantiert bei mehrmaliger Versuchsdurchführung das exakt gleiche Ergebnis liefern. Lediglich die (explizit modellierten) Störgrößen haben stochastische Einflüsse, sodass eine Versuchswiederholung nur bei deren Verwendung notwendig werden könnte. Aus diesem Grund sind auch Randomisierung und Blockbildung zu vernachlässigen die in klassischen technischen Versuchen beachtet werden sollten. Durch die Mittel der statistischen Versuchsplanung kann die Anzahl der Versuche noch weiter reduziert werden.

Dazu wird für jeden Faktor (Stör- und Steuergrößen) eine Menge von Faktorstufen festgelegt (bspw. Algorithmus: Neu/Alt oder Reihenfolgeabweichung: Keine, Geringe, Hohe Abweichung). Aus der Kombinatorik kann ein Versuchsplan aufgestellt werden, in dem jede Faktorausprägung mehrfach auftritt. Damit reduzieren sich die statistischen Anforderungen an die Anzahl der Versuche für eine bestimmte Merkmalsausprägung.

4.3.5 Konkreter Versuchsplan

Für den Versuchsaufbau wird das Produktionsprogramm der Maschinenbau AG an einem Stichtag von verschiedenen Algorithmen geplant. Die Ergebnisse werden hinsichtlich Bestandshöhe, Auslastung und Durchsatz bewertet. Weil die Produkte sehr unterschiedlich sind, wird der Durchsatz monetär bewertet da der erzielte Umsatz stark mit der Fertigungskomplexität korreliert. Alle Algorithmen verwenden die gleichen Daten.

Die gleichen Analysen werden für die Kombination aus Algorithmus und Pufferstrategie angewandt. Die Erstplanung erfolgt deterministisch, eine Wiederholung der Versuche ist damit unnötig.

Für die Untersuchung der Termintreue wird die betriebliche Praxis nachgestellt. Im tatsächlichen Betrieb finden folgende Schritte statt:

- Nächtliche Planung eines Produktionsprogramms

- Für Kundenaufträge, die erstmalig geplant wurden wird der geplante Liefertermin gespeichert und dem Kunden zugesagt
- Der Produktionsplan für den folgenden Tag wird (mit mehr oder weniger großen Abweichungen) umgesetzt.
- Neu erfasste Kunden- und Fertigungsaufträge einerseits und die Rückmeldungen andererseits verändern die entsprechenden Daten
- Eine nächtliche Neuplanung berücksichtigt die veränderte Datenlage und berechnet neue Termine

Die Lieferterminabweichung ergibt sich dadurch aus der Differenz von zuerst geplantem Termin und dem tatsächlichen Liefertermin. Im Rahmen der Versuchsplanung wird dieser Prozess geringfügig abgewandelt:

- Die Zusagen für alle Aufträge werden im ersten Planungslauf festgelegt (anstatt am Tag nach der Erfassung)
- Die Abweichungen am Produktionsprogramm werden im Computer simuliert, das ermöglicht die Kontrolle über Art und Umfang der Abweichungen.
- Es werden keine neuen Aufträge erfasst.

Dieser Zyklus von Planung und (simulierter) Abarbeitung wird über einen längeren Zeitraum wiederholt. Weil es Aufträge gibt, die am Ende des Simulationszeitraums noch nicht geliefert wurden, wird in diesem Fall das letzte Plandatum mit dem zuerst ermittelten Zusagedatum verglichen um in allen Vergleichen die gleiche Grundgesamtheit zu betrachten.

Entsprechend der Prinzipien der Versuchsplanung ergibt sich daraus folgender Versuchsplan:

Nr.	Steuergrößen		Störgrößen	Zielgrößen
	Algorithmus	Puffer	Störungen	Zielgrößen
1	EDS	Keine	Keine	Bestand, Umsatz, Auslastung
2	JBS	Keine	Keine	Bestand, Umsatz, Auslastung
3	EDS	Keine	Gering	Termintreue, Umsatz
4	JBS	Keine	Gering	Termintreue, Umsatz
5	EDS	Keine	Mittel	Termintreue, Umsatz
6	JBS	Keine	Mittel	Termintreue, Umsatz
7	EDS	Keine	Hoch	Termintreue, Umsatz
8	JBS	Keine	Hoch	Termintreue, Umsatz
9	EDS	Zeit	Mittel	Termintreue, Umsatz
10	JBS	Zeit	Mittel	Termintreue, Umsatz

11	EDS	Kapazität	Mittel	Termintreue, Umsatz
12	JBS	Kapazität	Mittel	Termintreue, Umsatz

Tabelle 3: Versuchsplan

Der Versuchsplan enthält damit 6 Versuche für den mittleren Störungslevel, ohne Anwendung von Puffern wird jeder Algorithmus mit 4 verschiedenen Störungsniveaus konfrontiert. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass stochastische Effekte die Ergebnisse nicht verfälschen.

4.4 Zwischenfazit

Aufbauend auf den Forschungsfragen wird eine Software zur operativen Produktionsplanung auf Basis der ereignisdiskreten Simulation entwickelt. Aus dem ERP werden Aufträge und ihre Materialreservierungen, d.h. die Auftragsnetze übernommen. In dem neuen Algorithmus werden die klassischen Aufgaben der Fertigungssteuerung aus a) Auftragsfreigabe b) Reihenfolgenbildung c) Kapazitätssteuerung automatisch ausgeführt.

Das System berechnet Termine pro Arbeitsgang und Auftrag so, dass jederzeit die Material-, Personal- und Maschinenverfügbarkeit sichergestellt wird. Weitere Restriktionen (z.B. Fertigungshilfsmittel, Mehrpersonenbedienung usw.) könnten implementiert werden, tragen aber nichts zur Beantwortung der Forschungsfrage bei und wurden deshalb nicht weiter betrachtet. Dieser grundsätzliche Planungsansatz hat sich in zahlreichen APS-Implementierungen bewährt, es ist deshalb von einer prinzipiellen Anwendbarkeit auszugehen.

In Kapitel 5 wird zunächst die Einbettung der Software in die Prozess- und Systemlandschaft beschrieben. Mit Hilfe von Screenshots wird dabei auch erläutert, wie Anwender den Produktionsplan interpretieren und mit diesem interagieren können. Im folgenden Kapitel wird das Datenmodell konkretisiert bevor erst in Kapitel 7 die eigentliche Planung und insbesondere deren neuartige Erweiterungen diskutiert werden.

Der neue Planungsansatz soll dabei „besser“ sein als bestehende Lösungen. Deshalb wird zu Vergleichszwecken der Algorithmus „JBS“ ebenfalls implementiert. Dieser Algorithmus ist nach Kenntnis des Autors die einzige Alternative, die ebenfalls Multi-Ressourcen simultan in vertretbarer Rechenzeit planen kann.

Die Validierung dieser Software in Kapitel 8 erfolgt dreistufig:

- Formale Prüfung, ob die Randbedingungen eingehalten wurden
- Vergleich der logistischen Kennzahlen für die Planungslösung mit JBS/EDS
- Vergleich der Robustheit der Planungslösung bei simulierten Produktionsabweichungen

Dazu werden Methoden der statistischen Versuchsplanung angewandt um verlässliche Ergebnisse zu erzielen. Neben der reinen Leistungsbewertung werden auch die Mechanismen untersucht, die zu Produktionsabweichungen führen.

5 Prozessmodell

Das beste System funktioniert nicht ohne ein geeignetes Prozessmodell. In diesem Kapitel wird dargelegt, wie Anwender mit dem System arbeiten und auf einige wesentliche Aspekte des User-Interfaces eingegangen. Letzteres dient auch als Grundlage um in Kapitel 8 qualitativ an Beispielen die Effekte im Laufe der Planung darzustellen.

5.1 Bedienungskonzept im operativen Einsatz

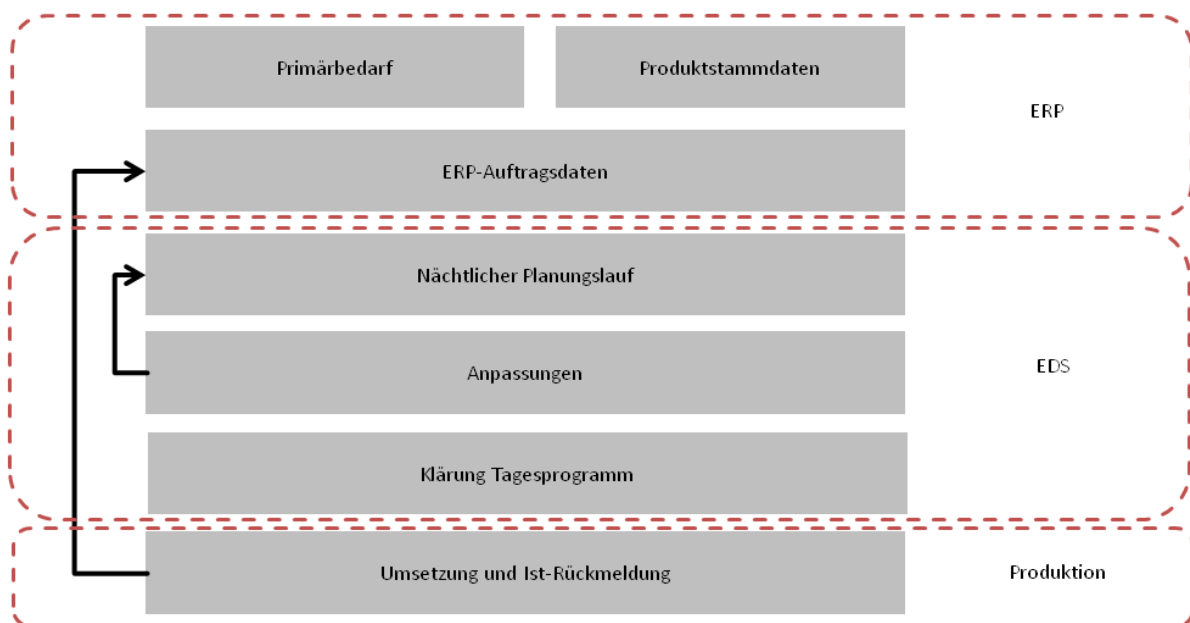


Abbildung 14: Prozessablauf der Fertigungsplanung

Abbildung 14 zeigt den grundsätzlichen Ablauf der Fertigungsplanung und – Steuerung. Im ERP-System erfasst die Arbeitsvorbereitung Produktstammdaten (Materialstamm, Arbeitsplan und Stückliste) und der Vertrieb (sowie ggf. die Disposition für Vorplanungsartikel) den Primärbedarf.

Im Rahmen des MRP-Laufes werden im ERP aus diesen beiden Datenquellen Fertigungsaufträge und Bestellungen erzeugt. Die gesammelten Daten für alle offenen Aufträge werden an das System übergeben und von diesem in einem nächtlichen Planungslauf terminiert. Dies beinhaltet die Materialreservierungen, d.h. die Zuordnung von Bedarfsdeckern zu Bedarfen.

Kein System ist aber in der Lage, mit dem Betriebsrat Schichtwechsel abzustimmen, mit dem Lieferanten über beschleunigte Bestellungen zu verhandeln oder die Priorisierung von Kundenaufträgen selbständig durchzuführen. Die Fertigungssteuerung prüft den Plan und erkennt darin Engpässe. Dazu benutzt sie die nachfolgend beschriebenen Auswertungen. Auf Grund dessen leitet sie entsprechende Maßnahmen

ein und trägt diese ggf. im System ein. Diese Maßnahmen lassen sich in folgende Kategorien gliedern:

- Maschinenkapazitäten können kurzfristig nicht angepasst werden, sehr wohl aber Personalkapazitäten durch Änderungen am Schichtmodell (Sonderschichten) oder mittelfristig durch die Qualifikation zusätzlicher Mitarbeiter für Engpassmaschinen.
- Fremdvergabe von Arbeitsgängen kann die Kapazitätsnachfrage reduzieren, häufig werden nicht die dringenden Aufträge auswärts vergeben, sondern weniger dringende um die Kapazitäten für die Eigenfertigung freizuhalten. Dadurch werden die oftmals längeren externen Lieferzeiten kompensiert.
- Bestellungen können ggf. in Absprache mit dem Lieferanten beschleunigt werden, die angepassten Liefertermine werden im nächsten Planungslauf berücksichtigt.
- Aufträge können priorisiert werden zulasten von anderen, weniger wichtigen Aufträgen.

Diese Anpassungen werden im ERP (Liefertermine von Bestellungen) oder im System erfasst und spätestens am nächsten Tag wirksam in die Produktionsplanung übernommen (sie können auch manuell übernommen werden).

Im nächsten Schritt wird für einen sehr kurzfristigen Zeithorizont zwischen Produktion und Fertigungssteuerung das Tagesprogramm abgestimmt. Dabei werden Kriterien wie Rüstopoptimierung, kurzfristige Umplanungen durch Störungen oder Ähnliches berücksichtigt. Hauptzweck dieser Abstimmung ist jedoch, die Produktion einzubinden und ein gemeinsames Verständnis der Aufgaben zu erreichen und die Fertigungsmitarbeiter in die Verantwortung einzubinden.

Im Folgenden wird dieser Plan möglichst einfach an die Mitarbeiter kommuniziert und umgesetzt. Selbstverständlich kann es dabei zu Abweichungen vom Plan kommen. Der Auftragsstatus wird an verschiedenen Stellen erfasst. Dies beinhaltet das BDE für Fertigungsaufträge, das ERP für Wareneingänge und bestimmte Qualitätsprüfungen. Alle Daten werden jedoch schlussendlich in das ERP übertragen und von diesem im nächsten Nachtlauftag erneut zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise wird der Ist-Zustand der Produktion ebenso wie die vorgenommenen Änderungen am Plan spätestens am nächsten Tag berücksichtigt. Im System können darüber hinaus Auftragsstörungen gemeldet und von den entsprechenden Mitarbeitern gelöst werden. Ziel all dieser Maßnahmen ist es, den Plan möglichst genau umzusetzen, dabei aber das Wissen der Mitarbeiter zu nutzen.

Der wichtigste Punkt jedoch ist, dass das System spätestens nach einem neuen Planungslauf unter Berücksichtigung aller Anpassungen und Störungen einen neuen Plan aufstellen kann. Dieser Plan wird erneut auf Probleme untersucht um Gegenmaßnahmen einzuleiten. Trotz aller Bemühungen kann es – gerade bei Ausschuss oder plötzlichem Maschinenausfall oder verspäteten Bestellungen – geschehen,

dass ein Termin nicht mehr eingehalten werden kann. In diesem Fall wird der Kunde informiert.

5.2 User Interface

PATZAK fordert von einem Modell unter anderem eine einfache Bedienbarkeit (Patzak 1982, 309ff). In diesem Kapitel wird das User Interface des Systems vorgestellt. Das System ist web-basiert und funktioniert in jedem modernen Browser. Es besteht aus 3 Frames. Im oberen befindet sich eine Menüleiste, die Navigation erfolgt im linken Teil, im rechten Fenster werden Details zu den gewählten Objekten angezeigt.

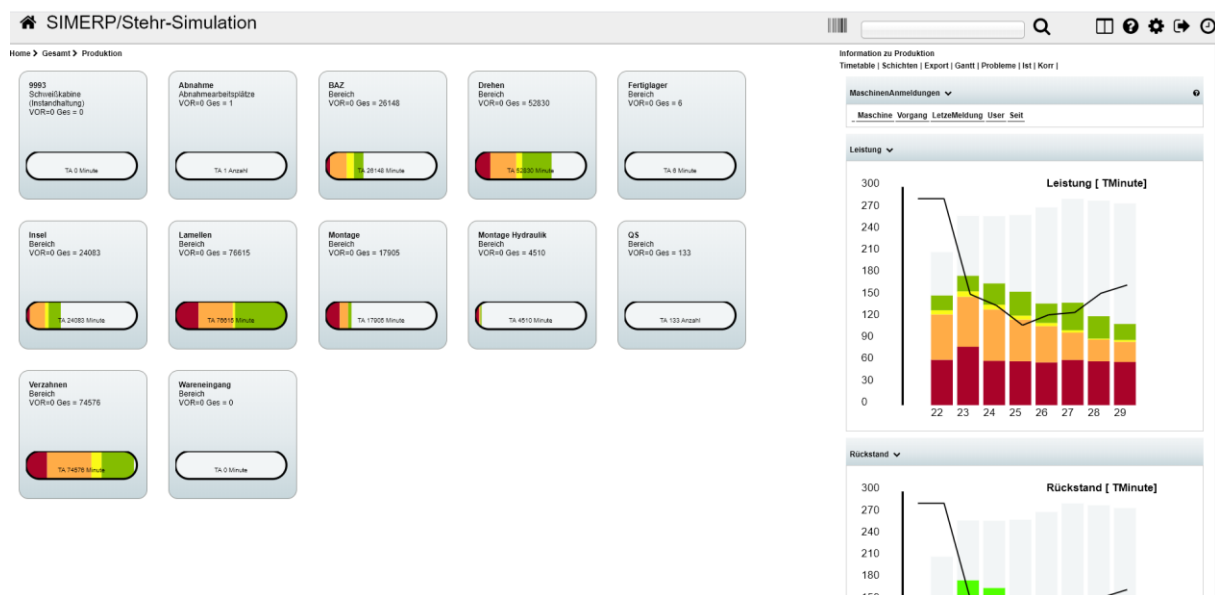


Abbildung 15: Startbildschirm - Bereichsübersicht

Abbildung 15 zeigt den Startbildschirm. Dabei repräsentieren die Kacheln im System Fertigungsbereiche bzw. Arbeitsplätze, im rechten Detailfenster werden Statistiken zu Rückstand, Planleistung und Auslastung zum ausgewählten Bereich angezeigt. In der ersten sichtbaren Graphik werden die eingeplanten Minuten für die nächsten Kalenderwochen angezeigt. Diese sind nach ihrer Dringlichkeit farblich differenziert. Die schwarze Linie zeigt die durchschnittliche Liegezeit der Aufträge in der jeweiligen Woche, die grauen Balken zeigen den Anteil der Personalminuten, die nicht eingeplant werden konnten. Dies kann zwei Ursachen haben: Entweder reicht der Arbeitsvorrat nicht aus, um alle Ressourcen auszulasten oder eine ungünstige Schichtzuordnung verhindert die Belegung der Maschinen.

In der Maschinenbau AG sind die Kunden Branchen zugeordnet. Mehrfach pro Woche prüfen die Mitarbeiter der Fertigungssteuerung die Liste aller rückständigen Kundenaufträge der ihnen zugeordneten Branche um im Auftragsnetz Probleme zu identifizieren.

Darüber hinaus betreut jeder Fertigungssteuerer noch ein oder zwei Produktionsbereiche und stimmt mit den Verantwortlichen täglich das Tagesprogramm ab und diskutiert Engpässe und mögliche Kapazitätsanpassungen.

5.2.1 Analyse der Kundenaufträge

Eine der wichtigsten Aufgaben der Fertigungssteuerung ist die Analyse von offenen Kundenaufträgen. Einerseits erfolgt dieses auf Zuruf durch den Vertrieb („Wann können wir Auftrag XY liefern?“), andererseits in dem systematisch alle laut aktueller Planung verspäteten Kundenaufträge gesichtet werden.

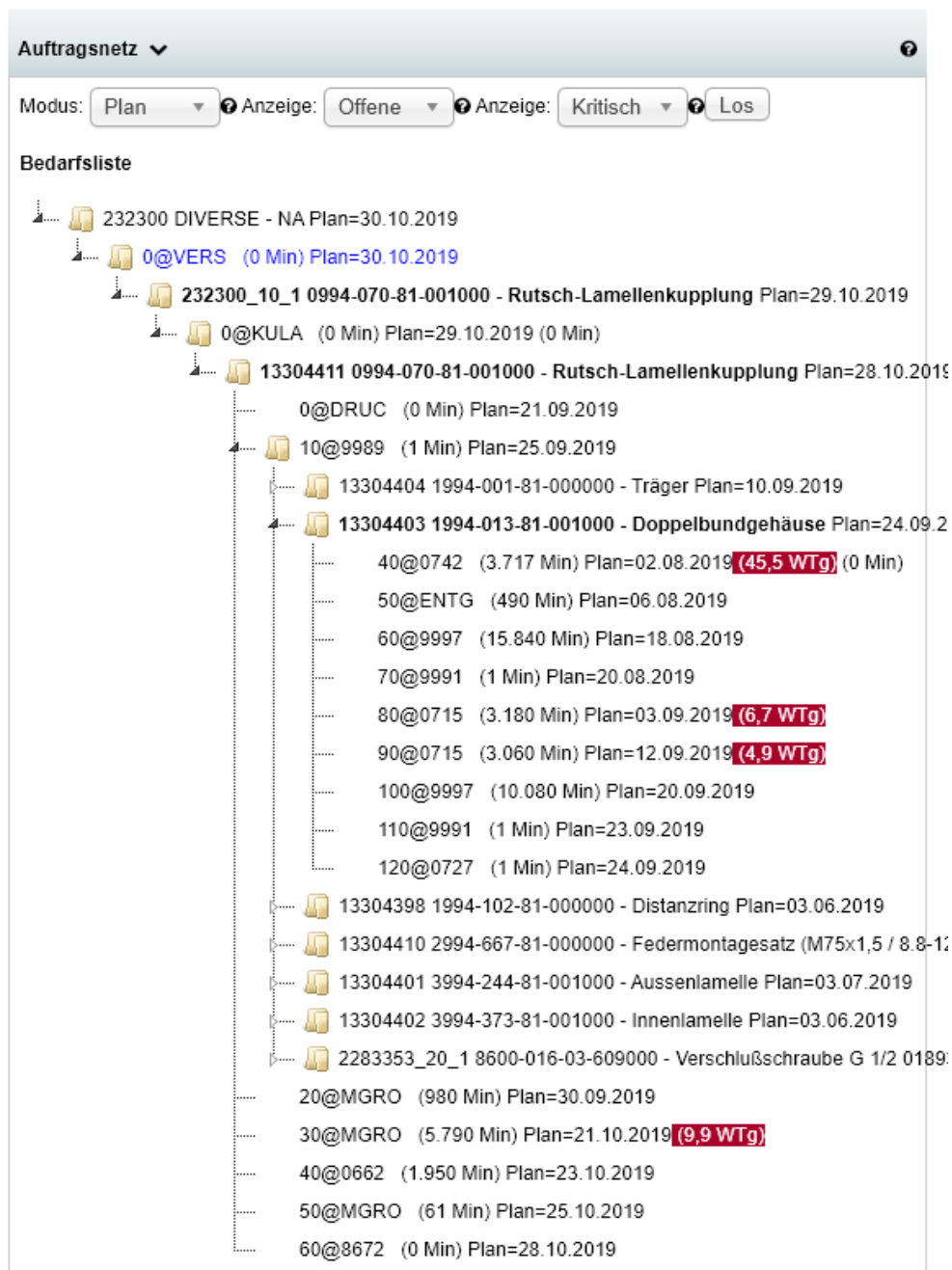


Abbildung 16: Kundenauftragsprüfung durch die Steuerung

Abbildung 16 zeigt eine typische Ansicht. Kundenaufträge können nach verschiedenen Kriterien gefiltert werden, typischerweise werden alle verspäteten Aufträge mit einem Wunschlieferdatum der nächsten Wochen oder Monate selektiert. Durch Klick auf den Auftrag öffnet sich das Detailfenster. In der Baumstruktur ist ersichtlich, dass es sich um eine Kupplung handelt, deren Montage noch verschiedene Komponenten benötigt. Dabei ist automatisch das terminbestimmende Teil – in diesem Falle ein Doppelbundgehäuse – aufgeklappt und darin der Arbeitsplan ersichtlich. Die roten Markierungen kennzeichnen Arbeitsgänge, die eine längere Liegezeit haben oder aus anderen Gründen kritisch sind. Diese Arbeitsgänge können angeklickt und analysiert werden.

Darüber hinaus zeigt das System Potentiale der Materialreservierung auf. So werden in der Baumstruktur Kennzeichen gesetzt, wenn ein Sicherheitsbestand vergeben werden kann oder auf Grund der Prioritäten ein Tausch der Materialreservierung aus dem MRP angezeigt scheint. Daneben wird angezeigt, wenn eine Teilmenge deutlich früher geliefert werden könnte, da ein Arbeitsgang auf zwei verschiedene Bedarfsdecker für das gleiche Material wartet die zu unterschiedlichen Zeitpunkten zur Verfügung stehen.

Wenn alle Maßnahmen ausgeschöpft sind, kann der Auftragstermin durch einen Klick gespeichert werden. In zukünftigen Analysen taucht der Kundenauftrag erst dann wieder auf, wenn sich der Termin um ein definiertes Zeitfenster verschoben hat. Auf diese Weise wird verhindert, dass sich Fertigungssteuerer wieder und wieder mit den gleichen Problemen beschäftigen.

5.2.2 Analyse eines Fertigungsengpasses



Abbildung 17: Erklärung eines Arbeitsganges

In Abbildung 17 ist zunächst ein Gantt-Chart zu sehen. Es wurde ein Vorgang an der Maschine 1041 ausgewählt. Das Diagramm stellt alle Belegungen zwischen der Materialbereitstellung und dem Ende der Bearbeitung des gewählten Arbeitsganges dar. Die blauen Balken stellen die Belegung des Arbeitsplatzes 1041 dar. Der aktive Arbeitsgang ist rot hervorgehoben. Der durchgängige graue Balken auf Arbeitsplätzen zeigt, dass im gesamten Betrachtungszeitraum mindestens ein Auftrag zur Bearbeitung zur Verfügung steht. Darunter befinden sich die qualifizierten Mitarbeiter.

Auf diesen kennzeichnen die grauen Balken die Anwesenheit entsprechend der Schichtplanung. Die blauen Balken repräsentieren Aufträge, die an der gewählten Maschine (1041) bearbeitet werden, schwarze Balken Aufträge, die auf anderen Ressourcen bearbeitet werden. Alle Balken besitzen Mouse-Overs mit Detailinformationen und durch Klick auf die Personalressourcen kann eingesehen werden, welche anderen Maschinen diese noch bedienen.

Im unteren Teil werden die Belegungen der gewählten Ressource (hier 1041) im Betrachtungszeitraum dargestellt. Dabei werden die Liegezeit, Priorität und andere Informationen angezeigt.

Im Screenshot kann anhand des Prioritätsfeldes die Reihenfolge nachvollzogen werden. Zuerst wird ein Auftrag, der die Zusage um 11 Tage überschritten hat, bearbeitet. Danach kommt ein Auftrag, der dringender ist (36 Tage nach Zusage), aber gerade erst zur Verfügung gestellt wurde (L-Kennzeichen für Liegtzeit). Danach werden weitere Aufträge mit geringerer Differenz zur Zusage bearbeitet.

5.2.3 Kapazitätsauswertung

Neben der Analyse der Kundenaufträge können auch die Kapazitäten bzw. deren Auslastung betrachtet werden.

Abbildung 18 zeigt einen Bericht zur Kapazitätsauswertung. Darin wird der Rückstand in Fertigungsminuten pro Bereich und Arbeitsplatz einerseits und Kalenderwoche andererseits aufgezeigt. Erkennbar weist die Maschine 0733 einen sehr hohen erwarteten Rückstand aus, d.h. Aufträge können kapazitiv nur sehr langsam abgearbeitet werden.

Home > Gesamt > Produktion > TimeTable ⓘ

Kennzahl: Rueckstand ▾ Startfarbe: ORANGE ▾ ⓘ Kumuliert ☐ Minus Leistung ☐ Minus Master ☐ Los

Ressourcenname	KW 22	KW 23	KW 24	KW 25	KW 26	KW 27	KW 28	KW 29	KW 30
Produktion	295.305	61.885	80.814	88.031	111.354	86.121	104.963	111.276	130.135
9993	2	0	0	1	1	0	0	0	0
Abnahme	9	3	3	3	5	3	8	4	6
BAZ	42.319	7.634	11.861	5.236	14.260	10.352	13.426	8.771	17.228
0579	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0581	7.287	1.199	1.326	1.697	3.765	2.174	3.263	2.088	4.326
0591	20	0	0	10	30	0	20	0	0
0726	342	227	1.071	661	939	530	483	427	968
0729	3.995	238	405	327	341	376	978	1.142	471
0730	7.051	1.377	799	952	992	861	1.817	2.528	3.228
0733	11.993	3.047	2.349	237	2.421	345	2.144	797	2.355
0737	2.811	430	892	638	1.598	2.888	1.612	482	2.926
0738	4.966	968	4.227	666	3.912	2.218	1.509	875	2.258
0769	3.343	148	792	0	217	960	1.600	432	696
1390	511	0	0	48	45	0	0	0	0
Drehen	43.485	7.816	15.181	10.197	26.670	17.217	20.568	21.008	27.492
Fertiglager	40	9	7	9	9	12	22	20	18
Insel	11.875	2.906	4.947	5.841	7.580	6.669	10.229	10.383	7.545
Lamellen	82.731	19.979	14.379	18.656	27.628	19.319	29.357	33.623	31.809
Montage	25.515	12.892	17.518	26.838	18.803	16.591	11.805	18.615	20.882
Montage Hydraulik	5.637	1.308	1.700	750	469	2.906	1.462	555	5.028
QS	322	157	149	180	196	205	215	249	217
Verzahnen	83.701	9.341	15.221	20.503	15.934	13.055	18.094	18.301	20.133
Wareneingang	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 18: Kapazitätsanalyse

Durch Klick auf den entsprechenden Eintrag öffnet sich die bereits skizzierte Auswertung zur Belastung des Arbeitsplatzes aus Abbildung 19. In diesem Falle ist sofort

ersichtlich, dass die Maschine 0733 nur einschichtig betrieben werden kann, da alle vier qualifizierten Mitarbeiter auf der gleichen (Früh)-Schicht arbeiten. Während zwei Mitarbeiter (Bauer und Meyer, erkennbar an den schwarzen Balken) für andere Arbeitsplätze eingeplant sind, kann Hofmann nicht ausgelastet werden. Mit wenigen Klicks kann die Schichtzuordnung von Hofmann geändert werden, allerdings setzt dies natürlich eine Abstimmung mit den betroffenen Mitarbeitern und ggf. dem Betriebsrat voraus. Wenn diese erfolgreich ist, wird die Maschine in Zukunft zweischichtig eingeplant und sich damit ihr Rückstand deutlich verringern.

Ressourceninfo 0733

◀ Von 02.06.2019 05:59 ▶ bis ▶ 09.06.2019 05:59 ▶

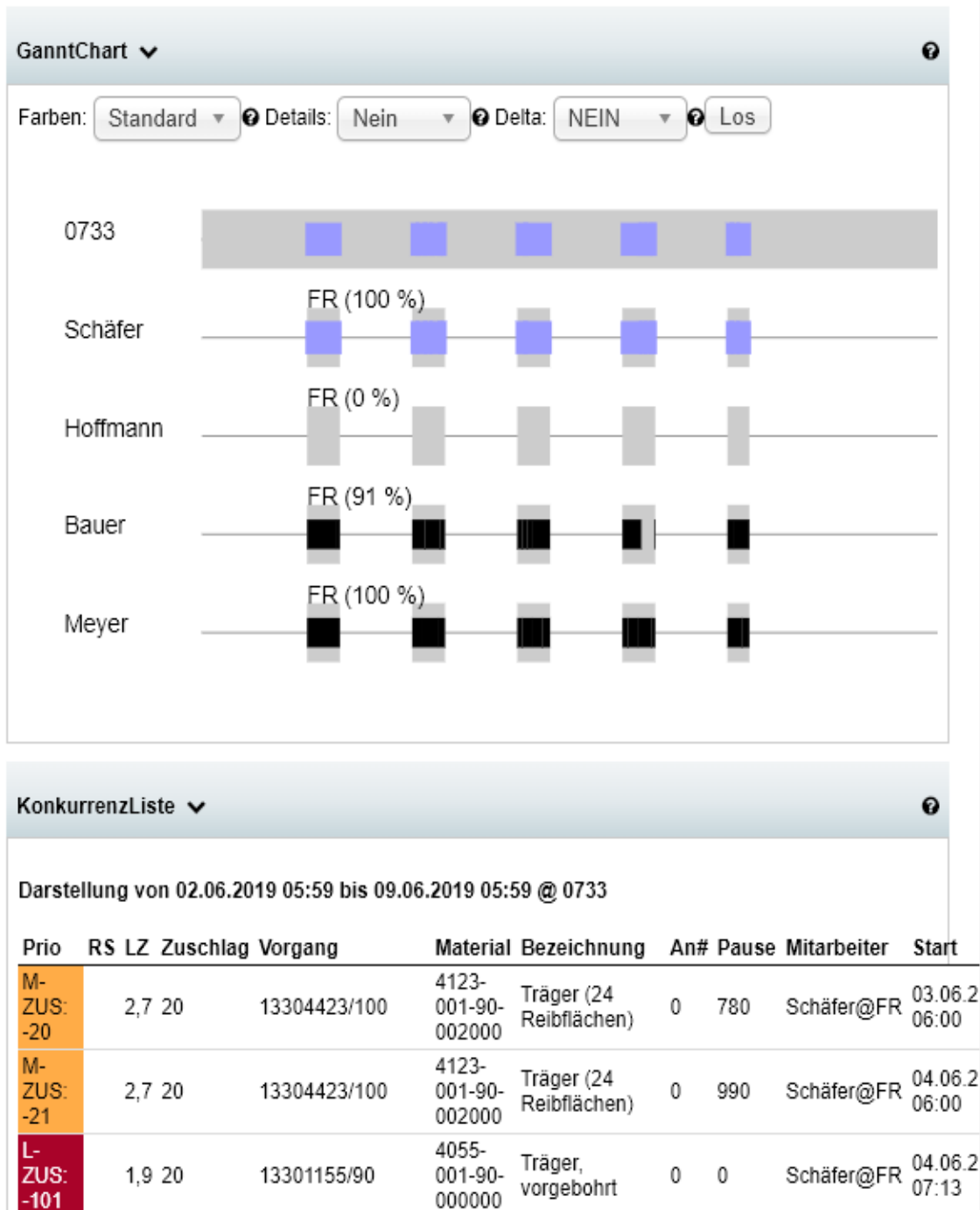


Abbildung 19: Ressourcenauslastung

5.2.4 Optimierung des Tagesprogramms

Jeden Morgen bespricht die Fertigungssteuerung die Personal- und Auftragsplanung mit den entsprechenden Produktionsbereichen. Dazu wird zuerst mit Hilfe der Qualifikationsmatrix geprüft, welcher Mitarbeiter welche Maschine belegen sollte.

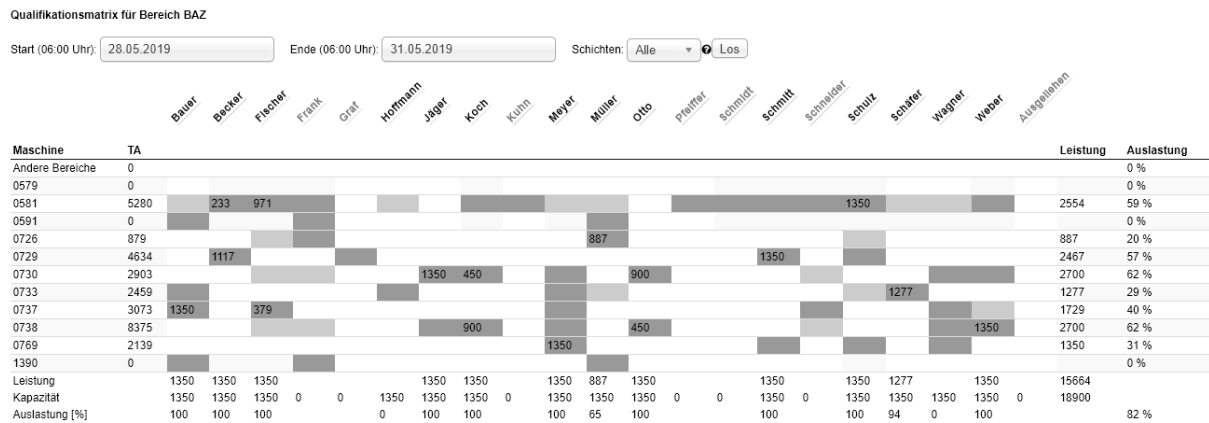


Abbildung 20: Qualifikationsmatrix

Abbildung 20 zeigt für den Zeitraum vom 28.-31.05.2019 eine Qualifikationsmatrix. Die durch Urlaub abwesenden Mitarbeiter sind ausgegraut, die zulässigen Qualifikationen dunkelgrau hinterlegt. In den entsprechenden Feldern steht die Dauer der geplanten Belegung in Minuten, insgesamt ergibt sich eine Auslastung von 82% der Personalressourcen.

Nachdem die Mitarbeiter/Maschinenzuordnung geklärt wurde, wird zwischen Steuerung und Produktion die Auftragsreihenfolge abgestimmt.

Abbildung 21 zeigt die aktuelle Warteschlange an der Maschine 0581. Die Aufträge hinter der grauen Fixierungskachel werden vom System automatisch nach ihrem Planstartdatum sortiert. Wiederum ist ersichtlich, dass diese der Prioritätsfolge (rot bis grün) folgen. Daneben können Aufträge manuell per Drag-and-Drop vor die Fixierungskachel verschoben werden. Im Beispiel ist der erste Auftrag markiert (erkennbar am starken blauen Rahmen). Weitere Aufträge zeigen mit ihrem dünnen blauen Rahmen an, dass sie die gleichen Spannstellen benötigen und demzufolge eine Rüstop Optimierung sinnvoll ist. Aus diesem Grund wurden weitere Aufträge manuell – unabhängig von ihrem Planstartdatum – in der Reihenfolge dahinter geplant. Die Gesamtdauer der eingeplanten Aufträge ist wiederum auf der Fixierungskachel sichtbar (1112 Minuten, ca. 2,5 Schichten).

Auf diese Weise kann ein Kompromiss zwischen Steuerung und Produktion gefunden werden, der neben der Terminalsituation (Farben und bei Bedarf Blick auf die Kundenaufträge) auch das Wissen der Fertigung zu Rüstzeiten und technologischen Randbedingungen berücksichtigt.

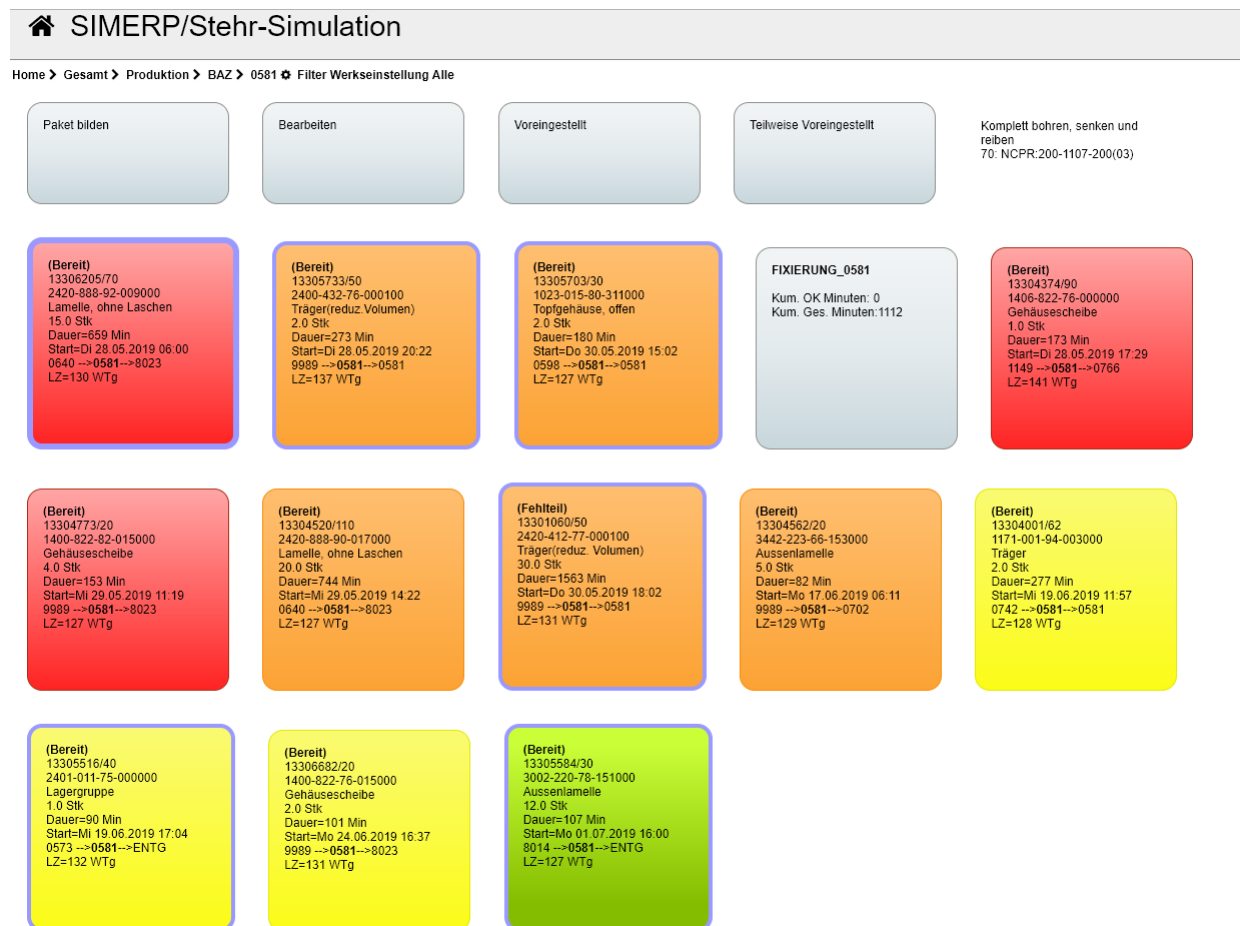


Abbildung 21: Abstimmung der Auftragsreihenfolge

5.2.5 Analyse von Verspätungen

Trotz aller Bemühungen kann es zu Verspätungen kommen. Mit jedem Planungslauf werden die Termine und Materialreservierungen aller Arbeitsgänge in einer Datenbank gespeichert. Aus diesen Daten kann jederzeit der Stand eines Auftragsnetzes und der Verlauf der Terminsituation rekonstruiert werden.



Abbildung 22: Historie zu einem Kundenauftrag

Abbildung 22 zeigt die Historie zu einem Kundenauftrag. Im linken Teil befindet sich der Terminverlauf. Der Auftrag wurde erstmals am 4.11.2019 erfasst, jeder schwarze Punkt steht für einen Tag, an dem der Auftrag eingeplant wurde. Auf der vertikalen

Achse ist der Plantermin eingetragen. Erkennbar war der Auftrag zuerst relativ zeitnah eingeplant, der Termin veränderte sich jedoch schlagartig am 12.11.2019 und behielt diesen Termin für den Rest der Planungsperiode bei. Durch Klick auf das entsprechende Datum öffnet sich der rechte Vergleich der Stücklisten. Darin ist zu sehen, dass ein Fehlteil, welches auf Grund der Wiederbeschaffungszeit zunächst für 22.01.2020 eingeplant war, entfiel und ersetzt wurde durch eine weitere Bestellung, die erst ein Jahr später erwartet wird. Somit kann auch rückwirkend nachvollzogen werden, wann und warum eine Terminverschiebung zustande kam. Bereits in der Übersichtsgraphik im linken Teil kann an den farbigen Punkten erkannt werden, dass es Veränderungen in den Materialreservierungen gab und diese terminbestimmend waren.

5.3 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde die Anwendung der Planung skizziert. Dabei handelt es sich im Kern um eine Regelschleife, die täglich ausgeführt wird.

Im ERP werden die Stammdaten und Primärbedarfe erfasst. Im Rahmen des MRP-Laufs werden die notwendigen Bedarfsdecker (Bestellungen und Fertigungsaufträge) erzeugt und freigegeben sowie die Beziehungen zwischen Bedarfsdeckern und Bedarfen berechnet (Pegging).

Die Gesamtmenge aus Beständen, Bestellungen, Fertigungs- und Kundenaufträgen wird jede Nacht in das System importiert und – ergänzt um dort gepflegte Kapazitätsdaten – zu einem sinnvollen und machbaren Produktionsplan verbunden. Dabei ergänzt das System lediglich Termine zu den bestehenden ERP-Auftragsdaten.

Die Fertigungssteuerung übernimmt eine wesentliche Rolle:

- Sie prüft Kundenaufträge, die laut System rückständig werden könnten und leitet Gegenmaßnahmen ein.
- Sie stimmt gemeinsam mit den Fertigungsbereichen die Personalverfügbarkeit und Schichtpläne ab in dem sie Engpässe an Hand von Kennzahlen identifiziert und auflöst.
- Sie stimmt mit der Produktion ein Tagesprogramm aus den aktuell anstehenden oder unmittelbar erwarteten Aufträgen ab und findet dazu einen Kompromiss zwischen kurzen Rüstzeiten einerseits und terminlichen Anforderungen andererseits

Sämtliche Maßnahmen werden im System dokumentiert und spätestens im nächsten Planungslauf berücksichtigt. Diese Maßnahmen sind in folgender Übersichtstabelle zusammengefasst:

Maßnahme	System
Aufträge priorisieren	EDS
Personalkapazitäten anpassen (Schichtplan / Qualifikationsmatrix)	EDS
Reihenfolge untertägig planen (Rüstopтимierung etc.)	EDS
Auftragsdaten ändern (z.B. Fremdvergabe, Mengensplit)	ERP
Bestelldaten ändern	ERP
Rückmeldestatus (Warenein- und Ausgang, Fertigungsfortschritt)	ERP/BDE

Tabelle 4: Maßnahmen zur Anpassung des Produktionsplans

6 Datenmodell

Das Herzstück dieser Arbeit ist ein Softwaresystem. Wie jedes Softwaresystem kann es durch Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe beschrieben werden. Grundsätzlich werden die Daten wo immer möglich aus dem ERP-System übernommen. In Kapitel 2.3 wurden die allgemein anerkannten Kennzahlen zur Bewertung eines Produktionsprogramms eingeführt. In einem konkreten Softwareprogramm sind jedoch auch konkrete Definitionen zu treffen. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird die Nomenklatur für systemspezifische Kennzahlen definiert. Um eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit sicherzustellen, werden alle planungsrelevanten Daten als Objekte im Hauptspeicher modelliert, d.h. eine Datenbank kommt nur zur Historisierung und gewissen statistischen Auswertungen zum Einsatz oder um Benutzereingaben zu persistieren.

6.1 Eingaben und Ausgaben der Produktionsplanung

6.1.1 Eingaben aus dem ERP-System

Kernaufgabe der Produktionsplanung ist es Angebot und Nachfrage zur Deckung zu bringen. Dies betrifft einerseits das Angebot und die Nachfrage nach Personal- und Maschinenkapazität, aber auch der benötigten Materialien.

Vom ERP benötigt werden demzufolge:

- Alle Kundenaufträge auf Positions- bzw. Einteilungsebene (Primärbedarf)
- Alle Fertigungsaufträge mit Arbeitsplan und Stückliste (Sekundärbedarf)
- Alle Bestellungen mit Menge und Planliefertermin
- Alle Bestände mit ihren verfügbaren Mengen

Dabei sind die Fertigungsaufträge nicht nur Bedarfe, sondern gleichzeitig ebenso wie Bestellungen und Bestände Bedarfsdecker, da sie nach Fertigstellung einen Artikel (z.B. eine Komponente) abliefern. Die Arbeitspläne definieren den Kapazitätsbedarf in Minuten pro Arbeitsplatz/Arbeitsgang und unterscheiden sich in einmalige Rüstzeiten und losgrößenabhängige Bearbeitungszeiten. Dies entspricht den Datenstrukturen, die in ERP-Systemen üblich sind.

Um eine effiziente Berechnung zu ermöglichen, werden alle planungsrelevanten Daten als Objekte im Hauptspeicher gehalten, Benutzereingaben und Daten aus der Vergangenheit werden dagegen persistent in eine Datenbank gesichert um auch nach einem Neustart zur Verfügung zu stehen. Diese Datenbankstrukturen werden im Folgenden nur oberflächlich betrachtet.

Das Datenmodell beinhaltet damit – die nachfolgend genauer beschriebenen - Klassen für Vorgänge, Aufträge und Materialbedarfe bzw. Stücklistenpositionen. Weil es prinzipiell möglich ist, verschiedene Fertigungsaufträge – sofern sie das gleiche Ma-

terial produzieren – zu verwenden, gibt es darüber hinaus noch Klassen für Materialien.

6.1.2 Kapazitätsdaten

In typischen ERP-Systemen werden die planungsrelevanten Kapazitätsdaten in der Regel nicht vorgehalten oder dienen einem anderen Zweck (z.B. der Personalabrechnung). Aus diesem Grund werden die relevanten Daten in eigenen Tabellenstrukturen manuell ergänzt.

Dabei handelt es sich einerseits um die Definition von arbeitsplatzbezogenen Kapazitäten, zweitens einem Betriebskalender mit den jeweils gültigen Feiertagen und Betriebsruhen und drittens die Personalbezogenen Daten.

Bei letzteren handelt es sich einerseits um eine Tabelle mit Mitarbeitern, einer Qualifikationsmatrix, die mögliche Zuordnung von Mitarbeitern zu Arbeitsplätzen beschreibt und einem Schichtmodell, welches die Anwesenheit der Mitarbeiter definiert.

6.1.3 Ausgaben in das ERP-System

Die Ausgabe des Systems besteht im Wesentlichen aus Terminen auf Vorgangs- bzw. Belegungsebene. Alle anderen Berichte, Auswertungen usw. können aus diesen Daten abgeleitet werden.

6.2 Klassendiagramm

In diesem Abschnitt wird zunächst ein vereinfachter Überblick über die Klassen und die Abhängigkeiten zwischen den zugehörigen Objekten angegeben. Diese wird entsprechend der UML-Notation modelliert.

Im weiteren Verlauf werden Besonderheiten und Feinheiten diskutiert.

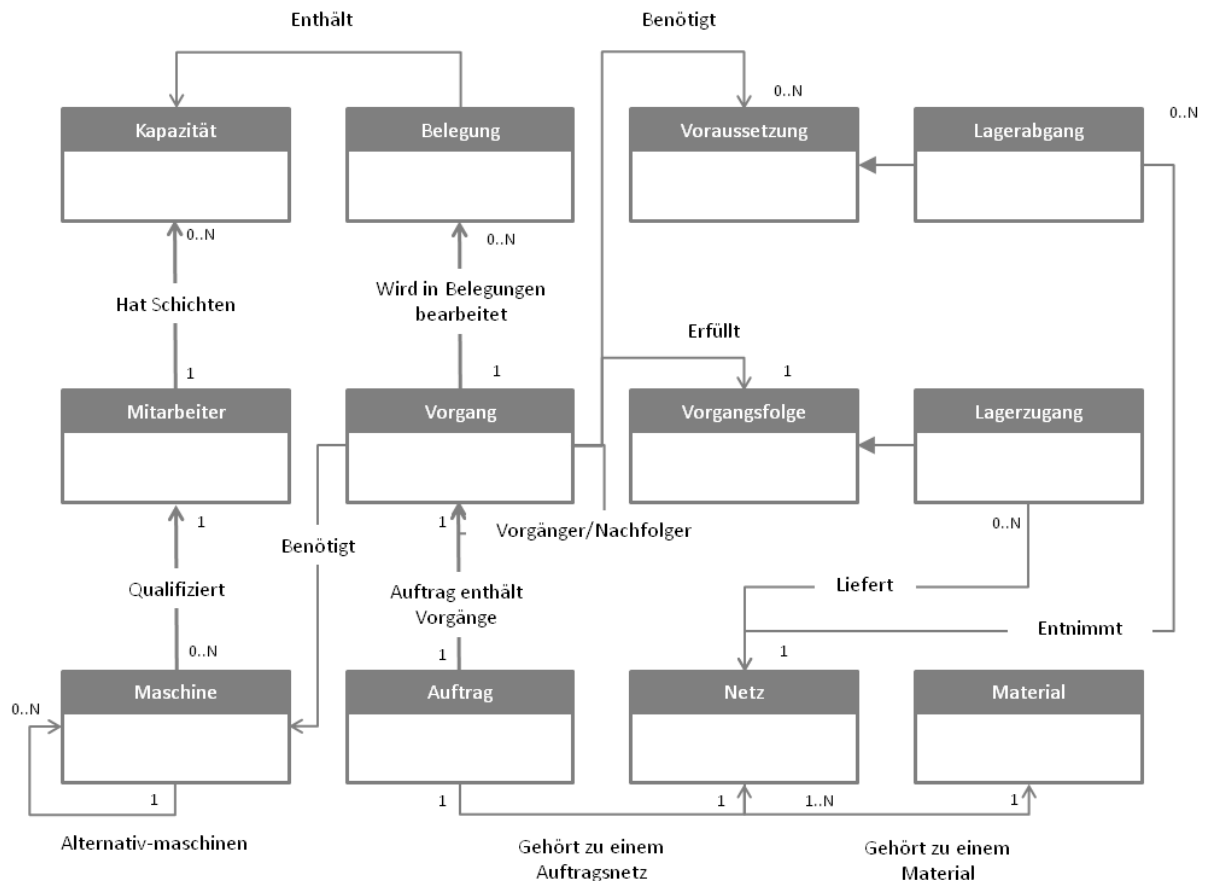


Abbildung 23: Klassendiagramm

Abbildung 23 zeigt die wichtigsten Klassen des Systems in UML-Notation. Aus Übersichtsgründen sind nicht alle Beziehungen und Klassen eingezeichnet. Ein Auftrag beschreibt einen Bedarfsdecker, der ein bestimmtes Material mit einer festgelegten Menge zur Verfügung stellt. Der Auftrag besteht aus einer sortierten Liste von Arbeitsgängen, die untereinander verkettet sind und somit die Möglichkeit bieten, jeweils den vorigen bzw. nächsten Arbeitsgang zu selektieren.

Jeder Vorgang verfügt über maximal eine Vorgangsfolge und eine Liste von Voraussetzungen. Erst wenn alle Voraussetzungen erfüllt sind, kann ein Vorgang angemeldet werden, wenn er beendet wurde, tritt die Vorgangsfolge ein. Eine genauere Erklärung folgt, letzten Endes jedoch werden durch diese Objekte Vorgangsobjekte miteinander verbunden. Diese Architektur ermöglicht es sowohl Verbindungen zwischen Vorgängen innerhalb eines Auftrages (sequentielle Abarbeitung von Arbeitsgängen) als auch zwischen Aufträgen durch Stücklistenpositionen abzubilden.

In diesem Falle sind die Voraussetzungen Lagerabgänge, die von der allgemeinen Voraussetzung erben. Gleiches gilt für den Lagerzugang, der eine konkrete Ausprägung der Klasse Vorgangsfolge ist. Sowohl Auftrag, Lagerabgang und Zugang sind dabei einem Netzobjekt zugeordnet. Im einfachsten Fall entspricht das Netz genau einem Material, es gibt jedoch Fälle, in denen (insbesondere konfigurierbare Materia-

lien) durch einen entsprechenden Schlüssel separat gehandhabt werden. Dies gilt zum Beispiel auch für Materialbestände pro Werk, z.B. können Bestände in einem ungarischen Werk nicht ohne weiteres in einem deutschen Werk verwendet werden.

Weiterhin ist der Arbeitsgang einer Maschine zugeordnet und verfügt über eine Vorgabezeit. Das Maschinenobjekt enthält eine Liste von Alternativmaschinen sowie eine Liste von qualifizierten Mitarbeitern. Diese Liste ist sortiert nach den Präferenzen der Mitarbeiter, d.h. die Stammbegleichschaft steht am Anfang, Kollegen die nur im Ausnahmefall die Maschinen bedienen am Ende der Liste. Das Mitarbeiterobjekt enthält eine Liste von Kapazitätsangeboten, die jeweils durch einen Start/Endezeitpunkt der Schicht sowie der zur Verfügung stehenden Kapazität gekennzeichnet ist.

Wenn ein Arbeitsgang bearbeitet wird, erfordert dies neben der Materialverfügbarkeit, dass sowohl Maschine als auch ein Kapazitätsangebot des Mitarbeiters zur Verfügung stehen. In diesem Fall kann es zu einer Belegung kommen, die für eine definierte Zeitspanne Vorgang, Maschine und Mitarbeiter belegt. Insbesondere bei langen Bearbeitungsdauern werden unter Umständen verschiedene Mitarbeiter und Schichten bis zur Fertigstellung benötigt, so dass ein Vorgang durch mehrere Belegungen erledigt werden kann.

Die Belegung beinhaltet damit neben der Referenz auf den bearbeiteten Vorgang auch eine auf die ausgewählte Maschine sowie das Kapazitätsangebot und damit den Mitarbeiter.

6.2.1 Die Klasse Vorgang

Der Arbeitsgang ist erkennbar der Mittelpunkt des Klassendiagramms. Ein Arbeitsgang enthält neben der Liste der Belegungen noch eine Vorgabezeit (die sich durch eingeplante Belegungen reduziert), einen tatsächlichen Status aus dem ERP und einem Planungsstatus, der signalisiert, in welchem Zustand sich der Arbeitsgang aktuell befindet (siehe 6.3). Die Klasse Vorgang enthält Methoden zur Berechnung von Kennzahlen wie Rückständen und Dringlichkeiten die im Folgenden erläutert werden.

Durch die Verkettung gibt es entweder keinen oder genau einen Vorgänger, gleiches gilt für die Nachfolgebeziehung.

6.2.2 Die Klasse Belegung

Die Ressourcenbelegungen beschreiben eine ununterbrochene Arbeitsleistung an einem Vorgang an einem Arbeitsplatz und beinhalten neben der Referenz auf Vorgang und Maschine auch eine Referenz auf das Kapazitätsangebot des Mitarbeiters. Daneben verfügt sie über einen Start- und Endtermin. Im Falle von einzelnen Arbeitsplätzen ist es möglich, dass mehrere Aufträge gleichzeitig bearbeitet werden. Für diesen Fall gibt es noch einen Integer-Wert, der den „Unterarbeitsplatz“ beschreibt.

Wenn eine Maschine (z.B. Ofen) keine Mitarbeiter benötigt, kann die Referenz auf das Kapazitätsangebot entfallen.

6.2.3 Die Modellierung der Netzabhängigkeiten

Ein Vorgang verweist auf ein Objekt, welches das Interface „Vorgangsfolge“ implementiert. Die Vorgangsfolge beschreibt, was passiert wenn ein Vorgang bearbeitet wurde. Weiterhin verfügen die Vorgänge über eine Liste von Voraussetzungen. Diese müssen alle erfüllt sein, bevor ein Vorgang begonnen werden kann.

Die (nicht dargestellte) VorgangsAuftragsVerbindung implementiert sowohl das Interface „Vorgangsfolge“ als auch „Voraussetzung“. Sie beinhaltet eine Referenz auf zwei aufeinanderfolgende Vorgänge. Sobald der Vorgänger fertig wurde, wird die Methode „erfülleVoraussetzung()“ des Nachfolgers aufgerufen.

Die VorgangsVerbindung ist eine prinzipiell identische Klasse. Sie verbindet jedoch Bestellvorgänge mit den zugehörigen Arbeitsgängen im Falle der verlängerten Werkbank sowie Kundenauftragspositionen mit den Komplettlieferungen des Kundenauftrages. Insgesamt verbindet diese Klasse Vorgänge von verschiedenen Aufträgen ohne dass ein Materialfluss vorliegen muss. Somit sind VorgangsVerbindung und VorgangsAuftragsVerbindung Sonderfälle, die genau zwei Vorgänge miteinander verbinden.

Die Klassen Lagerabgang und Lagerzugang dagegen implementieren eine Stücklistenposition bzw. den Lagerzugang eines Bedarfsdeckers. In der Schnittstelle werden die Materialreservierungen berechnet, so dass Lagerzu- und Abgänge über Materialreservierungsobjekte verbunden werden können. Bei Fertigstellung eines Auftrages wird die verfügbare Menge erhöht. Sobald der Bedarf befriedigt wurde, werden sämtliche Nachfolgevorgänge informiert indem deren Methode „erfülleVoraussetzung()“ aufgerufen wird.

Wenn von den verschiedenen Varianten abstrahiert wird – und das ist der Zweck der Interfaces und abstrakten Klassen – ergibt sich folgender Ablauf:

- Jeder Vorgang kennt seine Nachfolger und Vorgänger (jeweils 0..N Stück)
- Sobald ein Vorgang den Status „ENDE“ erreicht hat, werden diese Nachfolger informiert in dem die Methode „erfülleVoraussetzung()“ aufgerufen wird.
- Sobald alle Voraussetzungen erfüllt sind (mit Hilfe eines Zählers nachverfolgt) wird der jeweilige Nachfolger „BEREIT“ und kann angemeldet werden.

6.2.4 Die Klasse Auftrag

Im Sinne der oben genannten Definition eines Auftrages als Bedarfsdecker werden alle aus dem ERP kommenden Daten als Aufträge aufgefasst. Bestände enthalten nur einen Arbeitsgang mit dem Status „ENDE“. Damit ist diese Voraussetzung bereits beim Berechnungsstart erfüllt.

Bestellungen haben eine Maschine zugewiesen, die beliebig viele Aufträge gleichzeitig bearbeiten kann und dabei 24/7 zur Verfügung steht. Die Vorgabezeit wird in der Schnittstelle bereits auf die Restlaufzeit der Bestellung angepasst.

Fertigungsaufträge wurden bereits beschrieben, sie sind die einzigen Aufträge mit mehreren Arbeitsgängen.

All die bisher genannten Aufträge liefern nach ihrer Fertigstellung ein Material in das Lager ab, welches weiteren Aufträgen zur Verfügung steht. Kundenaufträge (genauer die Einteilungsobjekte) verfügen ebenso wie Fertigungsaufträge über Stücklistenpositionen. Erst wenn alle Materialien zur Verfügung stehen (d.h. die jeweils letzten Vorgänge den Status ENDE erreicht haben), können die entsprechenden Arbeitsgänge beginnen.

Im Falle von Kundenaufträgen gibt es jedoch eine Einschränkung. Aus vertraglichen Gründen ist eine Lieferung vor dem Wunschtermin des Kunden nicht zulässig, d.h. neben allen Vorgängerarbeitsgängen muss auch das Wunschlieferdatum erreicht sein, bevor sie auf den Status „BEREIT“ wechseln.

6.2.5 Die Klassen Netz und Material

Grundsätzlich ist jeder Auftrag einem Material zugeordnet. Dieses beschreibt den gefertigten Artikel. Im Sinne dieser Arbeit gilt jede Abhängigkeit zwischen Vorgängen als Teil eines Auftragsnetzes. In SAP jedoch wird dieser Begriff häufig anders verwandt. Normalerweise dient ein Auftrag zur Erzeugung eines Materials (Artikelnummer). Die Stücklisten der Bedarfe enthalten nur diese Materialnummer, so dass ein Austausch der Materialreservierungen möglich ist.

Insbesondere bei konfigurierbaren Materialien ist dies jedoch nicht möglich – die unterschiedlichen Konfigurationen legen die spätere Verwendung fest. Deshalb ist eine Differenzierung notwendig, die durch das „Netz“-Objekt erfolgt. In SAP bekommen Fertigungsaufträge für konfigurierbare Materialien eine Kopfauftragsnummer, die sie fest an einen bestimmten Bedarfsauftrag bindet. Dieser wiederum beinhaltet in der Stückliste für den entsprechenden Artikel im Kennzeichen Lagerort den Schlüssel „NETZ“. Für die weitere Berechnung ist deshalb nicht das Material, sondern die Kombination aus Materialnummer und Netzbezeichnung relevant. Deshalb sind Auftrag und Material nicht direkt, sondern über das Netz-Objekt verbunden. Lagerabgänge (Stücklistenpositionen) beziehen sich ebenfalls auf das entsprechende Netz wenn dies in der Stückliste so angegeben ist.

Diese Logik ist in vielen gängigen ERP-Systemen implementiert, insbesondere um die Lagerbestände in verschiedenen Werken oder für konfigurierbare Materialien, bei denen die Materialnummer alle nicht zur Spezifikation ausreicht, abbilden zu können.

6.2.6 Die Klasse Maschine

Grundsätzlich stehen die Maschinen 24/7 für die Bearbeitung zur Verfügung. Es gibt Arbeitsplätze (z.B. Öfen), die tatsächlich am Wochenende betrieben werden. Wenn für eine Maschine kein qualifizierter Mitarbeiter hinterlegt wurde, kann die Referenz auf das Kapazitätsangebot des Mitarbeiters entfallen – die Maschine benötigt in dem Falle kein Personal.

Um die Bearbeitung einzuschränken auf die zulässigen Zeiten des Fabrikkalenders, kann einfach ein Dummy-Mitarbeiter mit entsprechendem Schichtmodell angelegt werden. Damit wird faktisch die Bearbeitung auf die entsprechende Anwesenheit begrenzt.

Die meisten Maschinen können zu einem Zeitpunkt nur einen Auftrag bearbeiten. Im Falle von vielen manuellen Tätigkeiten in der Montage oder dem Entgraten dagegen ist dies nicht der Fall. Maschinenobjekte verfügen deshalb über eine maximale Anzahl von gleichzeitigen Belegungen. In diesem Falle werden alle aktiven Belegungen in einem Array der entsprechenden Größe verwaltet. Erst wenn alle Plätze belegt sind, ist keine weitere Belegung möglich.

Zuletzt gibt es noch Fälle einer Mehrmaschinenbedienung. Gerade bei langlaufenden Verzahnungsprozessen ist es üblich, dass ein Mitarbeiter die Maschine für den Auftrag rüstet, danach jedoch nur noch sporadisch die Maschine betreut (Wechsel von abgenutzten Werkzeugen, Kontrolltätigkeiten usw.) und in der Zwischenzeit anderweitig beschäftigt wird. Eine Variable im Maschinenobjekt erlaubt dies zu berücksichtigen. Dabei ist annahmegemäß ein Mitarbeiter für die Dauer der Rüstzeit erforderlich. In der Hauptzeit muss ein Mitarbeiter anwesend sein, aber er verbraucht nur einen im Maschinenobjekt festgelegten Prozentsatz seiner Arbeitszeit auf diesen Auftrag. Die Maschine enthält gedanklich sozusagen eine Menge von gleichartigen Unterarbeitsplätzen.

6.3 Begriffe und Bezeichnungen

In Kapitel 2 wurden die allgemein anerkannten Begriffe definiert. In einem konkreten Softwaresystem gibt es jedoch zahlreiche Bezeichnungen und Begriffe, die naturgemäß speziell beschrieben werden müssen.

6.3.1 Auftragsnetz, Verwendungsnachweis, Auftrag und Vorgang

Ein Auftrag besteht aus mehreren Arbeitsgängen, die sequentiell bearbeitet werden müssen. Jeder Arbeitsgang wird durch eine Vorgabezeit und ein Arbeitssystem beschrieben. Ein Auftragsnetz ist die baumartige Struktur von einem (Kunden)-Auftrag und dessen benötigten Komponenten. Jede dieser Komponenten kann entweder aus dem Bestand, einer Bestellung oder einem weiteren Fertigungsauftrag zur Verfügung gestellt werden. Im Falle eines Fertigungsauftrages enthält dieser Auftrag weitere Arbeitsgänge und ggf. über Stücklistenpositionen weitere Bedarfsdecker.

Dabei kann ein Material (z.B. eine Komponente) durch verschiedene Bedarfsdecker bzw. Aufträge gedeckt werden. Beispielsweise ist eine Teilmenge bereits als Bestand im Lager vorhanden während für die vollständige Befriedigung des Bedarfes noch weitere Bestellungen oder Fertigungsaufträge benötigt werden.

Auftragsnetze können in zwei Richtungen betrachtet werden. Aus Sicht eines Kundenauftrages gibt es eine Baumstruktur von benötigten Komponenten, aus Sicht der Komponente gibt es eine Baumstruktur von Verwendungen (Verwendungsnachweis).

6.3.2 Kundentermine

Das Kundenwunschliefdatum (WLD) bezeichnet einen Termin, den der Kunde bei seiner Bestellung angibt. Insbesondere bei Lieferabrufen ist es üblich, dass ein Kundenauftrag über mehrere Positionen und Einteilungen verfügt. In diesen Fällen bezieht sich das WLD auf eine festgelegte Menge eines bestimmten Artikels. Aus vertraglichen Gründen ist eine vorzeitige Lieferung ausgeschlossen, so dass sich aus dem Auftragsbestand und dem Wunschliefdatum eine obere Schranke für den erreichbaren Umsatz ergibt.

Häufig bestellt der Kunde zu einem unrealistischen Termin. Deshalb wird die aktuelle Lieferterminprognose als „Plan“ bezeichnet. Dieser Termin kann sich naturgemäß im Laufe der Zeit regelmäßig verändern, insbesondere wenn Störungen im Produktionsablauf auftreten.

Das Zusagedatum (ZUS) bezeichnet den Termin, der dem Kunden versprochen wurde. Dieser Termin gilt als Grundlage für eventuelle Vertragsstrafen und die Berechnung der Liefertermintreue. In der Praxis wird der Plantermin aus dem ersten vollständigen Planungslauf für einen Kundenauftrag als Zusagetermin übernommen.

Dabei ist zu beachten, dass Kunden insbesondere bei Abrufen ihre Wunschtermine und Mengen verändern können. Ebenso kann in Ausnahmefällen ein neues Zusagedatum erstellt werden. Dies ist jedoch stets mit manuellen Eingriffen verbunden.

6.3.3 Vorgabezeiten

Die Vorgabezeit bestimmt sich aus der „tr“ und „te“. Die „tr“ entspricht der Rüstzeit eines Vorganges, die „te“ der Einzelzeit oder Bearbeitungszeit. Sie ist abhängig von der Losgröße. Der Arbeitsplatz, die Beschreibung des Arbeitsinhaltes sowie die Vorgabezeiten sind Bestandteil des Arbeitsplans und werden aus dem ERP übernommen. Vorgabewerte werden in der Regel in Minuten angegeben.

6.3.4 Maschinenbezogene Daten

Für jeden Arbeitsplatz können im System Standardzeiten hinterlegt werden. Dabei handelt es sich um:

- Vorgabefaktor - Einen Faktor, mit dem die Vorgabezeiten (Tr/TE) multipliziert werden
- Vorgabezeit – Eine feste Vorgabezeit, die diejenige aus dem Arbeitsplan überschreibt.
- DLZFIXED – Eine fest definierte Zeitspanne, die eingehalten werden muss zwischen zwei Arbeitsgängen. Sie dient als Puffer und beinhaltet technisch bedingte Abkühlzeiten, pauschalisierte Transportzeiten usw. Sie kann vom Planungssystem nicht unterschritten werden.
- DLZSTD – Die Standardliegezeit beschreibt eine typische, erwartete Dauer zwischen Ankunft und Bearbeitungsbeginn eines Arbeitsgangs. Sie dient als grobe Abschätzung der erwarteten Liegezeit.
- DLZESOP – Die Freigabezeit ist ein Parameter, der sich auf die Auftragsfreigabe auswirkt. Sie gibt die gewünschte Liegezeit an einem Arbeitssystem vor.

6.3.5 Vorgangstatus

Ein Arbeitsgang wird durch zwei Statusfelder gekennzeichnet. Der erste Status gibt den tatsächlichen Ist-Status zum Planungszeitpunkt an. Der zweite Status spiegelt den Status im Verlauf des Planungslaufes wieder.

Status	Terminfeld	Bedeutung
WARTE		Der Vorgang darf noch nicht begonnen werden, da noch nicht alle Voraussetzungen erfüllt sind.
BEREIT	TREADY	Alle Voraussetzungen sind erfüllt, der Vorgang kann jederzeit angemeldet werden.
TRU	TSTART	Teiltrück, die Bearbeitung des Vorganges wurde begonnen, die Maschine ist für andere Aufträge blockiert
FERTIG	TPLAN	Die Bearbeitung ist abgeschlossen, die Maschine wird freigegeben
ENDE	TENDE	Der Vorgang hat auch seine fest definierte Übergangszeit überschritten, Folgevorgänge können freigegeben werden

Tabelle 5: Vorgangstatus und Termine

Wenn die Bearbeitung eines Vorganges abgeschlossen ist, wechselt der Status zu „FERTIG“. Doch erst nach einer festen Übergangszeit (DLZFIXED), die für das Maschinenobjekt definiert wurde, ändert sich der Status zu „ENDE“ und gibt damit Nachfolgevorgänge zur Bearbeitung frei. Der Zeitpunkt des Statuswechsels wird in

den angegebenen Terminfeldern (TREADY, TSTART, TPLAN, TENDE) gespeichert und steht damit späteren Auswertungen zur Verfügung.

6.3.6 Termine auf Vorgangsebene

Neben den gerade eingeführten Planungsfeldern werden auf Vorgangsebene noch im Rahmen einer Durchlaufterminierung weitere Terminfelder bestimmt. Die technische Umsetzung wird in Kapitel 7.3 beschrieben.

Zunächst werden die Wunschliefer- und Zusagedaten vom Kundenauftrag innerhalb des Auftragsnetzes auf die Bedarfsdecker übertragen. Dabei ergibt sich der Termin eines Vorganges nach folgender Formel:

$$WLD = WLD_{Nachfolger} - DLZStd_{Nachfolger} - tr - te - DLZFixed$$

Diese Logik bestimmt einen Eckstarttermin für den Vorgang. Dieser Starttermin bestimmt sich aus dem Wunschstarttermin des Nachfolgers abzüglich dessen erwarteter Liegezeit $DLZStd$. Somit ergibt sich ein Wunschtermin für TREADY des Nachfolgers. Von diesem muss noch die feste Übergangszeit und Bearbeitungszeit des eigenen Vorganges abgezogen werden um den Wunschstarttermin zu bestimmen.

Wenn ein Vorgang mehrere Nachfolger hat (z.B. ein Fertigungsauftrag, der in die Stücklisten verschiedener Aufträge eingeht), wird der früheste Wunschtermin genutzt.

Analog wird das Zusagedatum berechnet, allerdings ausgehend vom Zusagedatum des Kundenauftrages. Weiterhin wird ein LETZTER berechnet, dies entspricht der gleichen Berechnungslogik, allerdings ohne Berücksichtigung der Standardübergangszeit. Ein Vorgang der nach diesem Termin begonnen wird, kann nicht mehr pünktlich abgeschlossen werden, da unabhängig von Kapazitätsüberlegungen bereits die festen Übergangs- und Bearbeitungszeiten den restlichen Zeitraum bis zum zugesagten Liefertermin in Anspruch nehmen.

In umgekehrter Reihenfolge (Vorwärtsplanung) wird ein ERSTER berechnet, dies entspricht dem frühesten möglichen Plantermin eines Vorganges ohne Berücksichtigung von Kapazitäten, aber mit Berücksichtigung von $DLZFixed$ sowie der Bearbeitungszeiten. Für bereite Vorgänge ergibt sich dieser Termin aus dem ersten Planungstag zuzüglich der Bearbeitungs- und Übergangszeiten. Bei der Weitergabe an Nachfolger gilt selbstverständlich der späteste ERSTER-Termin, da alle Voraussetzungen erfüllt sein müssen.

6.3.7 Farben und Rückstände

Zur einfachen Analyse und Priorisierung von Vorgängen werden diese an Hand von Eckterminen klassifiziert. Der Einfachheit halber wurde die Bedeutung an Farben festgelegt.

Vorgänge, bei denen der LETZTE in der Vergangenheit liegt, können rein rechnerisch mindestens einen Bedarf nicht decken (da dieser Termin nur die feste Übergangs- und Bearbeitungszeit betrachtet). Diese Aufträge werden ROT dargestellt.

Aufträge, bei denen der Starttermin nach dem Zusagedatum liegt, werden ORANGE dargestellt. Da die Zusage auch einen Standarddurchlaufzeitanteil enthält, ist es möglich, den Auftrag pünktlich fertig zu stellen oder sogar wieder in den Vorlauf zu kommen. Analog gilt das gleiche für Aufträge, deren Start nach dem berechneten Wunschlieferdatum liegt. Diese werden GELB dargestellt (wenn sie nicht schon ORANGE sind).

Schließlich gibt es Aufträge, deren Start noch vor dem Wunschlieferdatum liegt. Diese werden GRÜN dargestellt.

Diese Betrachtung bezieht sich auf die Dringlichkeit eines Auftrages. Sie sagt jedoch nichts über die Ursache aus. So gibt es Aufträge, die schon verspätet an eine Maschine kommen und dort sofort bearbeitet werden. Im Sinne der obigen Definition sind sie dringend und ROT, ORANGE oder GELB (abhängig von der Dringlichkeit).

Um zu beurteilen, ob das Arbeitssystem selber rückständig ist bzw. Rückstand verursacht, wird eine abgewandelte Farbdefinition verwendet. Dabei wird ein Vorgang genau dann ORANGE, wenn er länger als DLZSTD im Zustand ORANGE an einem Arbeitssystem lag. Anders ausgedrückt: Erst wenn ein Vorgang über einen längeren Zeitraum (DLZSTD) in der Warteschlange eines Arbeitssystems liegt und dabei auch noch dringend ist, ist der Arbeitsplatz für den Rückstand verantwortlich. Gleiches gilt für die anderen Farben.

Somit gilt folgende Übersichtstabelle:

Farbe	Bedeutung	Bedeutung Rückstand
ROT	Start > LETZTER	Vorgang wurde BEREIT vor dem LETZTEN (noch machbar), aber erst danach begonnen. An diesem Arbeitssystem entstand ein Rückstand, der nicht mehr aufgeholt werden kann.
ORANGE	Start > Zusage	Vorgang lag länger als DLZSTD im Zustand ORANGE an dem Arbeitssystem.
GELB	Start > WLD	Vorgang lag länger als DLZSTD im Zustand GELB an dem Arbeitssystem.
GRÜN	Start < WLD	Vorgang lag länger als DLZSTD am Arbeitssystem.

Tabelle 6: Farbdefinitionen

6.4 Konkrete SAP-Schnittstelle

In diesem Abschnitt wird die konkrete Herkunft der Daten bei der Maschinenbau AG erläutert und die technische Schnittstelle am Beispiel von SAP R/3 skizziert. Dazu werden jede Nacht aus dem ERP Daten als CSV-Dateien exportiert und vom Planungssystem eingelesen.

Datei	Inhalt
CHRD	Arbeitsplätze
MARA	Werksübergreifender Materialstamm mit Texten usw.
MARC	Werksbestände an Material, incl. Sperrbeständen
ORDER_HEADER	Kopfinformationen zu Fertigungsaufträgen
ORDER_OPERATION	Arbeitsgänge zu Fertigungsaufträgen
PP_CONFIRM	Rückmeldestatus zu Fertigungsvorgängen
PURCASE	Bestellungen (Einteilungsebene)
RESB	Stücklisten zu Arbeitsgängen/Fertigungsaufträgen
ORDERS	Kundenauftragspositionen
SDHEDU	Einteilungen zu Kundenauftragspositionen
KFM_DAT	Liste der Sperrkennzeichen zu Kundenaufträgen
Aps_zusatz	Zuordnung von Bestellungen zu Lieferanten sowie der Zuordnung von Bestellungen der verlängerten Werkbank zu Fertigungsvorgängen.

Tabelle 7: SAP-Schnittstellendateien

Diese Dateien werden nächtlich eingelesen und genutzt, um die oben beschriebenen Objekte zu erzeugen. Während die Kapazitätsrelevanten Daten im Wesentlichen aus den eigenen Tabellen erstellt werden (siehe Kapitel 6.1.2) werden die Schnittstellendaten in Aufträge, Vorgänge und Lagerzu- und Abgänge umgewandelt.

So erzeugen die Dateien MARC/MARA Aufträge vom Typ „Bestand“ mit jeweils einem einzigen Arbeitsgang, der den Status „ENDE“ bekommt. Dieser Vorgang ist mit einem Lagerzugangsobjekt mit der entsprechenden Menge und dem Verweis auf das Material bestückt.

Analog wird mit PURCASE verfahren. Die Vorgabezeit des Bestellvorganges ergibt sich aus dem Planliefertermin abzüglich des Berechnungsstarts des Systems (Heute-Datum).

Aus ORDER_HEADER werden Fertigungsauftragsobjekte erzeugt, die mit ORDER_OPERATION um ihre Arbeitsgänge erweitert werden. PP_CONFIRM über-

nimmt den Rückmeldestatus aus dem ERP in die Arbeitsgänge und RESB ergänzt die Vorgänge um eine Liste von Lagerabgangsobjekten entsprechend der Stücklistenpositionen.

Aus KFM_DAT werden Kundenaufträge erzeugt. Diese werden um Positionsdaten aus ORDERS ergänzt und diese wiederum um Einteilungen aus SDHEDU. Wenn KFM_DAT ein sogenanntes Komplettlieferungskennzeichen enthält, dürfen - abweichend vom Standardfall – die Einteilungen nicht einzeln das Haus verlassen, sondern nur der gesamte Kundenauftrag. Diese Abhängigkeiten werden durch Einfügen der entsprechenden VorgangsDirektVerbindungen modelliert.

Schlussendlich gibt es Bestellungen ohne Materialnummer, die sich auf die Fremdvergabe von Arbeitsgängen („verlängerte Werkbank“) beziehen. Diese werden über eine entsprechende Beziehung zwischen Fertigungsvorgang und Bestellung eingefügt, die Vorgabezeit des Arbeitsganges im Fertigungsauftrag wird genullt.

Sämtliche Daten, die zur Verfügung gestellt werden, beziehen sich auf aktive Objekte. Sobald ein Auftrag endgültig geliefert (SAP-Status „Technisch Abgeschlossen – TABG“) wurde verschwinden die Auftragsobjekte und ihre Vorgänge aus der Schnittstelle.

6.4.1 Berechnung von Materialreservierungen

In der Schnittstellenbeschreibung wurde erklärt, dass SAP leider nicht in der Lage ist, die Materialreservierungen zu übermitteln. Deshalb muss diese auf Grund von SAP-Eckterminen rekonstruiert werden.

In der Schnittstelle wurde für jeden Auftrag ein Verweis auf ein Material und eine Auftragsmenge zugeordnet. Im Falle von Kundenaufträgen und Fertigungsaufträgen (Primär- und Sekundärbedarf) wurde den entsprechenden Vorgangsobjekten Lagerabgangsobjekte zugeordnet, die das Material sowie die benötigte Menge beinhalten. Diese Informationen wurden ggf. ergänzt um einen Netzschlüssel und entsprechend zugeordnet.

Das Netzobjekt besitzt nunmehr also eine Liste von Zu- und Abgängen. Jedes solche Materialbewegung verfügt über ein Datumsfeld (im Falle von Zugängen das Planlieferdatum laut SAP, im Falle von Abgängen das Bedarfsdatum laut SAP). Für jedes Material findet jetzt eine Zuordnung wie folgt statt:

Pseudocode berechneAuftragsnetz()

- 1 Sortiere die Liste der Zugänge nach Datum aufsteigend
- 2 Sortiere die Liste der Abgänge nach Datum aufsteigend
- 3 Für alle Zugänge
- 4 Zugang.restmenge = Zugang.Menge

```
5           Für alle Abgänge
6           Menge = MIN(Zugang.restmenge, Abgang.restmenge)
7           If (menge>0) then
8               Zugang.restmenge = Zugang.restmenge-menge
9               Abgang.restmenge = Abgang.restmenge - menge
10          Füge Materialreservierung in Zugang und Abgang ein
11          End if
12  Erzeuge für offene Abgänge einen Fehlauftrag FMAT
```

Algorithmus 1: Materialzuordnung

Die Idee hinter dem Algorithmus besteht darin, dass jeder Zugang seine Menge an die dringendsten Abgänge verteilt. Wenn am Ende noch unbefriedigte Bedarfe existieren, wird ein neuer Auftrag vom Typ „FMAT“ angelegt. Dieser liefert die entsprechende Fehlmenge des Materials. Abhängig von den Einstellungen kann entweder angenommen werden, dass dieses Restmaterial nach der Wiederbeschaffungszeit oder erst am Ende der Planungsperiode zur Verfügung steht.

Das Ergebnis ist in jedem Fall, dass jeder Bedarf durch einen (ggf. FMAT)-Auftrag gedeckt wird.

6.4.2 Berechnung von Kundenterminen

SAP stellt die Termine zu Kundenterminen in Form der Einteilungszeilen (Datei SDHEDU) zur Verfügung. Jede Zeile besteht aus einem Termin und drei Mengenfeldern: a) der Menge, die der Kunde zum Termin wünscht b) der Menge, die ihm zu diesem Termin zugesagt wurde und c) der Menge, die aktuell zum gewählten Termin planmäßig zur Verfügung steht.

Selbst wenn der Kunde nur einen Bestelltermin angegeben hat, können daraus beliebig viele Zeilen werden. Dies ist dann der Fall, wenn verschiedene Teilmengen zu verschiedenen (vom Wunschlieferdatum abweichende) Terminen zugesagt bzw. eingeplant wurden.

Analog zu der Berechnung der Materialreservierungen werden alle drei Termin/Mengen-Kombinationen vom System in Listen eingetragen. Nun wird die Liste der Wunschliefertermine durchlaufen und mit den Restmengen der anderen Termintypen abgeglichen. Auf diese Weise enthält das System für jede Wunschliefermenge/Termin-Kombination eine Einteilungsposition. Das zugeordnete Plan/Zusagedatum berechnet sich als das späteste Datum, an dem die kumulierte Menge zur Verfügung steht.

6.5 Kapazitätsdaten

Die Tabelle `fis_maschinenpark` enthält eine Liste aller Arbeitsplätze mit den entsprechenden Feldern, die in Kapitel 6.3 beschrieben wurden. Diese Felder werden in die Maschinenobjekte übernommen.

Die Tabelle `des_alternativmaschine` gibt eine Liste von möglichen Umplanungszielen an. Diese sind dabei einseitig definiert, d.h. das Tupel $\{M1, M2\}$ definiert, dass eine Umplanung von Vorgängen für Maschine 1 auf Maschine 2 möglich ist, aber nicht den umgekehrten Fall. In diesem Fall müsste das Tupel $\{M2, M1\}$ ergänzt werden. Dadurch können auch Fälle abgebildet werden, in denen Aufträge von der kleineren auf die größere Maschine geplant werden können, aber nicht zwingend anders herum.

Die Tabelle `pers_mitarbeiter` bezeichnet alle Mitarbeiter, `pers_qualimatrix` die Zuordnung von Arbeitsplatz und Mitarbeiter. Dabei kann ein Qualifikationsniveau angegeben werden, welches sich jedoch nicht auf die Planung auswirkt. Im Sinne der Planung ist nur relevant, ob ein Mitarbeiter die Maschine bedienen kann. Ein zweites Feld steuert die Belegungsreihenfolge, somit kann durch den Fertigungssteuerer eine Wunschreihenfolge von Mitarbeitern pro Maschine vorgegeben werden. Diese Reihenfolge wird später im Maschinenobjekt zur Sortierung der zulässigen Mitarbeiter verwendet. Um die Auslastung sicherzustellen, sollten Mitarbeiter mit wenigen Qualifikationen / Qualifikationen für Maschinen mit sporadischer Materialversorgung) bevorzugt eingeplant werden. Auf diese Weise werden zuerst die Spezialisten verplant während die Generalisten üblicherweise noch eine Maschine finden, die belegt werden muss.

Die Tabelle `pers_fabrikkalender` enthält für jeden Tag im Planungszeitraum einen Datensatz mit Wochentag, Kalenderwoche und einem Freitextfeld. Wenn in diesem ein Eintrag steht, gilt der Tag als Feiertag oder Betriebsruhe.

Die Tabelle `pers_schichtmodellmaster` beschreibt die zur Verfügung stehenden Schichten, in `pers_schichtmodell` werden für jede definierte Schicht und jeden Wochentag Start, Ende und Kapazität der Schicht angegeben. Dabei kann noch zwischen geraden und ungeraden Wochen differenziert werden um eine Wechselschicht abzubilden.

All diese Daten werden aus der Datenbank ausgelesen und in die oben definierten Objekte übernommen.

6.6 Formale Validierungskriterien

In der Forschungskonzeption wurden die Randbedingungen eines zulässigen Produktionsplanes bereits diskutiert. Bezogen auf das definierte Datenmodell können diese Randbedingungen wie folgt geprüft werden. Entsprechende Prüflogiken wurden im System implementiert:

- Ein Vorgang darf erst dann beginnen, wenn alle Voraussetzungen erfüllt wurden, d.h. den Status ENDE erreicht haben (Materialverfügbarkeit). Damit muss TREADY größer oder gleich dem maximalen END-Datum aller Vorgängervorgänge entsprechen.
- Ein Vorgang darf nur eine Maschine belegen (kein Maschinenwechsel während der Laufzeit). Alle Ressourcenbelegungen müssen damit den gleichen Maschinen und Unterarbeitsplatzzähler beinhalten, können jedoch verschiedene Mitarbeiter beinhalten.
- Die gesamte Bearbeitungsdauer des Vorganges muss durch Belegungen nachgewiesen sein, d.h. die Summe der Belegungsdauern muss genau der Vorgabedauer entsprechen.
- Die Maschinenbelegung darf das Kapazitätsangebot eines Mitarbeiters nicht überschreiten, d.h. die Summe aller Belegungen in einem Kapazitätsangebot darf die Nettokapazität nicht überschreiten und sich nicht terminlich überschneiden.
- Es darf keine Doppelbelegung von Ressourcen geben, d.h. die Belegungen dürfen sich nicht zeitlich überschneiden (sowohl auf Maschinen- als auch Mitarbeitererebene).

Dabei gibt es Besonderheiten wenn eine Maschine keine Mitarbeiter benötigt oder mehrere Aufträge gleichzeitig bearbeiten kann (z.B. Montage, Entgraten,...). Die genannten Randbedingungen werden im Anschluss an jeden Planungslauf automatisch durch entsprechende Tests automatisch geprüft.

6.7 Inhaltliche Validierungskriterien

Die folgenden Überlegungen beschreiben einige Eigenschaften eines „guten“ Produktionsplans. In einem Auftragsnetz sollten die Komponenten möglichst gleichzeitig fertig werden – andernfalls werden Bestände aufgebaut und Kapazitäten verschwendet, die sinnvoller für andere Aufträge verwendet würden. Dies findet naturgemäß dann Grenzen, wenn der gleiche Bedarfsdecker verschiedene, sehr unterschiedliche Bedarfe bedient.

Analog sollten Aufträge nur eine begrenzte Zeit in der Produktion verbringen. Lange Liegezeiten führen zu Korrosionsschäden, fehlenden Stellflächen und Transportgebinden.

Andererseits sollte ein guter Produktionsplan jedoch auch die Ressourcen auslasten, dies spricht tendenziell für eine frühere Auftragsfreigabe.

Hinsichtlich der Reihenfolge sollten Aufträge mit frühem Lieferdatum (Wunsch- oder/und Zusage) vor weniger dringenden Aufträgen bearbeitet werden. Dies kann jedoch im Einzelfall kollidieren mit der Anforderung, Nachfolgemaschinen mit Arbeit zu versorgen. Insbesondere ist es nicht sinnvoll, Aufträge zu bearbeiten, die nicht terminbestimmend für mindestens ein Auftragsnetz sind.

6.8 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden die grundsätzlichen Ein- und Ausgaben des Systems definiert. Dies entspricht weitgehend der Struktur, die bereits in Kapitel 2 vorgestellt wurde. Dabei werden Daten soweit möglich aus dem ERP übernommen und lediglich um Kapazitätsrelevante Daten ergänzt.

Um das System einfach und vor allem konsistent zu gestalten, werden alle Materialbewegungen über Aufträge abgebildet. Diese Abstraktion kommt damit mit Vorgängen, Aufträgen, Maschinen, Mitarbeitern, Ressourcenbelegungen im Bereich der Kapazitätssteuerung aus. Für die logischen Abhängigkeiten innerhalb von Auftragsnetzen werden die Klassen Material, Netz, Vorgangsfolge und Vorgangsvoraussetzung benutzt.

Weiterhin wurden Auftragsnetz, Wunschliefer-, Plan- und Zusagedatum sowie die im System verwendete Nomenklatur zum Vorgangsstatus und zur Definition von Dringlichkeiten und Rückständen definiert.

7 Erweiterung der Ereignisdiskreten Simulation

In diesem Kapitel wird die eigentliche Planungslogik mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulation beschrieben. Dabei wird besonderer Wert gelegt auf die neu entwickelten Erweiterungen, die eine solche Logik erst auf die mehrstufige Einzel- und Kleinserienfertigung anwenden lassen.

7.1 Grundsätzlicher Aufbau

Das im Folgenden beschriebene System wurde komplett mit Java J2EE entwickelt. Es ist grundsätzlich objektorientiert, web-basiert und plattformunabhängig. Statistische Daten werden in einer MySQL-Datenbank gespeichert.

Die entwickelte Lösung wird seit 2015 bei der Maschinenbau AG operativ eingesetzt und dort von ca. 70 Mitarbeitern täglich genutzt.

Das System verwendet das in Kapitel 6.2 beschriebene Klassenmodell und die im Folgenden beschriebenen Berechnungsmethoden. Dabei sind alle Objekte zweimal vorhanden:

Es gibt eine sogenannte Master-Umgebung sowie eine Simulationsumgebung. Die Produktion verlangt eine verlässliche (Termin)-Vorgabe, die sich im Verlaufe des Tages nicht ändert. Die Fertigungssteuerung dagegen hat häufig den Anspruch, Änderungen an den Kapazitäten, Prioritäten oder Ähnlichem zu simulieren. Beide Umgebungen sind daher strikt voneinander getrennt.

Um jedoch Ist-Daten nicht permanent in zwei verschiedenen Objekten zu speichern und vor allem auch den Rückmeldestatus der Produktion im Tagesverlauf widerzuspiegeln, besitzt jeder Vorgang eine Referenz auf das Objekt FISVorgang. Dieses enthält die Ist-Daten, die im Abstand von wenigen Minuten aus SAP übernommen und im System selber noch um Textanmerkungen oder mit Hilfe des integrierten Rückmelde-/BDE-Systems ergänzt werden können. Somit sind die Ist-Daten in beiden Umgebungen stets sichtbar.

7.2 Ablauf der ereignisdiskreten Simulation

Der prinzipielle Ablauf der ereignisdiskreten Simulation bietet wenig Neues. Kernstück ist die Simulationsuhr. Dieses Objekt besitzt eine Liste mit Vorgängen und eine weitere mit Ereignissen.

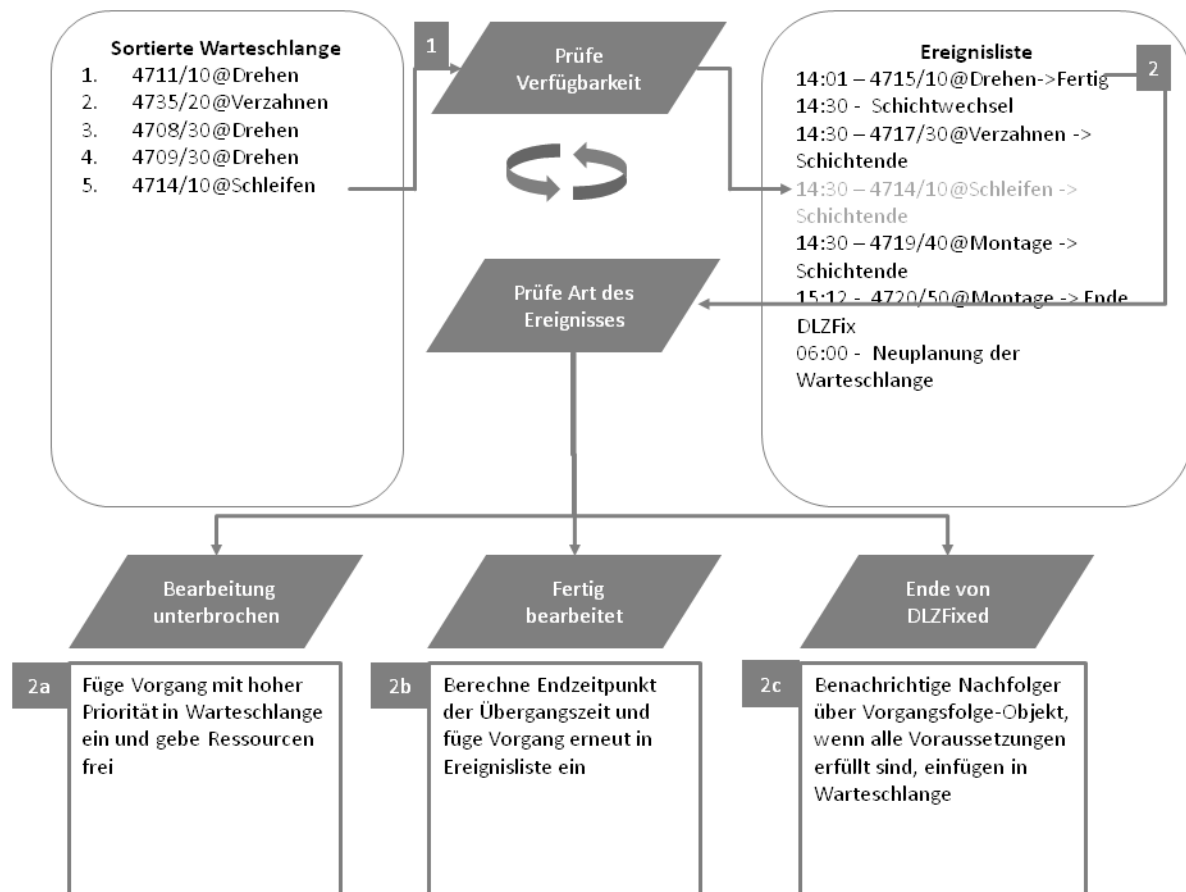


Abbildung 24: Ablauf der EDS

Abbildung 24 zeigt das Prinzip. Bei der Initialisierung werden alle Arbeitsgänge mit dem Status BEREIT (d.h. alle Voraussetzungen sind erfüllt) oder TRU (bereits begonnen) in eine Warteschlange eingefügt und nach Priorität sortiert.

In Schritt 1 werden diese Vorgänge sequentiell darauf geprüft, ob die zugehörigen Ressourcen (Mitarbeiter und Maschinen) verfügbar oder belegt sind. Wenn verfügbar, wird der Endzeitpunkt der Belegung berechnet (entweder bis zum Ende der Schicht des Mitarbeiters oder zur vollständigen Bearbeitung des Arbeitsganges), die Ressourcen werden als gesperrt markiert und der Vorgang in die Ereignisliste einsortiert und aus der Warteschlange entfernt. Abhängig vom Endzeitpunkt kann diese Einordnung an beliebigen Stellen in der Ereignisliste erfolgen. Sobald alle Vorgänge in der Warteschlange geprüft wurden, wird im Schritt 2 das chronologisch nächste Ereignis entnommen und bearbeitet. Abhängig vom Vorgangsstatus gibt es dabei folgende Fälle:

2a – Die Bearbeitung konnte auf Grund eines Schichtwechsels nicht abgeschlossen werden – der Vorgang wird erneut in die Warteschlange einsortiert. Sobald der nächste Mitarbeiter zur Verfügung steht, wird der Auftrag in der Regel erneut angemeldet.

2b – Der Vorgang wurde zu Ende bearbeitet, d.h. die gesamte Vorgabezeit wurde durch eine Menge von Belegungen abgedeckt. Der Zeitpunkt TPLAN wird gesetzt und das Ende der Übergangszeit berechnet (Zeitpunkt des Ereignisses plus DLZFixed) und der Vorgang mit neuem Status und Endzeitpunkt erneut in die Ereignisliste eingefügt.

2c – Der Vorgang hat das Ende der Übergangszeit erreicht, in dem Falle wird das Enddatum TENDE gesetzt und alle Nachfolgevorgänge (Vorgangsfolgeobjekt) benachrichtigt. Diese prüfen mit Hilfe eines Zählers, ob sie noch andere Voraussetzungen benötigen. Wenn dies nicht der Fall ist, werden die Nachfolger in die Warteschlange eingefügt und der Zeitpunkt TREADY bei diesen gesetzt.

Bei der Verfügbarkeitsprüfung der Ressourcen wird nicht nur die im Arbeitsplan genannte Maschine geprüft, sondern – wenn diese nicht verfügbar ist – auch Alternativmaschinen (das Maschinenobjekt enthält dafür eine Liste von Alternativen) und die zugehörigen Mitarbeiter.

Neben den Vorgängen gibt es noch zwei weitere wesentliche Ereignistypen. Einer beschreibt den Beginn einer neuen Schicht. Das Objekt „Mitarbeiterplanung“ liest den Fabrikkalender sowie die Schichtplanungsdaten ein um eine Liste aller Schichten aller Mitarbeiter zu erzeugen. Diese Liste wurde im Rahmen der Initialisierung nach dem Startdatum der Schichten sortiert. Das Objekt initialisiert am Anfang alle Mitarbeiter mit ihrem zugehörigen Kapazitätsangebot und ermittelt den nächsten Schichtbeginn. Sobald dieser Zeitpunkt gekommen ist, wiederholt sich der Ablauf, d.h. die neu angekommenen Mitarbeiter werden initialisiert und der nächste Schichtbeginn ermittelt.

Der zweite Ereignistyp wird alle 24 Stunden aufgerufen. Er berechnet für die gesamte Warteschlange die Prioritäten neu und sortiert die Warteschlange nach dieser. Das ist notwendig, da ein Auftrag in der Warteschlange das Zusagedatum überschreiten und damit dringender werden kann.

7.2.1 Lebenszyklus eines Vorgangs

In den ersten Ausführungen wurde bereits im Grundsatz auf den Lebenszyklus eines Arbeitsganges eingegangen. Im Folgenden wird dies noch einmal vertieft.

Jeder Vorgang enthält eine Liste mit Voraussetzungen. Bei der Initialisierung wird ein Zähler auf die Anzahl an Voraussetzungen gesetzt. Sobald eine dieser Voraussetzungen erfüllt wurde, ruft sie die Methode „erfülleVoraussetzung()“ aller Nachfolgevorgänge auf. Diese reduziert den Zähler der Voraussetzung. Sobald er den Wert 0 erreicht, wird das Datum „TREADY“ auf den Simulationszeitpunkt gesetzt.

Es folgen noch einige spezielle Prüfungen im Falle von Kundenaufträgen (keine Lieferung vor Wunschlieferdatum) und Druckvorgängen (keine Lieferung vor dem festgelegten Auftragsstart TESOP). Wenn eine weitere Verzögerung notwendig ist, wird

der Vorgang als Ereignis eingefügt (mit dem entsprechenden „Wiedervorlage“-Datum), andernfalls in die Warteschlange.

Sobald die oben skizzierte Anmeldung erfolgreich war, wird der Auftrag aus der Warteschlange entfernt und in die Ereignisliste eingetragen. Sobald dieser Zeitpunkt erreicht wurde, wird die Methode „execute()“ des Vorganges aufgerufen. Auf Grund des Statusfeldes und der Restbearbeitungsdauer kann der Vorgang nun erneut in die Vorgangsliste eingefügt oder als „FERTIG“ markiert werden. Dabei wird das Datum „TPLAN“ gesetzt. Es folgt eine Berechnung der Übergangszeit in dem auf den jetzigen Abmeldezeitpunkt noch DLZFIXED aufgeschlagen wird und der Vorgang erneut in die Ereignisliste einsortiert wird.

Erst wenn die Übergangszeit abgelaufen ist, werden über das Vorgangsfolgeobjekt alle Nachfolger benachrichtigt und – sofern sie nicht auf andere Voraussetzungen waren – auf BEREIT gesetzt.

7.2.2 Besonderheiten der Anmeldung

Die Verfügbarkeitsprüfung von Maschinen und Personal erfolgt in mehreren Stufen:

- Zunächst wird für jeden Vorgang in der Warteschlange geprüft, ob die Maschine verfügbar ist.
- Danach werden die qualifizierten Mitarbeiter geprüft.
- Wenn keine Belegung zustande kommt, werden der Reihe nach Alternativmaschinen und deren qualifizierte Mitarbeiter geprüft
- Wenn eine Belegung gefunden wurde, findet eine Prüfung statt ob bereits ein Auftrag angemeldet, aber nicht fertig gestellt wurde. Dieser ersetzt den aktuellen Auftrag.

Dieser letzte Aspekt hat folgenden Hintergrund: Die Zuordnung von Mitarbeitern zu Arbeitsplätzen erfolgt auf Grund der Priorität der Aufträge. Gleichzeitig jedoch sollen angefangene Vorgänge fertig gestellt werden um Rüstzeiten zu minimieren. Somit erfolgt die Belegung auf Grund der Priorität, die eigentliche Bearbeitungsreihenfolge verhindert jedoch Auftragsunterbrechungen.

Weiterhin ist es möglich, Arbeitsplätze zu definieren (z.B. Montage, Entgraten), die mehrere Aufträge gleichzeitig bearbeiten. Daher wird ein Array von möglichen Belegungen durchlaufen und eine Anmeldung vorgenommen, wenn in diesem ein freier Platz existiert. Die Länge des Arrays ergibt sich aus den Stammdaten.

Jeder Mitarbeiter verfügt über einen Zähler und eine Liste von bereits bedienten Maschinen. Beide werden mit Beginn einer neuen Schicht zurückgesetzt. Wenn ein Vorgang eine Anmeldung versucht, prüft das Mitarbeiterobjekt, ob die geforderte Maschine bereits belegt wurde oder es zulässig ist, eine weitere Maschine im Laufe der Schicht zu bedienen. Dieser Parameter „Schichtwechsel“ begrenzt die Anzahl der Wechsel zwischen verschiedenen Arbeitsplätzen.

Wenn eine Maschine über keine qualifizierten Mitarbeiter verfügt (d.h. die Qualifikationsmatrix keinen Eintrag enthält), entfällt die Prüfung auf den Personalbedarf. Stattdessen enthält die Belegung einen entsprechenden Hinweis auf reine Maschinenzeit. Dies ist beispielsweise bei Öfen oder ähnlichen Anlagen der Fall, die auch ohne Mitarbeiter am Wochenende arbeiten.

Die Personalzeit kann sich von der Maschinenzeit unterscheiden. Im Falle von Mehrmaschinenbedienung kann beispielsweise angegeben werden, dass Mitarbeiter für die gesamte Rüstzeit, aber nur einen prozentualen Anteil der Bearbeitungszeit (zur Kontrolle und Überwachung) benötigt werden. Wenn der Personalzeitanteil aufgebraucht wurde, entfällt ebenfalls die Prüfung auf den Mitarbeiter. Ähnliches gilt für Maschinenausfälle, die als Arbeitsgänge mit sehr hoher Priorität, einem frühesten Start- und einer Bearbeitungsdauer modelliert werden. Auch diese benötigen keine Mitarbeiter für die Einplanung. Diese Modellierung erlaubt es im Prinzip auch Wartungsarbeiten vom System an geeigneten Zeitpunkten einplanen zu lassen.

7.3 Durchlaufterminierung

Vor dem Beginn des eigentlichen Planungslaufes erfolgt eine vorbereitende Durchlaufterminierung. Darin werden für jeden Arbeitsgang Ecktermine festgelegt. Diese wurden bereits in 6.3 definiert, in diesem Abschnitt wird die Berechnung diskutiert. In Kapitel 6.4.1 wurde dargelegt, wie Auftragsnetze erstellt wurden.

Nach diesen Vorüberlegungen ist es verhältnismäßig einfach, für jedes Material eine Dispositionsstufe festzulegen. Dazu werden alle Materialobjekte in eine Liste eingefügt, ihre Dispositionsstufe wird auf 0 gesetzt. Danach werden diese Objekte und ihre Bedarfe (Lagerabgänge) mehrfach durchlaufen. Dabei wird die Dispostufe auf die Dispositionsstufe des Bedarfs + 1 gesetzt sofern die aktuelle Stufe kleiner ist. Auf diese Weise können die Materialien und ihre Aufträge nach der Dispositionsstufe sortiert werden. Durch die Definition der Dispositionsstufen wird sichergestellt, dass auf der Stufe N alle Bedarfe der Stufen N-1 bereits behandelt wurden. Dies entspricht dem Vorgehen eines MRP.

Somit ist es jetzt ein Leichtes eine Breitensuche über alle Aufträge durchzuführen. Dazu werden für jede Dispositionsstufe alle Bedarfsdecker betrachtet, die vorherige Sortierung sorgt dafür, dass alle relevanten Informationen beachtet werden. Die Wunschliefer- und Zusagetermine von der Kundenauftragsebene werden ebenso wie die Umsätze der entsprechenden Aufträge auf die Komponenten und ihre Vorgänge weitergereicht.

Für die Berechnung des letztmöglichen Termins werden dabei nur die Bearbeitungs- und feste Übergangszeit (DLZFIXED) eingeplant, d.h. implizit wird angenommen, dass es keine kapazitiv bedingten Liegezeiten gibt. Im Falle von Wunschliefersdatum und Zusage dagegen wird die Standarddurchlaufzeit (DLZSTD) als initiale Schätzung für Kapazitätsengpässe mit berücksichtigt. Alle berechneten Ecktermine beziehen sich auf den Start eines Vorgangs. Im Laufe der weiteren Planung kann somit ein-

fach festgestellt werden, ob ein Vorgang vor- oder nach einem gewissen Ecktermin gestartet wurde. Dies dient der Ermittlung von Rückständen.

Weiterhin werden in der Rückwärtsterminierung auch ein sogenannter Zuschlag und der Umsatz auf nachgeordnete Planungsebenen überwält. Dieser Zuschlag ist eine Prioritätskennzahl, die für Kundenaufträge normalerweise 10 beträgt, jedoch individuell vom Fertigungssteuerer angepasst werden kann.

Wenn ein Auftrag mehrere Bedarfe hat, werden die frühesten WLD, ZUS sowie der maximale Zuschlag für die weitere Berechnung verwendet. Auf diese Weise bestimmen die dringendsten Aufträge die Ecktermine sowie den Zuschlag.

Spiegelbildlich kann von der untersten zur obersten Dispositionsstufe eine Vorwärtsterminierung ausgeführt werden. In diesem Falle wird der früheste mögliche Termin unter Berücksichtigung von DLZFIXED und Bearbeitungszeit pro Vorgang berechnet.

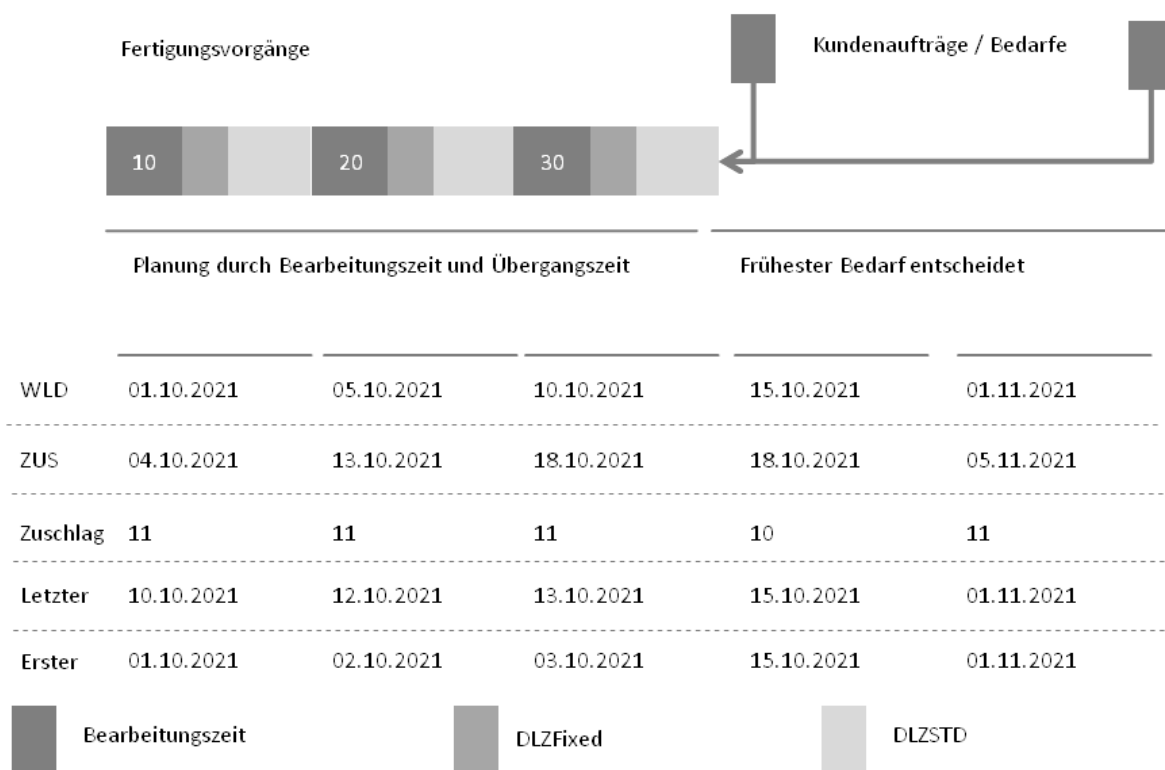


Abbildung 25: Durchlaufterminierung

Abbildung 25 zeigt ein Beispiel für eine solche Terminierung. Ein Fertigungsauftrag mit den Vorgängen 10, 20 und 30 bedient zwei verschiedene Kundenaufträge. Von diesen wird das früheste Wunschlieferdatum (15.10.2021) und Zusagedatum (18.10.2021) sowie der maximale Zuschlag (11) auf den Fertigungsauftrag übernommen. Von dort werden diese Daten rückwärts weiter berechnet über die Kombination aus Bearbeitungs-, fester Übergangszeit (DLZFixed) und angenommener Übergangszeit (DLZSTD).

Die Berechnung des letztmöglichen Termins erfolgt im gleichen Prinzip, verwendet allerdings nur die unbedingt nötigen Zeiten aus Bearbeitungs- und fester Übergangszeit, der erstmögliche Termin wird analog, jedoch vom heutigen Datum an in die Zukunft gerechnet.

7.3.1 Besonderheiten der Durchlaufterminierung

Übergangszeiten und Fertigungsbearbeitungszeiten (sowohl DLZSTD, DLZESOP als auch DLZFIXED, aber nicht die Bestelldauern von Einkaufsteilen) werden durch Feiertage und Betriebsruhen verlängert. Eine entsprechende Methode berechnet von einem Startdatum ausgehend ein Enddatum und ignoriert dabei Tage, die als Feiertag/Betriebsruhe oder Wochenende gekennzeichnet sind.

Weiterhin gibt es sogenannte Mehrfachspannungen. In vielen Fällen ist es technologisch notwendig, ein Teil auf der gesamten Länge zu bearbeiten. Die Spannvorrichtung verhindert jedoch, dass dies in einem Arbeitsgang geschieht. In den Daten der Schnittstelle gibt es zahlreiche Mehrfachspannungen, in denen zwei (oder mehr) aufeinander folgende Arbeitsgänge die gleiche Maschine benutzen. In diesem Falle entfallen sämtliche Übergangszeiten. Sobald ein Arbeitsgang begonnen wurde, werden weitere Arbeitsgänge am gleichen Arbeitsplatz genauso behandelt, als wenn sie selber bereits gestartet werden, da der Rüstzustand der Maschine sich in der Regel nicht verändert und es unerwünscht ist, andere Aufträge dazwischen zu fertigen.

7.4 Berechnung der Vorgangsprioritäten

Die Priorität eines Vorganges wird aus den Eckterminen abgeleitet und dient dazu, die Warteschlange der Vorgänge, die zur Bearbeitung zur Verfügung stehen, zu sortieren. Dazu wird an jedem simulierten Tag die Warteschlange neu bewertet und sortiert. Im gesamten System werden alle Termine als Zahl repräsentiert. Diese Zahl beschreibt die Anzahl der Minuten, die seit dem 01.06.2014 verstrichen sind.

Als Bewertungskriterium wird zunächst die Differenz aus dem Wunschlieferdatum und dem Simulationszeitpunkt verwendet. Wenn diese Differenz kleiner als Null ist, ist das Wunschlieferdatum überschritten.

Wenn der Simulationszeitpunkt nach dem Zusagedatum liegt, wird stattdessen die Differenz aus der jetzigen Uhrzeit und dem Zusagedatum verwendet. Von dieser Differenz wird der Zuschlag in Jahren abgezogen, d.h. konkret $365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot \text{Zuschlag}$ Minuten.

Wenn darüber hinaus auch der letzte Termin überschritten wurde, wird in gleicher Weise die Priorität berechnet, allerdings wird der Zuschlag noch einmal erhöht.

Diese Prioritätsregel orientiert sich erkennbar an dem Earliest-Due-Date-Verfahren aus der Literatur. Daneben wurde noch eine Form in Anlehnung an Critical Ratio entwickelt. Dazu wird der Rückstand (Simulationszeitpunkt – Ecktermin) durch die Anzahl der verbleibenden Vorgänge bis zum terminbestimmenden Kundenauftrag ge-

teilt. In Voruntersuchungen ergab sich keine klare Präferenz, so dass alle Verfahren in der Validierung mit der oben beschriebenen EDD-Variante ausgeführt werden.

Die Trennung in verschiedene Prioritätsklassen ermöglicht eine Trennung von Wichtigkeit und Dringlichkeit der Aufträge. Die Fertigungssteuerung kann über den Zuschlag Aufträge als besonders wichtig markieren. Diese Steuerung kommt aber nur dann zum Einsatz, wenn die Gefahr einer Terminverschiebung real wird (gemessen am Überschreiten der vorgangsinternen Zusage). Somit können dringendere, aber weniger wichtige Aufträge trotzdem frühzeitig eingeplant werden.

7.5 Personoptimierung

Durch das Feld „Reihenfolge“ in der Qualifikationsmatrix kann für jede Maschine eine Reihenfolge der Mitarbeiter angegeben werden. Auf Grund des Algorithmus wird standardmäßig der erste Mitarbeiter zuerst verplant. Auf diese Weise kann die Wunschbelegung der Maschinenbediener berücksichtigt werden.

Allerdings kann es – gerade bei ungeschickter Reihenfolgewahl – dazu kommen, dass die Auslastung suboptimal wird. Dies ist dann der Fall, wenn ein Maschinenbediener mit vielseitiger Qualifikation zuerst eingeplant wird und ein Kollege, der nur wenige Maschinen bedienen kann alle seine Arbeitsplätze belegt vorfindet.

Die erste Schlussfolgerung besteht darin, dass Mitarbeiter mit wenigen Qualifikationen zuerst verplant werden sollten. Dies lässt sich durch entsprechende Angaben in der pers_qualimatrix erreichen.

Person \ Maschine				
	M1	M2	M3	M4
Meier			?	
Schulze	?	✓		
Schmidt		?	✓	
Müller	✓			?

Abbildung 26: Qualifikationsmatrix

Abbildung 26 wiederholt die Abbildung einer Qualifikationsmatrix aus Kapitel 2.2.3. Alle Maschinen verfügen über anmeldbare Aufträge. Unmittelbar nach Beginn ihrer Schicht stehen alle vier Mitarbeiter zur Verfügung. Wenn nunmehr Schulze als Stammmitarbeiter für M2, Schmidt für M3 und Müller für M1 eingetragen wurde und der dringendste Auftrag in der gesamten Warteschlange M3 benötigt, ergibt sich eine Belegung entsprechend der Abbildung. Zuerst werden Schulze, Schmidt und Müller eingeplant. Da M2 und M3 bereits belegt sind, kann Meier nicht mehr ausgelastet werden.

Um dies zu verhindern, gibt es mehrere Möglichkeiten: Erstens kann die Belegungsreihenfolge manuell verändert werden. Das erfordert jedoch Vorwissen über den aktuellen und zukünftigen Kapazitätsbedarf an den Maschinen und ist damit für die Fertigungssteuerung schwer umzusetzen. Alternativ könnten einige Mitarbeiter auf eine (teurere) Schicht wechseln, bei der das System die beschriebene Konkurrenzsituation nicht vorfindet. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn einige Maschinen sehr viele Aufträge in ihrer Warteschlange haben und von einem mehrschichten Betrieb profitieren würden, während andere Maschinen über keine Arbeit verfügen.

Deshalb kann ein weiterer Parameter global gesetzt werden. Der Terminierungsparameter „schichtErweiterung“ führt dazu, dass nach Ablauf einer gewissen Anzahl von Tagen alle Schichten auf 24 Stunden erweitert werden, aber ihre Kapazität behalten. In diesem Fall kann das System die Mitarbeiter zu verschiedenen Zeiten disponieren und somit die Auslastung erhöhen. Die Restriktion der Anwesenheit wird aufgeweicht und ein Schichtwechsel vorweg genommen. Dieser Ansatz erspart es dem Systembenutzer die Schichten für die weitere Zukunft genau zu planen, erfordert jedoch, dass in der näheren Zukunft aktiv diese Schichtwechsel auch diskutiert und umgesetzt werden.

Um den skizzierten Fall jedoch automatisch zu lösen, wurde zusätzlich ein weiterer Algorithmus implementiert. Als Voraussetzung wird für jede Maschine die Länge der Warteschlange in Vorgabeminuten ermittelt. Dies erfolgt indem das Einfügen in die Warteschlange den Wert erhöht und ein Abgang diesen reduziert. Unmittelbar nach dem Beginn einer neuen Schicht und der Anmeldung der Aufträge (mit dem Ergebnis aus der Abbildung) prüft das System für die nicht verplanten Mitarbeiter (hier Meier) die möglichen Arbeitsplätze. Falls diese über Aufträge in der Warteschlange verfügen, aber bereits belegt sind, wird rekursiv für die aktuellen Konkurrenten (Mitarbeiter) der Algorithmus aufgerufen. Dazu gehört die Belegung Schulze/M2. Auch hier werden Alternativen geprüft (Müller/M1). Sobald eine Verbesserung (hier Müller/M4) gefunden wird, wird ein Ringtausch eingeleitet und die Belegung wechselt zu Meier/M2, Schulze/M1 und Müller/M4. Somit wird zumindest am Schichtbeginn eine optimale Belegung sichergestellt. Weil die Aufträge in der Regel nicht gleichzeitig fertig werden wird dieser Ringtausch auch für weitere Aufträge in der Schicht beibehalten.

7.6 Auftragsfreigabe

Das beschriebene Verfahren ist bislang eine reine Vorwärtsplanung. Dies führt dazu, dass Aufträge sobald wie möglich in die Produktion gegeben werden und damit der WIP prinzipiell nicht begrenzt wird. Dies wiederum führt zu langen Liegezeiten, fehlenden Lagerflächen und ist somit unerwünscht.

Verfahren wie CONWIP, BOA oder Ähnliche begrenzen den Auftragsbestand direkt über die Anzahl der Aufträge in der Produktion. Sie beschränken jedoch nicht die vorzeitige Produktion von Komponenten. Verfahren wie MRP rechnen mit festen Durchlaufzeiten und berücksichtigen die Auslastung der Produktion nicht. Deshalb enthält das System ein Verfahren zur Auftragsfreigabe, welches a) Kapazitätsengpässe und lange Liegezeiten in der Produktion vermeidet und b) die Verweildauer im Lager beschränkt.

7.6.1 Generelle Prinzipien der Auftragsfreigabe

Sobald ein Auftrag in die Produktion freigegeben wird, sollte er so schnell wie möglich bearbeitet werden um die (nicht direkt verplanten) Produktionsressourcen wie Transportmittel, Gebinde und nicht zuletzt Lagerflächen freizugeben und Probleme wie Korrosion und Ähnliches auf Grund langer Liegezeiten zu vermeiden.

Andererseits sollte gerade in einer Werkstattfertigung immer genügend Material in der Produktion vorhanden sein um Materialabrisse zu vermeiden, die Auslastung sicherzustellen und nicht zuletzt Störungen an Aufträgen zu kompensieren.

Aus diesem Grund wirkt die Auftragsfreigabe nur auf den ersten Arbeitsgang von Fertigungsaufträgen. Dieser spezielle Druck-Arbeitsgang wurde in der Schnittstelle zu jedem Fertigungsauftrag eingefügt und wird über eine Sonderlogik geplant. Sobald der Auftrag in der Schnittstelle den Status „EROF“ oder „DRUC“ (eröffnet/gedruckt) erhält wird dieser Vorgang als „FERTIG“ markiert und behandelt. Das bedeutet, dass eine Freigabe im ERP die Planungslogik außer Kraft setzt, umgekehrt richtet sich dieser Freigabeschritt aber in der Regel nach den Terminen deren Ermittlung im Folgenden beschrieben wird.

7.6.2 Auftragsfreigabe auf Basis des WLD

In der Rückwärtsterminierung wurden Ecktermine auf Basis von Wunschlieferdatum des Kunden und einer Standarddurchlaufzeit (DLZSTD) festgelegt. Daneben wurde in der gleichen Logik auch ein Freigabetermin TESOP („Time: Earliest-Start-of-Production“) festgelegt. Der Unterschied in der Berechnung besteht nur aus der Verwendung der DLZESOP, die aber in der Regel genauso eingestellt wird wie DLZSTD. Der Arbeitsgang „Druck“ kann frühestens zu diesem Termin erfolgen, der Auftrag wird also durch eine Durchlauf-Rückwärtsterminierung daran gehindert, extrem frühzeitig gefertigt zu werden.

Diese Auftragsfreigabe verringert den Bestand, gibt aber keine Garantie für die Höhe des WIPs oder der Liegezeiten. Dies liegt daran, dass es unter Umständen sehr viele Aufträge mit frühem Wunschlieferdatum geben kann. Weiterhin kann es dazu führen, dass Aufträge gefertigt werden, aber die Montage beispielsweise noch auf Bestellteile warten muss, so dass auch der Lagerbestand beliebig groß werden kann. Gleichzeitig kann durch eine Veränderung von DLZESOP der WIP in der Produktion verringert oder erhöht werden.

7.6.3 Grundidee der Freigabe auf Basis eines ersten Planungslaufes

Um die oben genannten Probleme zu vermeiden, werden zwei Planungsläufe durchgeführt. Im ersten Planungslauf werden Aufträge nach Erreichen des ESOPWLD freigegeben. Die Planungsergebnisse dieser ersten Berechnung dienen als Grundlage für die eigentliche Auftragsfreigabe.

Für jeden Arbeitsgang kann eine Durchlaufzeit ermittelt werden. Wenn davon die betriebsnotwendigen Übergangs- und Bearbeitungszeiten abgezogen werden, ergeben sich Liegezeiten. Das System definiert mit DLZESOP pro Arbeitsplatz einen akzeptablen Wert für diese Zeitanteile. Darüber hinausgehende Liegezeiten werden als unerwünschte Liegezeit berechnet. Die Idee hinter dem Verfahren besteht darin, die kumulierte unerwünschte Liegezeit ULZ für jeden Zweig im Auftragsnetz zu bestimmen und die Auftragsfreigabe von Komponenten entsprechend zu verzögern. Durch die spätere Auftragsfreigabe wird der WIP begrenzt und damit die Durchlaufzeit verkürzt. Das Verfahren zielt darauf ab, dass sich die spätere Freigabe und kürzere Durchlaufzeit aufheben und somit bei geringeren Kosten die gleiche Leistung erzielt wird.

Dabei muss klargestellt werden, dass dieses Szenario nicht so eintreten muss. Wenn beispielsweise ein Auftrag im Mai schnell bearbeitet wird, aber ein Mitarbeiter in der Qualitätssicherung Ende Juni Urlaub hat, führt die verspätete Freigabe zur Nichteinhaltung von Lieferterminen. Es handelt sich um eine Heuristik, die in der Regel gute Ergebnisse erzielt und zur Absicherung von solchen Fällen aber einen hinreichenden Puffer einplanen sollte, d.h. ein entsprechend groß gewähltes DLZESOP.

7.6.4 Berechnung der ULZ in einem Auftrag

Die Arbeitsgänge eines Auftrages werden analog zur Durchlaufterminierung rückwärts durchlaufen.

Für jeden Arbeitsgang kann die Liegezeit berechnet werden, indem die Arbeitstage zwischen dem Bereitstellungs- und dem Enddatum (incl. Übergangszeit) berechnet wird. Davon muss die Übergangszeit und Bearbeitungszeit abgezogen werden um den potentiell unerwünschten Liegezeitanteil zu ermitteln:

$$LZ_{\text{kap}} = \text{nettodauer}(\text{Bereit}, \text{Ende}) - \text{DLZFixed} - \text{Bearbeitungszeit}$$

Diese Liegezeit kann nie negativ sein. Wenn beispielsweise ein Arbeitsplatz im 1-Schicht-Betrieb arbeitet, würde eine Verschiebung später nicht mehr aufgeholt werden können, da die Nettodauer auf einer 24-Stunden-Verfügbarkeit abzielt. Deshalb und als Puffer wird diese Zeit um eine akzeptable Liegezeit DLZESOP des Arbeitsplatzes verringert. Der bestehende Wert darf jedoch nicht negativ werden.

$$ULZ = \text{MAX}(0, LZ_{\text{Kapa}} - DLZESOP)$$

Dieser Ablauf wird für jeden Arbeitsgang durchgeführt. Die Einzelwerte werden summiert zu einer kumulierten ULZ. Die Auftragsfreigabe wird um diesen Wert verzögert, das heißt dass der Freigabetermin nicht vor der Summe aus bisherigem Freigabetermin und kumulierter ULZ liegt.

7.6.5 Berechnung der ULZ in einem Auftragsnetz

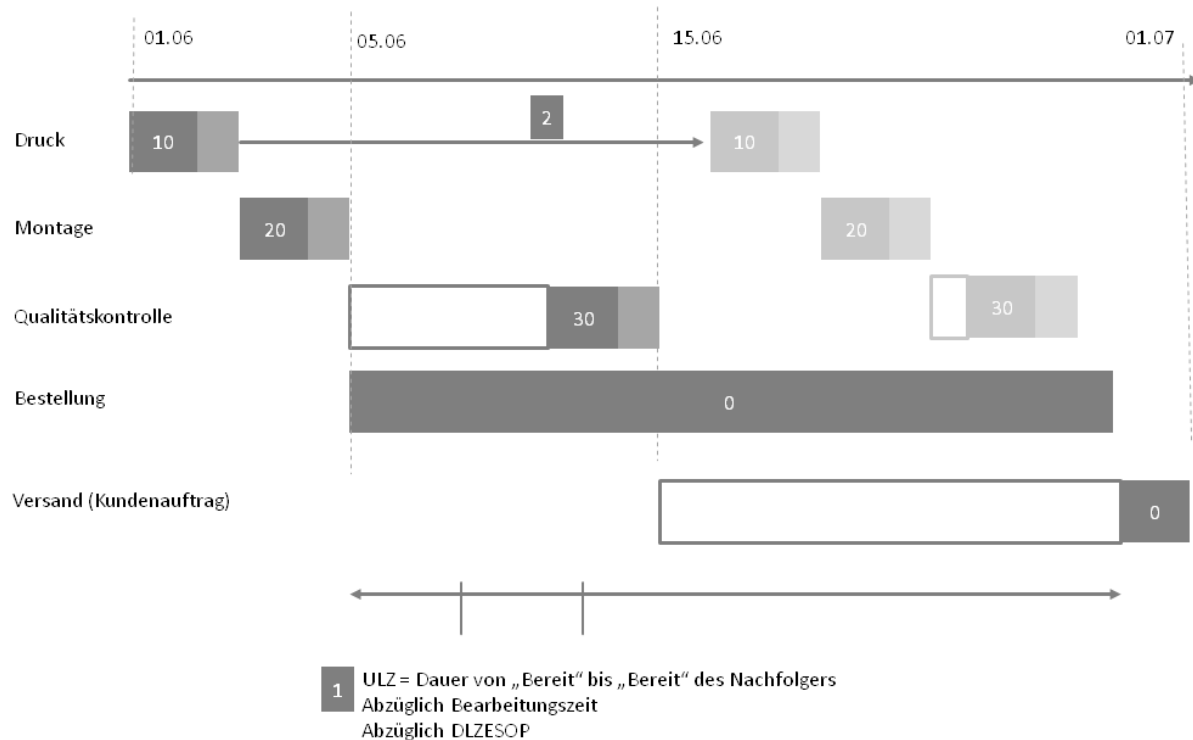


Abbildung 27: Neue Auftragsfreigabe in einem Auftragsnetz

Abbildung 27 zeigt ein beispielhaftes Auftragsnetz. In der ersten Planung wurden die Arbeitsgänge 10 (Druck) und 20 (Montage) schnell ausgeführt, auf Grund eines Kapazitätsengpasses kam es vor der Qualitätskontrolle zu einer längeren Liegezeit, der Kundenauftrag konnte erst am 01.Juli ausgeliefert werden, da er neben dem Montageauftrag noch auf eine zusätzliche Bestellung wartet, die erst am 30.Juni eintrifft.

Die ULZ für den Vorgang für den Vorgang 30 berechnet sich wie folgt (1):

- Bestimme den frühesten Starttermin eines Bedarfes. In diesem Beispiel handelt es sich um den Kundenauftrag mit dem Startdatum 1.Juli.
- Der Vorgang in der Qualitätskontrolle wird am 05.06 bereit, somit liegen 20 Kalender bzw. 14 Werktagen zwischen dem 05.06 und dem 01.07.

- Von diesen 14 Werktagen wird die Bearbeitungszeit abgezogen, es resultieren 13 Tage.
- Diese 13 Tage werden um die DLZESOP von 5 Tagen des Qualitätsarbeitsplatzes reduziert. Damit ergibt sich eine Verschiebung um $13 - 5 = 9$ Werktagen.
- Die übrigen Arbeitsgänge (10 und 20) haben eine geringere kapazitive Liegezeit als DLZESOP, damit bleibt die kumulierte, unerwünschte Liegezeit bei 9 Tagen, im zweiten Durchlauf wird der Druck 9 Tage nach dem ursprünglichen Termin freigegeben (2).
- Der zweite Simulationslauf verkürzt damit die Durchlaufzeit und hält (in vielen Fällen) trotzdem den ursprünglichen Liefertermin ein, da Liegezeiten in Belastungsverschiebungen umgewandelt werden.

Wenn statt des Kundenauftrages ein Montageauftrag beliefert wird, wird dessen ULZ mit auf den Auftrag übernommen, somit wird über alle Dispositionsstufen der Fertigungsauftrag in die Zukunft verschoben.

7.6.6 Diskussion des Verfahrens

Das Verfahren wird maßgeblich durch die Höhe von DLZESOP gesteuert. Dieser kann als eine Soll-Liegezeit interpretiert werden, denn die Auftragsfreigabe verschiebt den Auftragsstart um die überflüssigen Zeitanteile. Das Verfahren begrenzt sowohl den Bestand im Lager als auch in der Produktion und gibt mit seinen Parametern im Idealfall direkt die für die Produktion wesentliche Zielgröße – die Durchlaufzeit – an.

Allerdings handelt es sich um eine Heuristik. So kann eine spätere Freigabe dazu führen, dass Arbeitsplätze, die im ersten Durchlauf schnell durchlaufen wurden im zweiten Durchlauf zu Engpässen werden. Dies ist insbesondere der Fall, wenn Mitarbeiter Urlaub haben (ein Auftrag, der vor Weihnachten in wenigen Tagen bearbeitet wurde, muss jetzt auf Grund der Urlaubszeit bis in das neue Jahr warten) oder mit anderen Aufträgen konkurrieren, die zu einem früheren Zeitpunkt noch gar nicht verfügbar waren (zum Beispiel weil sie auf Bestellteile warten). Der erste dieser Fälle wird zumindest entschärft da bei den Berechnungen der Übergangszeiten Wochenenden und Betriebsruhen herausgerechnet werden, jedoch nicht individuelle Urlaube von Mitarbeitern.

Andererseits werden durch die spätere Fertigung des Auftrages Kapazitäten frei, die für andere Aufträge zur Verfügung stehen. Damit erhöht sich die Leistung des Systems insgesamt während die Bestände in der Produktion und im Lager sinken. Im Kapitel Validierung werden die Effekte gegenübergestellt.

Auswirkung auf die Auslastung

Die spätere Auftragsfreigabe kann dazu führen, dass Arbeitsplätze nicht mit ausreichend Material versorgt werden. Dies ist ein Problem von jeder Art von Bestandsmi-

nimierung. Wenn zunächst nur der kapazitive Anteil der Verzögerung betrachtet wird, regelt das System diesen jedoch von alleine aus. Wenn keine Engpässe im System vorhanden sind, gibt es auch keine Liegezeiten, die den Schwellwert überschreiten. Damit wird die Auftragsfreigabe auch nicht verzögert und das System der Auftragsfreigabe kommt nicht zum Zuge.

Allerdings kann diese Art der Auftragsfreigabe dazu führen, dass bestimmte Ressourcen nicht ausreichend eingeplant werden. Im Pilotprojekt starten viele Aufträge im Drehen (Startbereich) und werden am Ende noch einmal verzahnt (Engpassbereich). Die oben genannte Strategie führte dazu, dass Aufträge nicht in die Produktion freigegeben wurden, obwohl Material, Personal und Maschinenkapazität im Drehbereich verfügbar war.

In erster Linie weist dieser Effekt auf nicht ausgeglichene Kapazitäten hin. Es sollte also zunächst versucht werden, die Kapazität der Engpassbereiche zu erhöhen (zum Beispiel durch das Verschieben von Personal). Dies ist auf Grund der Qualifikation jedoch nicht immer möglich. Einerseits entstehen durch eine frühere Fertigung in diesem Falle keine echten Kosten und es wird ein Puffer geschaffen für unvorhergesehene Störungen. Echte Kosten entstehen in diesem Falle deshalb nicht, weil die Rohmaterialien und die Mitarbeiter kurzfristig sowieso bezahlt und vorhanden sind.

Deshalb wurden die Vorgriffszeiten erhöht und Aufträge früher freigegeben als eigentlich geplant. Damit wurde zwar für eine begrenzte Zeit die Auslastung sichergestellt, aber wie theoretisch zu erwarten gab es kaum Verbesserungen in den Kundenterminen und nach kurzer Zeit waren so viele Aufträge in der Fertigung, dass ganz neue Probleme wie Korrosion auf Grund von langen Durchlaufzeiten auftraten.

Auswirkungen von fehlerhaften Daten und Lösungsansätze

Der verwendete Algorithmus führt dazu, dass alle Komponenten in einem konvergierenden Auftragsnetz annähernd gleichzeitig fertig werden. Damit orientieren sich alle Bedarfsdecker an dem spätesten Zugang. In einem umfangreichen Produktionsprogramm sind jedoch immer zahlreiche Missstände in den Daten vorhanden.

Am besten lässt sich dies an einem Beispiel aus der Praxis verdeutlichen: Der Pilotkunde fertigt komplexe Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus. In der Montage werden ca. 20-100 Komponenten benötigt. Teilweise handelt es sich um Bestellteile mit sehr geringem Wert, teilweise um Sonderbestellteile und teilweise um eigengefertigte Komponenten. Von diesen werden einige aus dem Lager entnommen, während andere auftragsspezifisch gefertigt werden.

Im konkreten Falle wurden ca. 10 Fertigungsaufträge mit mehreren Tausend Fertigungsminuten zurückgehalten, weil ein Typschild im Wert von einigen Eurocent zu spät bestellt worden war. Als der Fehler nach einigen Wochen auffiel, konnte das Typschild sehr schnell beschafft werden. Die gesamte Fertigung war zu diesem Zeitpunkt aber schon extrem rückständig da die zugehörigen Fertigungsaufträge mehrere Wochen lang nicht gestartet wurden.

Akademisch ist es sicherlich richtig zu verlangen, dass die Ursachen solcher Probleme bekämpft und im konkreten Falle das Typschild bereits am nächsten Tag neu bestellt wird. Aus Systemsicht ist es schließlich egal, ob ein eigengefertigtes Sondermaschinenelement oder ein Typschild für 0,5€ fehlt – das Produkt kann nicht gefertigt werden.

Andererseits ist es bei sehr vielen Aufträgen und der Komplexität fast unmöglich, eine vollständige Datenqualität sicherzustellen. Außerdem ist es in der betrieblichen Praxis sehr schwer das Management davon zu überzeugen, dass die (schwer zu beurteilenden) Vorteile einer späteren Fertigung und niedriger Bestände den prominenten Einzelfall aufwiegen.

Lösungsansatz

Kapitel 7.3 erläutert die Durchlaufterminierung vor Beginn der eigentlichen Simulation. Darin wurde auch ein erster (ohne Rücksicht auf Kapazitäten) möglicher Termin für jeden Arbeitsgang festgelegt. In der gleichen Logik wird ein weiterer Termin „ersterOptimistisch“ berechnet. Der Unterschied in der Berechnung dieser Termine besteht darin, dass Einkaufsteile ein früheres optimistisches Datum melden. Dies kann auf Basis der hinterlegten Wiederbeschaffungszeit oder eines prozentualen Abschlages geschehen. Eine andere Möglichkeit wäre es auch, zu prüfen, in wie weit Material von anderen Aufträgen zweckentfremdet werden kann.

Bei der Rückwärtsplanung durch die Auftragsfreigabe wird in der Berechnung des Bedarfsdatums ein Abschlag für die optimistische Lieferung einberechnet.

$$\text{Bedarf} = \text{Bereit} + \text{ULZ} - (\text{erster} - \text{erster}_{\text{optimistisch}})$$

Auf diese Weise werden Komponenten frühzeitig gefertigt wenn die Chance besteht, die Montage rechtzeitig zu beginnen. Wenn die fragliche Komponente selber jedoch die Ursache des Problems ist, wird sie weiterhin spät freigegeben.

Während diese Lösung einerseits den Lagerbestand erhöht, reduziert sie doch das Risiko einer zu späten Auftragsfreigabe.

7.7 Dynamische Übergangszeiten

Bislang wurde zum Zwecke der Übersicht von festen Übergangszeiten (DLZFIXED) am Ende eines Vorganges gesprochen. Es gibt noch einen weiteren Maschinenparameter DLZCONDITIONAL. Dieser streckt oder verkürzt die Übergangszeit um Störungen zu kompensieren.

Zunächst wird bei der Initialisierung aus der Datenbank der zuletzt geplante Endtermin (TENDE) ermittelt. Wenn der Vorgang erstmals eingeplant wird, wird die Übergangszeit erweitert:

$$\text{TENDE} = \text{TPLAN} + \text{DLZFIXED} + \text{DLZCONDITIONAL}$$

Wenn der Vorgang dagegen bereits eingeplant war, wird *DLZCONDITIONAL* im Intervall $[0, 2 \times DLZCONDITIONAL]$ verändert, so dass sich möglichst der ursprüngliche Endtermin ergibt. Wenn der Vorgang also später fertig wird als in der Erstterminierung, wird *DLZCONDITIONAL* verringert, andernfalls erhöht.

7.8 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden zunächst die Grundlagen der Planung vorgestellt. Diese besteht im Wesentlichen aus einer standardmäßigen ereignisdiskreten Simulation. Um erfolgreich im Umfeld einer mehrstufigen Einzel- und Kleinserienproduktion eingesetzt zu werden, wurde diese jedoch erweitert. Dies beinhaltet

- Ein neuartiges Verfahren zur Priorisierung von Aufträgen. Dieses trennt Dringlichkeit (Wunsch- / Zusagetermin) und Wichtigkeit (Zuschlag)
- Eine Optimierung der Personalzuordnung, die Nachteile von Prioritätsregeln vermeidet
- Eine neue Auftragsfreigabe, welche verschiedene Komponenten zu einem Montageprozess koordiniert und neben dem WIP auch den Lagerbestand begrenzt
- Ein Dämpfungsmechanismus, der Produktionsabweichungen durch variable Übergangszeiten ausregelt

Diese Neuerungen wurden ergänzt um ein System, welches aus ERP-Daten selbstständig ein Simulationsmodell der Produktion aufbaut. Im Gegensatz zu Softwarepaketen wie Plant Simulation oder Arena verzichtet es auf eine 3D-Darstellung der Produktion, verringert aber den Modellierungsaufwand außerordentlich.

8 Verifikation und Validierung

In diesem Kapitel werden folgende Effekte systematisch untersucht:

- Welchen Einfluss hat das Niveau der Produktionsabweichungen?
- Welchen Einfluss hat der Algorithmus auf Leistung und Planungsstabilität?
- Welchen Einfluss haben die Planungsannahmen, insbesondere eingeplante Zeit- und Kapazitätspuffer, auf die geplanten Termine und deren Verlässlichkeit?

Im ersten Teil des Kapitels wird der Versuchsaufbau beschrieben. Im zweiten Teil wird das Verhalten der Verfahren an Hand von Einzelbeispielen diskutiert um die Ursachen von Terminabweichungen und suboptimalen Planungsergebnissen aufzudecken. Danach werden die Algorithmen und ihre Parameter quantitativ hinsichtlich der oben beschriebenen Fragestellungen verglichen. In den letzten Abschnitten werden die Ergebnisse mit den praktischen Einsatzerfahrungen abgeglichen und ein Zwischenfazit gezogen.

8.1 Versuchsaufbau

Die Implementierung der ereignisdiskreten Simulation wurde im vorigen Hauptkapitel vorgestellt. Die ersten beiden Teile dieses Unterkapitels beschreiben die Umsetzung des Referenzalgorithmus auf Basis eines Job-Based-Sequencing und dessen Varianten. Die letzten beiden Abschnitte beschreiben die Daten der Versuche und die Simulation von Abweichungen.

Insgesamt werden folgende Algorithmen untersucht:

- EDS-E – Ereignisdiskrete Simulation mit Auftragsfreigabe auf Basis des Wunschlieferdatums
- EDS-A – Ereignisdiskrete Simulation mit dem neuen, kapazitierten Auftragsfreigabeverfahren und der Personaloptimierung
- JBS-E – Job-Based-Sequencing ohne Optimierungen
- JBS-O – Job-Based-Sequencing mit Optimierungen
- JBS-B – Job-Based-Sequencing mit Optimierungen und bedarfsorientierter Einplanung

Diese Algorithmen planen jeweils das Produktionsprogramm der Maschinenbau AG vom 28. Mai 2019. Um Produktionsabweichungen zu simulieren, werden die Lieferzeiten von Bestellteilen, das Kapazitätsangebot an Arbeitsplätzen und die Auftragsreihenfolge zufällig variiert. Die Implementierungen der JBS-Verfahren werden im Folgenden beschrieben.

8.1.1 Referenzimplementierung JBS

Die Implementierung der EDS wurde im vorigen Kapitel ausführlich diskutiert. Als Vergleich wurde ein Job-Based-Sequencing (JBS) implementiert. Eine grundsätzliche Einführung findet sich in Kapitel 3.1.5.

Grundsätzliche Logik

Wie eingangs beschrieben wird die Struktur der Auftragsnetze übernommen und ist identisch zu denen, die in der EDS verwendet werden. Somit verfügt jeder Primärbedarf über eine Baumstruktur von Arbeitsgängen. Zunächst wird eine Liste von Aufträgen erzeugt, welche keine weiteren Nachfolger haben. Diese Liste von Primärbedarfen wird nach ihrem Erfassungsdatum sortiert.

Jetzt werden sequentiell alle diese Aufträge mit ihren abhängigen Bedarfen eingeplant. Die zugrundeliegende Logik besteht darin, dass bereits zugesagte, alte Aufträge sich zuerst an der Kapazität bedienen können und darin nicht von Neuzugängen (die erst danach eingeplant werden) gestört werden. Diese Einplanungsreihenfolge ändert sich auch bei neu eintreffenden Kundenaufträgen nicht. Solange es keine Änderungen am Kundenwunsch oder Produktionsabweichungen gibt, werden die Aufträge also die gleiche Kapazitätssituation wie bei der Erstplanung vorfinden und demzufolge auch den gleichen, zugesagten Liefertermin erreichen. Der zugehörige Pseudocode findet sich in Algorithmus 2.

Ein solcher Auftrag wird eingeplant in dem die einzelnen Vorgänge zunächst rückwärts vom letzten zum ersten Arbeitsgang verplant werden. Wenn ein Vorgang mehrere abhängige Bedarfsdecker hat, werden diese im Rahmen einer Tiefensuche rekursiv ebenfalls eingeplant. Der Programmcode kann Algorithmus 3 entnommen werden. Wenn ein Auftrag nicht eingeplant werden kann weil die Rückwärtsplanung in die Vergangenheit erfolgen müsste wird die Planung stattdessen auf eine Vorwärtsplanung umgestellt. Das Prinzip ist dabei identisch.

Pseudocode JBS

- 1 Ermittle Liste der Primärbedarfe
 - 2 Sortiere diese Liste nach Erfassungsdatum
 - 3 Für jeden Auftrag in der Primärbedarfsliste
 - 4 Call PlaneAuftrag(auf, auf.getWunschlieferdatum())
-

Algorithmus 2: JBS-Hauptfunktion

Pseudocode PlaneAuftrag (Auftrag auf, Date Termin)

```
1  Wenn der Auftrag bereits eingeplant wurde
2      Return
3  Durchlaufe die Vorgänge vom letzten zum ersten
4      Termin = Termin-Vorgang.getÜbergangszeit()
5      Call PlaneVorgang(Vorgang, Termin, Rückwärts)
6      Termin = Vorgang.getStartTermin()
7      Für alle abhängigen Bedarfe
8          Call PlaneAuftrag(bedarfsAuftrag, Termin)
9          If (bedarfsAuftrag.getEndTermin() > Termin) Then
10              PlaneAuftragVorwärts(auf, SIMULATIONSSTART)
11  Markiere Auftrag als eingeplant
```

Algorithmus 3: JBS-Plane Auftrag rückwärts ein

Pseudocode PlaneAuftragVorwärts(Auftrag auf, Date Termin)

```
1  Durchlaufe alle Vorgänge vom ersten zum letzten
2      Für alle abhängigen Bedarfe
3          Call PlaneAuftrag(bedarfsAuftrag, Termin)
4          If (bedarfsAuftrag.getEndTermin() > Termin)
5              Termin = bedarfsAuftrag.getEndTermin()
6      Call PlaneVorgang (Vorgang, Termin, Vorwärts)
7      Termin = Vorgang.getEndTermin();
```

Algorithmus 4: JBS - Plane Auftrag vorwärts ein**Einplanung eines Arbeitsganges**

Ein Kernaspekt ist die Planung eines einzelnen Arbeitsganges. Die entsprechende Methode wird sowohl in der Vorwärts- als auch Rückwärtsplanung aufgerufen. In beiden Fällen wird der Arbeitsgang durch eine Maschine und eine Vorgabezeit beschrieben. Das Maschinenobjekt wiederum enthält eine Liste von qualifizierten Mitarbeitern. Diese beinhalten eine Liste von Schichten mit dem jeweiligen Start- und Enddatum. Die Herausforderung besteht darin, möglichst nah am geforderten Termin (bei Rückwärtsplanung vor, bei Vorwärtsplanung nach dem geforderten Termin) eine

gleichzeitige Lücke der Belegungen zu finden. Dazu werden zunächst alle möglichen Lücken systematisch erzeugt.

Dies geschieht dadurch, dass im Falle der Maschine die Liste der bisher verplanten Belegungen durchsucht wird. Die Lücken zwischen dem Ende der einen und dem Start der nächsten Belegung werden in eine Liste eingefügt. Im Falle von Mitarbeitern werden die geplanten Schichten durchsucht. Diese beinhalten wiederum eine Liste von bereits eingeplanten Kapazitätsbelegungen. Analog können also auch hier die möglichen Belegungslücken ermittelt und in die Lückenliste eingefügt werden. Die so gefundenen Lücken dürfen natürlich nicht die eigentliche Schichtdauer überschreiten.

Diese Lückenliste enthält jetzt also sowohl Maschinen als auch Personalbelegungslücken. Im Falle der Rückwärtsplanung wird sie invers nach dem Enddatum der Lücken, im Falle der Vorwärtsplanung nach dem Start der Lücken sortiert.

Nun wird die Liste durchlaufen. Dabei speichert eine Variable die Maschinen-, eine andere die Personallücke. Diese werden paarweise miteinander konsolidiert. Dazu werden die jeweils früheren End- und späteren Starttermine der beiden Lücken übernommen und eine Gesamtbelegung erzeugt. Wenn diese zulässig ist, wird sie in eine temporäre Liste aufgenommen. Dieses Vorgehen ermöglicht es, eine Maschinenlücke mit mehreren Mitarbeitern zu belegen. Wenn die gesamte Vorgabezeit auf diese Weise abgebildet werden kann, wird der Vorgang eingeplant. Dazu müssen die gefundenen Belegungen in die Maschinen, Personal und Schichtobjekte einsortiert und deren Restkapazität angepasst werden.

Wenn dagegen eine neue Maschinenlücke gefunden wird bevor die Vorgabezeit abgearbeitet wurde, ist eine Einplanung an dieser Stelle nicht möglich. Die temporäre Belegungsliste wird gelöscht und die Vorgabezeit wieder hergestellt. Im Verlauf der nächsten Maschinenlücke wird jetzt erneut nach einer möglichen Einplanung gesucht.

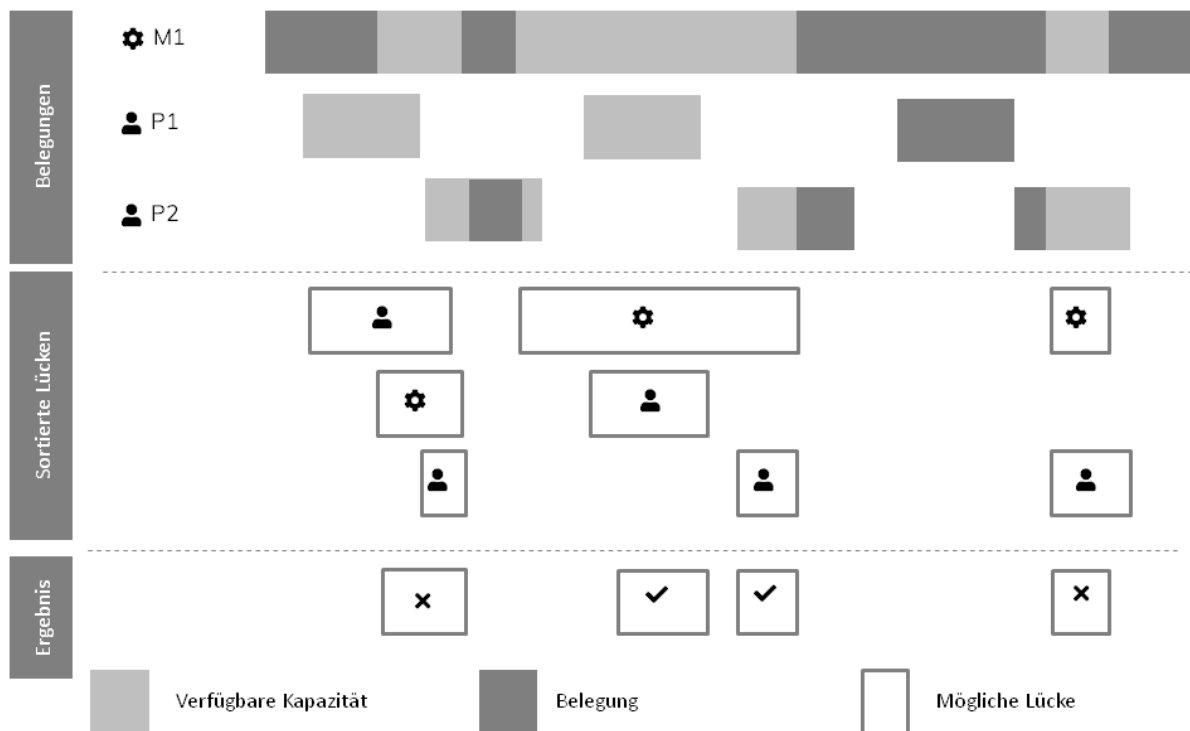


Abbildung 28: Einplanung eines Arbeitsganges

Abbildung 28 zeigt dies an einem Beispiel. Dargestellt sind zunächst die Kapazitäten (Maschinen sind ununterbrochen, Mitarbeiter nur in ihren Schichten verfügbar) sowie bereits eingeplante Belegungen die nicht mehr verändert werden können.

Aus diesen Daten können mögliche Belegungslücken berechnet und nach ihrem Startdatum sortiert werden. Diese werden miteinander abgeglichen. Dabei müssen zu jedem Zeitpunkt eine Maschine und ein Mitarbeiter verfügbar sein. Während ein Wechsel der Mitarbeiter oder eine Unterbrechung (z.B. Wochenenden) auf Mitarbeiterebene zulässig ist, ist dies bei Maschinenlücken nicht der Fall, da der Rüstzustand der Maschine erhalten werden muss. Diese möglichen Lücken werden wiederum mit dem einzuplanenden Arbeitsgang verglichen.

8.1.2 Varianten des Algorithmus

Der vorgestellte Algorithmus JBS implementiert ein industrie-typisches APS. Dennoch gibt es einige naheliegende Optimierungen, die implementiert wurden und im Folgenden unter dem Namen JBS-O („Optimiert“) geführt werden. Die Basisvariante wird im Folgenden mit JBS-E („Einfach“) bezeichnet. Darüber hinaus wird noch eine bedarfsorientierte Einplanung vorgestellt, deren Planung sich auf verspätete Aufträge beschränkt. Diese Verfahrensvarianten werden in den nächsten Abschnitten diskutiert.

Geschwindigkeit der Planung

Offensichtlich wird die Einplanung der einzelnen Arbeitsgänge sehr oft aufgerufen und verursacht damit den Großteil der Laufzeit. In der jetzigen Implementierung werden zuerst alle denkbaren Lücken gesucht, als Objekt erzeugt und in eine Liste eingefügt. Danach werden diese zu neuen Belegungen konsolidiert und in die ursprünglichen Belegungslisten eingefügt. Gerade bei gering ausgelasteten Arbeitsplätzen führt dies dazu, dass teilweise Tausende mögliche Lücken identifiziert werden, sich jedoch schon nach wenigen Schritten eine zulässige Lösung findet. Dies könnte durch ein „Lazy Loading“ wesentlich beschleunigt werden. Dazu würde ein Wrapper um die Maschinen/Mitarbeiter erzeugt werden der erst auf Abruf die nächste mögliche Lücke liefert und im Übrigen nur einen Index auf die entsprechenden Listen verwaltet. Auch das Einsortieren der gefundenen Belegungen würde sich beschleunigen, da der mögliche Index bereits bekannt ist. Andererseits muss die Belegungslogik stärker zwischen Vorwärts- und Rückwärtsplanung differenzieren. Da es in der Validierung um funktionale Ergebnisse geht, wurde dieser Weg nicht weiter beschritten.

Optimierung der Bestände

Bei der grundsätzlichen Planung der Aufträge findet zunächst eine Rückwärtsplanung aller Vorgänge vom Letzten zum Ersten statt. Wenn ein Vorgang mehrere Komponenten benötigt, werden diese immer zum gewünschten Termin rückwärts geplant. Es kommt jedoch immer wieder vor, dass – trotz Priorisierung – eine Komponente wesentlich später zur Verfügung steht. In diesem Falle ist es unnötig, die anderen Baugruppen so frühzeitig zu fertigen.

In der Variante JBS-O werden zumindest einige dieser Komponenten auf den späteren Termin geplant um kostbare Kapazitäten freizuhalten.

Optimierung von Mehrfachabhängigkeiten

Die Sortierung der Primärbedarfe erfolgt nach dem Erfassungsdatum. Dies aber entspricht nicht unbedingt der Dringlichkeit. So kann ein Kunde sehr frühzeitig einen Auftrag platziert haben, dessen Wunschliefertermin noch weit in der Zukunft liegt. Ein weiterer Kunde hat seinen Auftrag später platziert, aber mit höherer Dringlichkeit.

Wenn beide Aufträge – was durchaus typisch ist – einige Komponenten teilen, wird in der oben beschriebenen Logik die Komponente zunächst rückwärts und relativ spät eingeplant. Danach kommt der weitere Kundenauftrag und benötigt die gleiche Komponente zu einem früheren Termin. Da der Auftrag aber schon eingeplant wurde, findet keine Revision statt und der zweite Kunde muss länger als notwendig warten. Auch hier wurde eine optimierte Variante des Algorithmus entwickelt. Diese verändert den Algorithmus wie folgt:

Statt nur eine Markierung für die Einplanung als solche zu setzen, wird das angeforderte Bedarfsdatum eingetragen. Wenn der Auftrag in eine Vorwärtsplanung übergehen musste, wird hier sogar ein Datum in der Vergangenheit erfasst. Wenn ein weite-

rer Auftrag zu einem späteren Zeitpunkt den gleichen Auftrag einplanen möchte, wird das neue Bedarfsdatum mit dem bisherigen verglichen. Wenn es früher als das bisherige ist, wird der Auftrag neu eingeplant. Das bedeutet: Der Auftrag wird vom ersten Bedarf nach seinen Bedürfnissen eingeplant. Wenn spätere Einplanungen einen dringenderen Bedarf haben, versucht das System diese zu befriedigen, obwohl die Chancen dafür durch die zunehmende Auslastung der Kapazitätsbelegung immer geringer werden.

Optimierung durch bedarfsgerechte Einplanung

Immer wieder gibt es Überlegungen, nur bedarfsgerecht eine Neuplanung durchzuführen. Im Falle der ereignisdiskreten Simulation erscheint dies prinzipiell bedingt ausgeschlossen. Im Falle von JBS dagegen kann die Neuplanung sehr wohl beschränkt werden auf Arbeitsgänge, deren Plandatum in der Vergangenheit liegt. Dabei müssen natürlich auch abhängige Bedarfe entsprechend geplant werden.

In dieser Variante „JBS-B“ werden zunächst alle offenen Vorgänge ermittelt, deren Planfertigstellungstermin in der Vergangenheit liegt. Diese rückständigen Aufträge werden vorwärts neu eingeplant. Diese Einplanung bricht bei dem Vorgang ab, ab dem der ursprüngliche Termin wieder eingehalten werden kann.

8.1.3 Implementierung der Abweichungssimulation

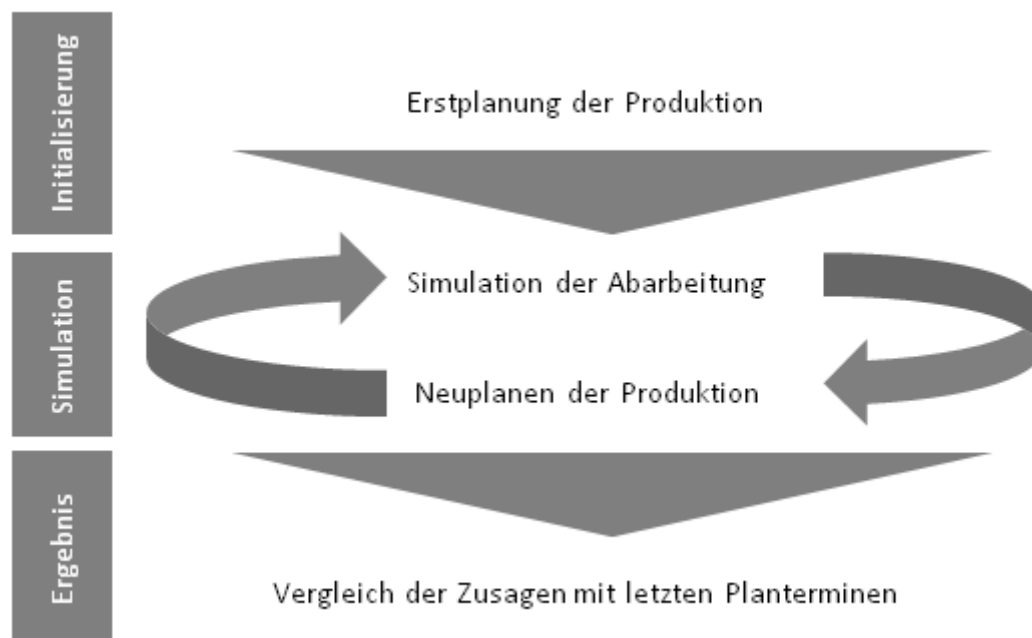


Abbildung 29: Ablauf der Abweichungssimulation

Abbildung 29 zeigt den Ablauf der Berechnung. Zunächst berechnet der Algorithmus einen Produktionsplan, die Liefertermine auf Kundenauftragsebene werden als Zusage gespeichert. Danach wird der Plan des ersten Tages – mit gewissen Abweichungen – umgesetzt und die Produktion neugeplant. Dieser Zyklus wird für die

nächsten ca. 3 Monate wiederholt bevor zuletzt die initial geplanten Zusagen mit den realisierten Lieferterminen bzw. den zuletzt geplanten Terminen verglichen werden.

In diesem Abschnitt werden die technischen Randbedingungen der Simulationsumgebung erklärt. Das implementierte System besitzt zwei komplett voneinander getrennte Berechnungsumgebungen. Im ersten Schritt werden beide Systeme identisch initialisiert. Während die erste Variante nicht mehr verändert wird, findet für die zweite Simulationsumgebung eine Abfolge von simulierter Abarbeitung und Neuplanungen statt. Nach jedem Zyklus werden die ursprünglich berechneten Termine der Kundenaufträge aus der Master-Umgebung und die aktuell berechneten Plantermine aus der Simulationsumgebung in Excel exportiert. Die Differenz der Termine wird später mit Hilfe von Pivot Tabellen untersucht.

Für die Untersuchungen sind dabei folgende Dimensionen zu unterscheiden:

- Der verwendete Algorithmus sowie dessen Varianten
- Die verwendeten Pufferstrategien
- Das Szenario aus Kapazitätsbelegung und Intensität der Abweichungen
- Der Tag der Berechnung

Die Simulation der Abarbeitung folgt folgendem Prinzip:

Zuerst wird für alle Einkaufs-, Fehlteile und Arbeitsgänge, die auswärts erledigt werden (Fremdarbeitsgänge) die Vorgabezeit angepasst. Dies erfolgt, in dem entsprechend die Zeit gleichverteilt um den Planwert schwankt.

$$t_{neu} = t_{alt} \times (rnd() - 1/2) \times \Delta EINK + t_{alt}$$

Die Funktion $rnd()$ liefert eine gleichverteilte Zufallszahl im Intervall $[0,1]$. Durch die Subtraktion wird der Mittelpunkt der Verteilung auf 0 gelegt, durch die Multiplikation mit $\Delta EINK$ die Schwankungsbreite auf $\pm \frac{1}{2} \Delta EINK$ festgelegt. Die neue Vorgabezeit wird dementsprechend festgelegt.

Die Schwankungsbreite ist dabei Teil des Szenarios. Da insbesondere Einkaufsteile einen sehr großen Einfluss auf die Termine haben können, werden die Anpassungen gespeichert und für zukünftige Berechnungsläufe wieder verwendet. Dadurch verwenden alle Algorithmen im gleichen Szenario auch die gleichen Abweichungen. Während der Bearbeitung der Vorgänge wird die bisher eingeplante Bearbeitungsdauer mit der modifizierten Vorgabedauer verglichen. Sobald diese überschritten ist, wird der Vorgang fertig gemeldet. Das System kennt damit im Rahmen der Neuplanung nicht die tatsächlichen Liefertermine, dies spiegelt die häufig mangelhafte Kommunikation zwischen Lieferant und Hersteller wieder. Eine vorzeitige Lieferung wird erst mit dem (simulierten) Wareneingang erkannt, eine verspätete Lieferung wird mit jedem Planungslauf als „sofort“ erwartet.

Im Laufe der simulierten Abarbeitung wird zunächst die eingeplante Maschinenkapazität bis zum nächsten Werktag ermittelt. Dies entspricht zwischen 24 und 72 Stun-

den (von Freitag auf Montag). Diese Kapazität wird analog zu den Einkaufsteilen um eine Schwankungsbreite $\Delta KAPA$ angepasst. Im Gegensatz zu den Einkaufsteilen werden die Werte nicht gespeichert, sondern unterscheiden sich stochastisch in jedem Berechnungslauf.

Als nächstes werden die Arbeitsgänge nach ihrem eingeplanten Startdatum sortiert. Diese werden der Reihe nach bearbeitet bis die (durch Produktionsabweichung veränderte) Kapazitätsgrenze erreicht ist. Dabei wird für jeden Arbeitsgang geprüft, ob die Voraussetzungen incl. der Übergangszeiten zu Vorgängern eingehalten wurden. Wenn dies nicht der Fall ist, wird der Vorgang übersprungen. Darüber hinaus wird ein gewisser Anteil von Aufträgen auf Grund von fehlenden Werkzeugen, technischen Klärungen und anderen auftragsbezogenen Störungen übersprungen. Die Wahrscheinlichkeit zum Überspringen wird mit $\Delta AUFTRAG$ bezeichnet.

Durch das Überspringen von geplanten Aufträgen und die Möglichkeit einer stochastischen Kapazitätserhöhung können Aufträge somit früher oder später als geplant fertig gestellt werden. Im Falle von Kapazitäten und Einkaufsteilen beträgt die Abweichung vom Planwert maximal die Hälfte der jeweiligen Spannbreite. Im Anschluss an jeden Zyklus wird der Produktionsplan validiert. Dazu wird geprüft, dass sich keine Belegungen überschneiden und die Vorgänger eines jeden Arbeitsgangs rechtzeitig vor dessen Start eingeplant wurden.

Um Szenarien zu beschreiben wird folgende Kurzform verwendet:

$$\Delta KAPA - \Delta AUFTRAG - \Delta EINKAUF$$

8.1.4 Datenstruktur und Produktionsumgebung

Als Beispieldaten wird ein Datensatz der Maschinenbau AG verwendet. Aus Datenschutzgründen kann der echte Name nicht genannt werden. In Summe arbeiten ca. 100 Mitarbeiter in der direkten Produktion an ebenso vielen Maschinen. Jährlich werden etwa 60 Millionen Euro Umsatz erwirtschaftet, die Lieferzeit variiert zwischen wenigen Tagen für Ersatzteile bis hin zu mehreren Monaten für komplexe Engineer-to-Order Produkte.

Der Datensatz stammt vom 28. Mai 2019. Zu diesem Zeitpunkt besteht der Auftragsbestand aus 3.180 Kundenaufträgen mit einem Gesamtumsatz von etwa 22,5 Millionen Euro. Die Planung muss dazu 37.000 Fertigungsarbeitsgänge, 6.149 Bestandspositionen, 2.139 Bestellungen sowie über 430.000 Schichten verplanen.

8.2 Qualitative Validierung

In diesem Unterkapitel werden zunächst Effekte der Abweichungssimulation diskutiert. Im Anschluss wird für die verwendeten Algorithmen und ihre Varianten die Reaktion auf verschiedene Situationen mit Hilfe von Einzelbeispielen untersucht. Dabei werden einerseits Mechanismen in der Planung und andererseits Reaktionen auf Produktionsabweichungen diskutiert.

Zuletzt werden noch einige Ausführungen zur formalen Richtigkeit sowie der Handhabbarkeit usw. vorgenommen um die geforderte Qualität zu erreichen. (Patzak 1982)

8.2.1 Effekte der Abweichungssimulation

Produktionsabweichungen treten per Definition unerwartet auf. Diese positiven wie negativen Überraschungen werden erst im Laufe der Produktion bekannt. Einige Aufträge sind bereits fertig bearbeitet und warten nur noch auf die Auslieferung. In diesem Falle wirken sich Störungen nicht mehr auf die Liefertermine aus. Weitere Aufträge haben ihre Produktion noch nicht begonnen. Diese sind nur indirekt von Störungen betroffen. Das ist immer dann der Fall, wenn sie mit rückständigen Aufträgen um knappe Kapazitäten konkurrieren. Im Falle von EDS-A und JBS kommen noch die später skizzierten Effekte dazu, bei denen die Einplanungsreihenfolge und -Richtung (JBS) sowie die Materialengpässe (EDS-A, JBS-O) nicht nur abhängige Bedarfe, sondern auch deren übrigen Auftragsnetze beeinflussen.

Somit werden Aufträge mit sehr frühem oder sehr spätem Liefertermin kaum von Störungen betroffen sein. Bei den übrigen Aufträgen ist zu erwarten, dass die Anzahl und Wirkung der Produktionsabweichungen mit zunehmender Anzahl von offenen Arbeitsgängen (und damit ihrem erwarteten Fertigstellungstermin) steigt. Dieses findet jedoch eine Grenze in der Anzahl der zu fertigenden Arbeitsgänge, die durch die Produktstruktur begrenzt sind.

Zusammenfassend ist zu erwarten, dass die Termintreue mit der Dauer der Simulation abfällt, sich jedoch auf einem langfristigen Niveau stabilisiert. Dieses bestimmt sich durch die Produktkomplexität einerseits und die Intensität der Störungen andererseits.

In allen Algorithmen ergeben sich teilweise lange Wartezeiten an den Arbeitsplätzen. Produktionsabweichungen wirken sich damit nicht automatisch auf den Liefertermin aus. Eine frühere Fertigstellung eines Arbeitsgangs führt oftmals nur zu längeren Wartezeiten an einem folgenden Engpassarbeitsplatz, umgekehrt kann eine verspätete Lieferung oftmals kompensiert werden. Nicht-terminbestimmende Komponenten wiederum beeinflussen bis zu einem gewissen Maß an Verzögerung den Liefertermin überhaupt nicht.

Kapazitäten sind in ferner Zukunft gering ausgelastet, da die Kundenaufträge, die diese Anlagen benutzen, heute noch unbekannt sind. Dies ermöglicht es dem System bei zukünftigen Aufträgen flexibler zu planen und Störungen besser zu kompensieren.

Die Produktionsabweichungen sind symmetrisch modelliert, d.h. die Wahrscheinlichkeit für eine Verbesserung ist genauso groß wie die für eine Verschlechterung. Dies gilt für die Schwankungsbreiten von Kapazitäten und Lieferzeiten, aber auch das Überspringen von Aufträgen ermöglicht das Vorziehen von anderen Vorgängen. Aus

den folgenden Gründen ist trotzdem zu erwarten, dass die Anzahl der Verspätungen deutlich größer ist als die Anzahl der vorzeitig gelieferten Aufträge:

In vielen Fällen wurden die Komponenten zu einem gemeinsamen Termin disponiert. Da alle Bauteile zur Verfügung stehen müssen, hat eine einzelne Verspätung jedoch größere Auswirkungen als eine vorzeitige Fertigstellung. Weiterhin führt die Planungsheuristik in allen Ausprägungen dazu, dass eingeplante Arbeitsgänge im Sinne der Zielerreichung wichtiger sind als die später eingeplanten Vorgänge. Demzufolge führt ein Tausch in der Bearbeitungsreihenfolge in der Regel zu einer Verschlechterung der Terminsituation.

8.2.2 EDS-E

Bedarfsliste

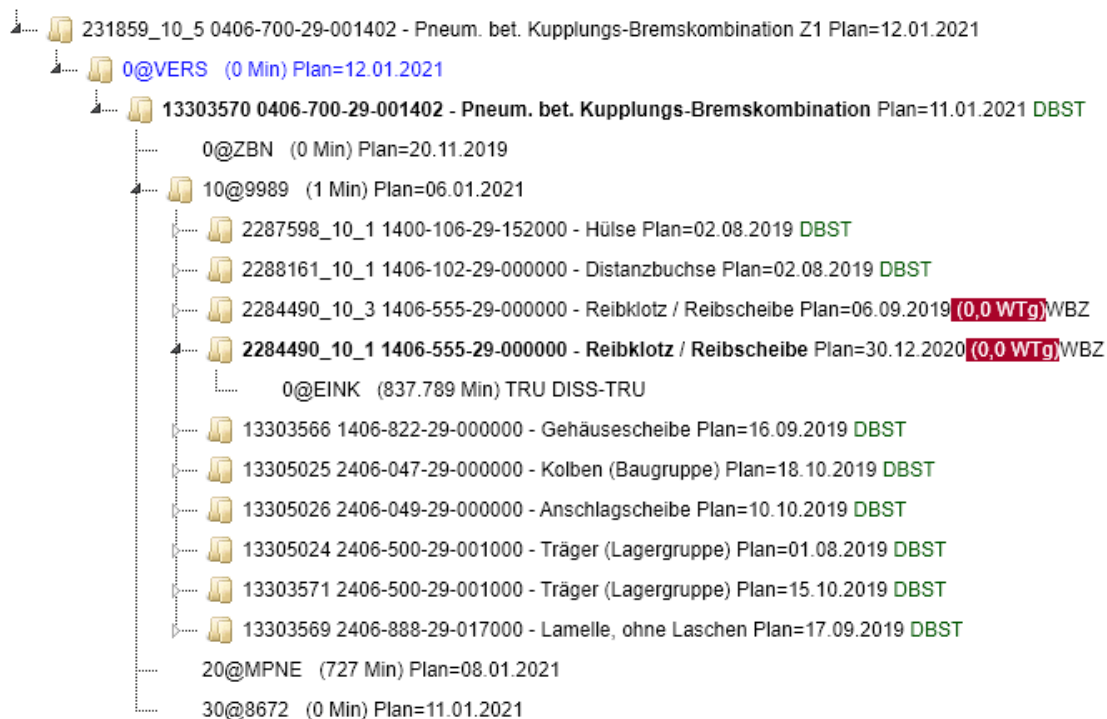


Abbildung 30: Auftragsnetz mit EDS-E

Abbildung 30 zeigt ein Auftragsnetz in der Variante EDS-E. Das terminbestimmende Teil ist fett dargestellt und der Arbeitsplan aufgeklappt. Der Reibklotz wird erst Ende 2020 geliefert, trotzdem werden die übrigen Komponenten in der Vorwärtsplanung sehr schnell gefertigt da die Synchronisation zwischen den Komponenten nur über das Wunschlieferdatum des Kundenauftrages erfolgt (bereits Ende 2019).

Neben der Abstimmung der Komponenten im Auftragsnetz ist die Frage wichtig, wie sich Reihenfolgenabweichungen auf die Fertigungstermine auswirken. Die ereignisdiskrete Simulation bearbeitet Aufträge nach einer Prioritätsregel, die sich an den Eckendterminen orientiert. Diese Eckendtermine bleiben im Verlauf der Simulation gleich. Weil die Auftragsfreigabe keine Kapazitäten betrachtet bilden sich an einigen

Arbeitsplätzen sehr lange Warteschlangen. So gibt es an der hoch ausgelasteten Drehmaschine 555 unwichtige Aufträge mit 50 Tagen Liegezeit. In diesen Fällen führt eine verspätete Ankunft in der Regel nur zu kürzeren Liegezeiten ohne den Planfertigstellungstermin zu gefährden.

Allerdings können auch hier kleine Anpassungen zu großen Terminverschiebungen führen: Ein Beispiel dafür ist der Vorgang 13305047/70 an der Maschine 0733. Dieser Arbeitsgang ist nicht besonders dringend, aber zum Startzeitpunkt der Simulation der einzige verfügbare. Als solcher wird er für den 29. Mai eingeplant. In der Abarbeitungssimulation wurde er jedoch übersprungen. Inzwischen treffen aber (planmäßig) weitere Aufträge ein, die dringender sind und damit vor dem genannten Auftrag abgearbeitet werden. In der entstandenen Verzögerung treffen erneut weitere Aufträge ein. Schlussendlich drängeln sich auf diese Weise 140 andere Aufträge mit 33.000 Minuten Bearbeitungszeit vor und führen zu einer Verzögerung von 90 Tagen.

In einem anderen Fall am Arbeitsplatz 0766 kommt ein anderer Auftrag 15 Minuten früher als geplant und damit knapp vor dem Start des bisher eingeplanten Auftrages an. Da dieser Auftrag dringender ist, belegt er die Maschine für 1.200 Minuten. In dieser Zeit treffen weitere 6 Aufträge mit insgesamt 300 Minuten ein. Da zusätzlich der einzige Mitarbeiter 3 Wochen Urlaub hat, verzögert sich die Fertigstellung im Vergleich zur ursprünglichen Planung um ca. 4 Wochen.

8.2.3 EDS-A

Abbildung 31 zeigt das gleiche Auftragsnetz mit EDS-A. Die Auftragsfreigabe erkennt den Materialengpass des Reibklotzes und gibt die Trägerlagergruppe erst später frei. Sie wird damit nur wenige Tage vor dem Reibklotz fertig (18.12.2019). Da die übrigen Komponenten wesentlich früher gefertigt werden, liegt daran, dass sie noch weitere, dringendere Bedarfe haben.

Auch bei EDS-A gelten die gleichen Prinzipien wie bei EDS-E für die Ursache von plötzlichen Terminverschiebungen. Die Auftragsfreigabe soll einerseits die Bestände (WIP und Lagerbestand) reduzieren, kann aber selber Nebenwirkungen haben.

Die Verzögerung der Auftragsfreigabe basiert auf den Ergebnissen eines ersten Planungslaufes. Die zugrunde liegende Annahme dahinter besteht darin, dass ein Vorgang, der im ersten Durchlauf nur eine geringe Liegezeit aufweist, zu späteren Zeitpunkten ebenfalls problemlos eingeplant werden kann. Dies ist jedoch nicht immer der Fall wie bereits im Fall von EDS-E diskutiert wurde. Dadurch kann eine geringfügig spätere Freigabe deutliche Terminabweichungen hervorrufen.

Ein weiterer Effekt kommt auch ohne Planabweichungen zum Tragen. Im ersten Durchlauf werden Aufträge für den Folgetag eingeplant. Dabei beeinflussen sie natürlich konkurrierende Aufträge an diesem Arbeitsplatz und Tag. Auf Grund der Auftragsfreigabestrategie werden sie jedoch im zweiten Durchlauf auf die Zukunft ver-

schoben. Am Folgetag wird – ohne Planabweichungen – dieser Auftrag weder begonnen noch fertig gestellt. Er muss damit erneut eingeplant werden, dies kann aber (keine Planung in der Vergangenheit) erst einen Tag später geschehen. Damit verändert sich die Konkurrenzsituation und es kommt zu abweichenden Lieferterminen ohne dass diese durch Produktionsabweichungen begründet werden.

Bedarfsliste

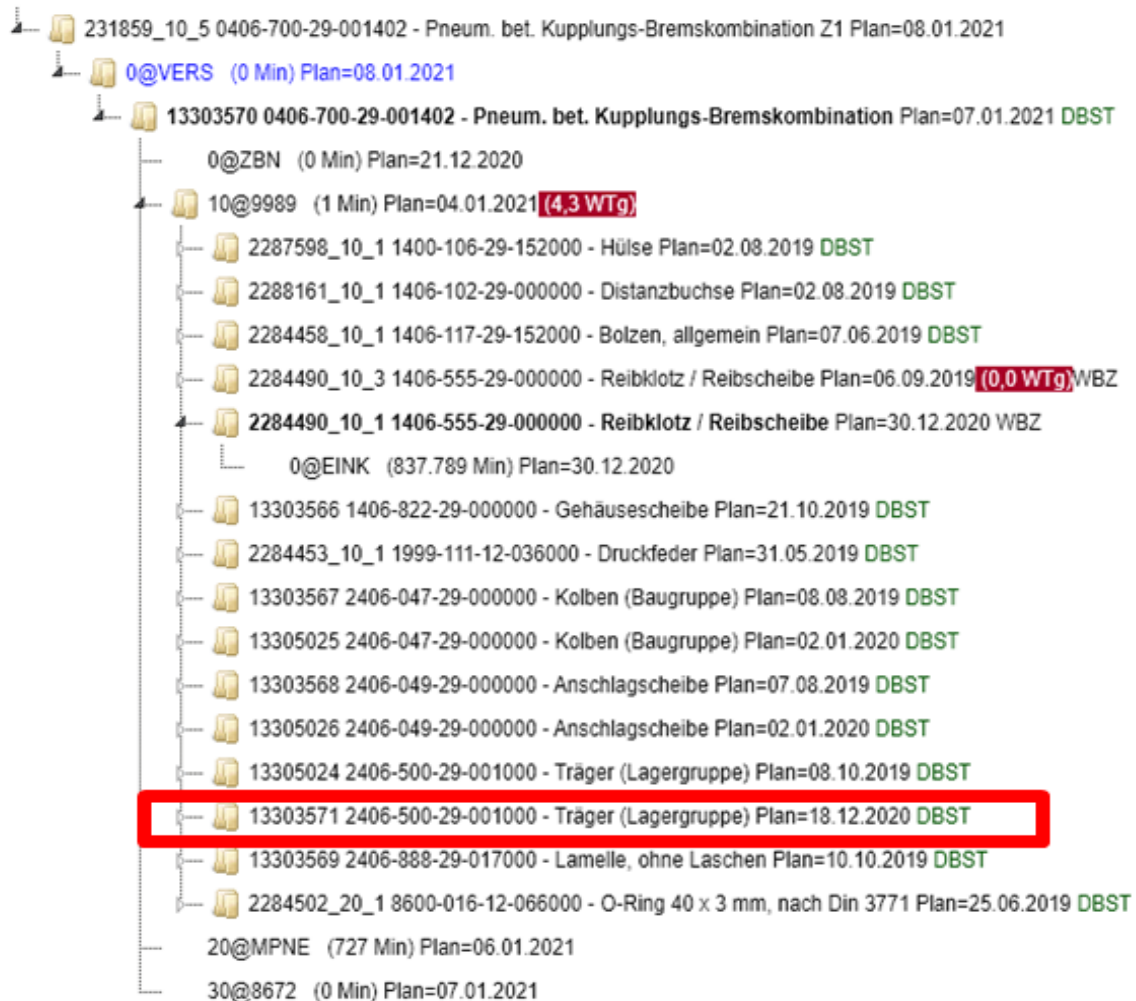


Abbildung 31: Auftragsnetz mit EDS-A

8.2.4 JBS-E

Die Planung von JBS-E plant die Aufträge zunächst rückwärts ein und schaltet nur bei Bedarf auf eine Vorwärtsplanung um. Dabei entscheidet der zuerst erfasste Bedarf über die Einplanung, eine spätere Umplanung ist nicht vorgesehen. Die Trägerlagergruppe aus Abbildung 31 wird in diesem Falle rückwärts vom Wunschlieferdatum eingeplant und damit am 10.Dezember 2019 – mehr als ein Jahr vor dem Reibklotz – fertig gestellt.

Problematischer ist jedoch ein anderer Fall. Der Auftrag 13295670 wurde im Juli 2018 erfasst und damit sehr früh eingeplant. Der Kunde hat den Bedarf jedoch stor-

niert. Deshalb wird systemseitig ein Bedarfsdatum 2029 angenommen. Dieser Auftrag benötigt unter anderem einen Zylinder aus dem Fertigungsauftrag 13305339. Dieser benötigt nur noch einen Kontrollarbeitsgang, der jedoch auf Grund des Bedarfsdatums erst im Jahr 2029 rückwärts eingeplant wird. Allerdings wird dieser Zylinder auch von anderen Kundenaufträgen benötigt. Weil eine Umplanung nicht zugelassen wurde, können diese anderen Kundenaufträge ebenfalls nicht beliefert werden.

Wenn Produktionsabweichungen simuliert werden, ergeben sich an den Arbeitsplätzen irgendwann Restkapazitäten die dazu führen, dass der eigentlich für 2029 geplante Auftrag doch schon früher bearbeitet wird. Sobald der Materialengpass auf diese Weise aufgelöst wurde, werden die übrigen Kundenaufträge richtig geplant und wesentlich früher als ursprünglich gedacht beliefert. Die Voraussetzung dafür ist jedoch, dass der Auftrag bereits in die Produktion freigegeben (gedruckt) wurde, da sowohl in der Simulation als auch der Realität eine Auftragsfreigabe nicht um mehrere Jahre vorgezogen wird.

Doch selbst ohne Produktionsabweichungen kommt es zu Veränderungen an den Lieferterminen. Bei der Planungsrichtung rückwärts werden zuerst Mitarbeiter gefunden, die am Ende ihrer Schicht noch Zeit haben, da diese näher am Einplanungszeitpunkt liegen. In der Vorwärtsplanung ist dies entgegengesetzt. Zuerst wird ein Auftrag rückwärts eingeplant. Sobald der entsprechende Planungszeitpunkt erreicht wurde, wird der Auftrag begonnen und nunmehr vorwärts eingeplant. Dabei wird zwar zunächst der gleiche Termin erreicht, da sich die Kapazitätssituation gegenüber der Erstplanung nicht verändert hat, allerdings werden unter Umständen andere Mitarbeiter verplant. Diese Planänderung kann auf Grund der Qualifikationsmatrix auch andere, nachfolgend eingeplante Aufträge in Mitleidenschaft ziehen und somit letzten Endes Terminabweichungen verursachen.

8.2.5 JBS-O

Das Auftragsnetz aus Abbildung 31 wird durch JBS-O korrekt rückwärts geplant. Dabei wird auch die gekennzeichnete Trägerlagergruppe am 30.12.2020, d.h. gleichzeitig mit dem Reibklotz fertig, da der Materialengpass bei der Planung berücksichtigt wird.

Auch mit dem anderen Beispiel des Zylinderauftrages geht das System anders um. Dieser wird zunächst rückwärts für 2029 geplant. Das System erkennt jedoch, dass es bereits frühere Bedarfe gibt und plant im Gegensatz zu JBS-E den Auftrag für den Zylinder neu ein. Damit ergaben sich bereits in der Erstplanung realistische Termine.

Allerdings kommt es auch in diesem Falle in dem Szenario ohne Produktionsabweichungen zu veränderten Terminen. Das kann wie folgt begründet werden: Der Zylinder wird zuerst für 2029 eingeplant und konkurriert dort mit anderen Aufträgen. Durch die Neuplanung wird er vorgezogen und im Verlauf der Simulation abgearbeitet. Damit wird der Auftrag überhaupt nicht mehr eingeplant, die bisher temporär blockierten

Kapazitäten werden frei. Demzufolge verändert sich die Konkurrenzsituation und es kommt zu Terminabweichungen bei anderen Aufträgen.

8.2.6 JBS-B

Die Erstplanung von JBS-B erfolgt mit dem Algorithmus JBS-O. Es gelten damit die gleichen Feststellungen wie im vorigen Abschnitt. Im Verlauf der Abweichungssimulation erfolgt jedoch nur eine bedarfsgerechte Neuplanung von verspäteten Aufträgen. Weil wesentlich weniger Aufträge betroffen sind, ist die Berechnungsgeschwindigkeit deutlich höher und nicht betroffene Aufträge behalten garantiert ihre Plantermine.

Allerdings ist statistisch zu erwarten, dass jeder (komplexe) Auftrag irgendwann von Störungen betroffen ist. Die Freiheitsgrade des Systems zur Umplanung eines Auftrages sind jedoch wesentlich beschränkt, da konkurrierende Belegungen nicht mehr geändert werden können. Eine Verschiebung fällt damit – insbesondere bei langen Vorgabezeiten - umso drastischer aus. Somit ist zu erwarten, dass es wenige, aber starke Terminabweichungen produziert. Ein Vorziehen von Aufträgen ist auf Grund der Implementierung des Algorithmus in keinem Fall zu erwarten.

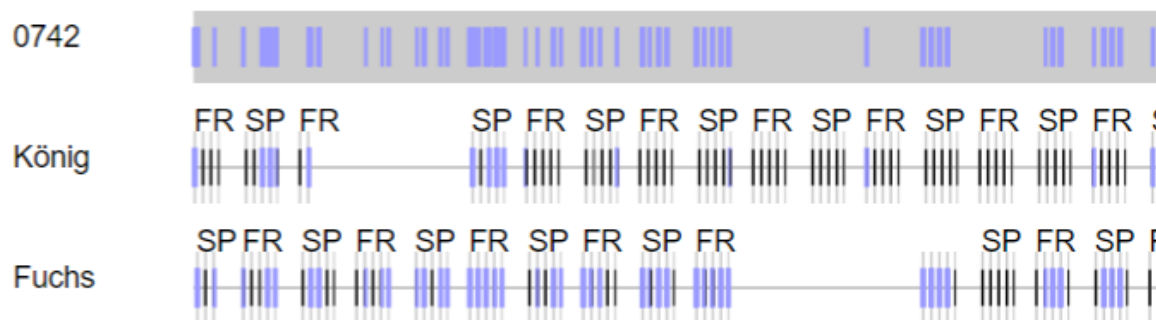


Abbildung 32: Fehlende Umplanungsmöglichkeiten

Abbildung 32 zeigt die Erstplanung der hoch ausgelasteten Maschine 0742. Bis zum 24.09 (dem Ende der Darstellung) sind die Maschine und vor allem die zugehörigen Mitarbeiter nahezu voll ausgelastet. Wenn ein Auftrag verschoben wird – insbesondere einer, der mehrere Schichten zur Bearbeitung benötigt – wird die Verschiebung über diesen Zeitraum hinaus ausfallen.

Der Vorgang 13300969/50 wird deterministisch am 05.Juni eingeplant. Durch eine auftragsbezogene Störung wurde dieser Vorgang mit 1.692 Minuten Vorgabedauer nicht rechtzeitig bereitgestellt. Dadurch verpasste er die ursprünglich geplante Belegung. Entsprechend der Abbildung ist eine Einplanung von mehreren Schichten nicht möglich, schließlich plant das System erst im Januar 2020 den Vorgang erneut ein. Aus einer Verzögerung von 3 Tagen wurden auf diese Weise 6 Monate. In einer prioritätsregelgesteuerten Variante (oder eingeschränkt den Varianten JBS-O/JBS-E)

würde der Auftrag dagegen zwischen die bereits eingeplanten Belegungen sortiert werden.

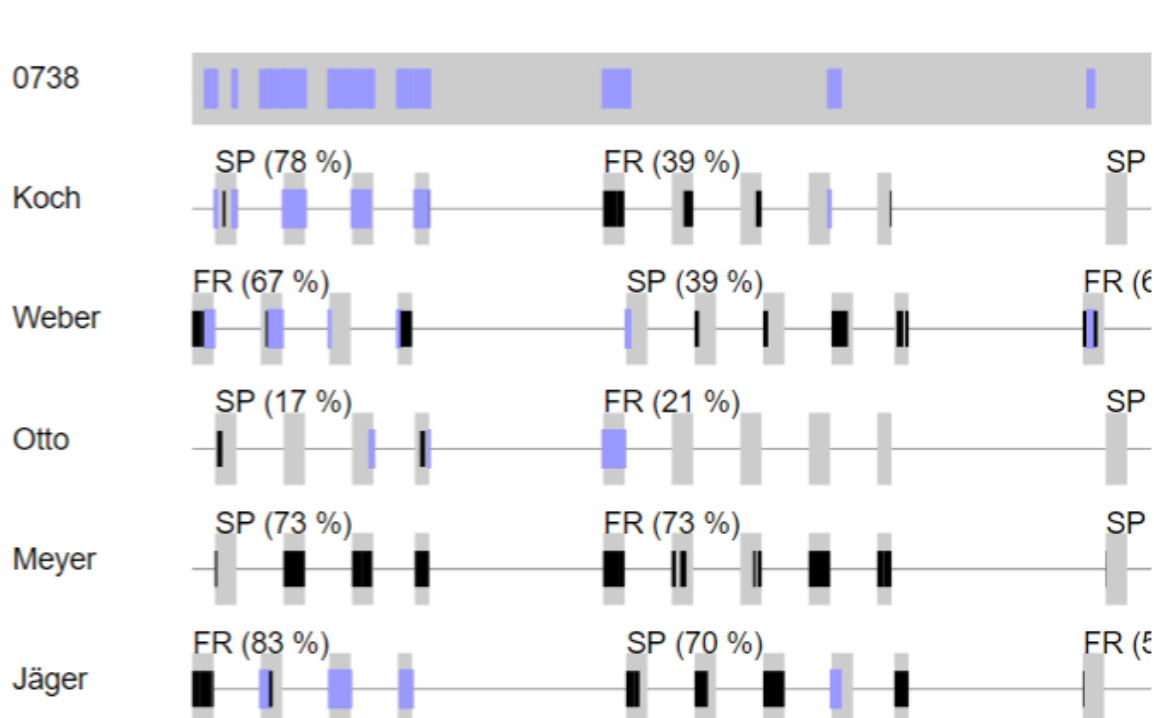


Abbildung 33: Planung in den ersten 2 Wochen bei JBS-O

Die Abbildung zeigt die zahlreichen Lücken in der Belegung der Maschine 0738 in den ersten zwei Wochen. Diese Lücken entstehen jedoch - entgegen den ursprünglichen Annahmen - weniger aus der fehlenden Möglichkeit diese mit kurzlaufenden Aufträgen zu füllen sondern vielmehr daraus, dass die vorhandenen Aufträge rückwärts eingeplant wurden und somit ein sehr viel späteres Bedarfsdatum haben. Diese Feststellung gilt jedoch für alle JBS-Verfahren.

8.2.7 Formale Richtigkeit

Alle Algorithmen wurden im Anschluss an jede Planung systematisch auf folgende Effekte getestet:

- Keine Doppelbelegung von Ressourcen (ausgenommen Arbeitsplätze mit paralleler Bearbeitung von mehreren Aufträgen)
- Einhaltung der Reihenfolgenrestriktionen, d.h. alle Vorgängerendtermine müssen vor dem Starttermin liegen
- Keine Überschreitung von Mitarbeiterschichten
- Vollständigkeit und Konsistenz der Vorgangsbelegungen mit den Belegungslisten der Maschinen/Personen

Dazu werden in einer Klasse die entsprechenden Bedingungen geprüft und ggf. als Fehlermeldung ausgegeben. Die Ergebnisse zeigen die Korrektheit der Planungsergebnisse.

8.2.8 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden qualitativ die auftretenden Effekte beschrieben. Die folgenden Kapitel beschreiben die quantitativen Auswirkungen.

Die Produktionsabweichungen wirken direkt auf die offenen Vorgänge. Je komplexer ein Auftragsnetz ist und je stärker die Intensität der Störungen, desto geringer wird die Termintreue sein. Da die Anzahl der Vorgänge aber durch die Produktstruktur begrenzt ist, ist davon auszugehen, dass die Termintreue zunächst deutlich absinkt, aber sich langfristig auf einem festen Niveau einpegelt. Trotz der symmetrischen Modellierung der Produktionsabweichungen (Verbesserungen und Verschlechterungen sind gleich wahrscheinlich) ist mit mehr Verspätungen als vorzeitigen Lieferungen zu rechnen.

JBS-Verfahren verursachen durch ihre Rückwärtsplanung voraussichtlich geringere Bestände und Auslastung als die Vorwärtsplanung der EDS. JBS-O, JBS-B und EDS-A richten den Produktionsplan der Komponenten am Bedarfsdatum aus und vermeiden damit übermäßige Lagerbestände, dies gilt nicht für EDS-E und JBS-E. JBS-E führt darüber hinaus zu Fällen mit unnötig späten Lieferterminen durch den Verzicht auf eine Neuplanung bei Mehrfachverwendung. JBS-B führt erwartungsgemäß zu wenigen, aber starken Terminverschiebungen. Insgesamt wird bei JBS ein größerer Anteil von deutlichen Lieferterminabweichungen erwartet da gerade Vorgänge mit langen Vorgabezeiten nur wenige Lücken vorfinden.

Auf Grund von Besonderheiten in den Algorithmen ist für EDS-A und JBS-E sowie JBS-O zu erwarten, dass es selbst ohne Produktionsabweichungen zu einer gewissen Planungsnervosität kommt.

8.3 Quantitative Ergebnisse – Leistungsvergleich

Im ersten Schritt wurden die Algorithmen JBS-O (Job-based Sequencing mit Optimierungen), JBS-E (Job-based-Sequencing ohne Optimierungen) sowie EDS-E (Ereignisdiskret mit rudimentärer Auftragsfreigabe) und EDS-A (Ereignisdiskret mit komplexer Auftragsfreigabe und Personaloptimierung) untersucht. Da die Erstplanung von JBS-B auf JBS-O basiert, muss dieser Algorithmus nicht gesondert betrachtet werden. Alle haben das Produktionsprogramm vom 28.05 als Eingabe bekommen und Termine für die Kundenaufträge berechnet. In dieser Auswertung spielt die Art und Intensität der späteren Produktionsabweichungen noch keine Rolle, da es nur um die Ermittlung von Planterminen geht.

Zunächst ist festzustellen, dass die Berechnungsdauer in den JBS-* Varianten bei ca. 44 Minuten liegt, während EDS-* weniger als 1 Minute benötigt. Zwar ist eine Op-

timierung der Planungsgeschwindigkeit für JBS-* skizziert worden. Allerdings hat das bisher bei der Maschinenbau AG eingesetzte Planungssystem (ebenfalls vom Typ JBS) sogar 1-2 Stunden für einen Berechnungslauf benötigt, so dass EDS auch im Vergleich mit vollwertigen Umsetzungen als sehr schnell einzustufen ist.

8.3.1 Vergleich des Durchsatzes

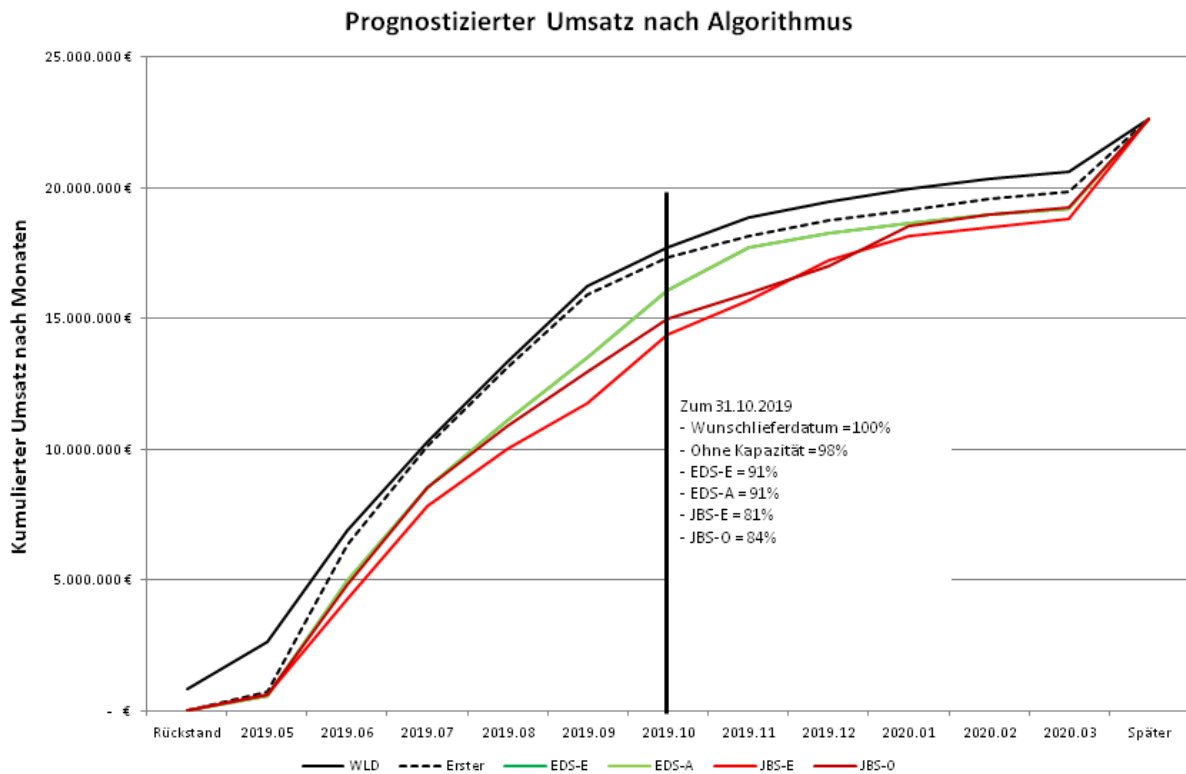


Abbildung 34: Umsatzverlauf verschiedener Algorithmen

Weil jedes System einzelne „starke Monate“ hat, wird in der Abbildung 34 der Umsatz kumuliert abgetragen. Da kein Kundenauftrag vor dem Wunschlieferdatum ausgeliefert werden darf, beschreibt die schwarze durchgängige Linie die Obergrenze für den möglichen Umsatz. Bis zum 31.10.2019 dürfen auf diese Weise maximal 17.719.433 € ausgeliefert werden. Ohne Rücksicht auf Kapazitäten, aber mit Betrachtung von Bearbeitungs-/Beschaffungs- und Übergangszeiten könnten 98% dieses Umsatzes realisiert werden (Datenreihe „Erster“).

Die Werte für die verschiedenen Algorithmen sind in der Graphik eingezeichnet. Auf Grund von Kapazitätsengpässen kann dieses Wunschergebnis von keinem Verfahren erreicht werden. In den ersten Monaten und ab 2020 gibt es kaum Unterschiede zwischen den Algorithmen, die Verfahren der EDS erzielen durchgängig fast identische Ergebnisse.

Die JBS-Varianten sind etwas schlechter, JBS-O plant bis Ende Oktober ca. 1,3 Mio. € weniger Umsatz ein als die EDS-Varianten. Bis zum 31.10.2019 wurden 1.943 Kundenaufträge von mindestens einem System geplant. Davon wurden 88% von al-

len Systemen in diesem Zeitraum geplant, unabhängig von der konkreten Heuristik werden also sehr ähnliche Ergebnisse erzielt.

8.3.2 Vergleich der Auslastung

Die Auslastung einer Fabrik kann nur schwer ermittelt werden. Die eingeplanten Minuten sind zwar genauso bekannt wie die Summe der Personalkapazität. Aber wie viel davon überhaupt eingesetzt werden kann, hängt von Schichtmodellen, Qualifikationsmatrizen und vor allem der Anzahl der Aufträge ab, die zur Verfügung stehen. Da dieses Problem zu komplex für eine garantiert optimale Lösung ist können nur die eingeplanten Minuten verglichen werden.

	KW22	KW23	KW24	KW25	KW26	KW27	KW28	Summe
EDS-E	155.109	176.906	172.496	161.569	152.068	136.371	124.707	1.079.226
EDS-A	154.927	178.008	167.480	156.150	139.768	140.867	122.321	1.055.521
JBS-E	115.762	127.731	113.599	114.089	117.843	111.332	105.225	805.581
JBS-O	120.348	129.761	115.733	123.420	124.522	119.186	106.777	839.747

Tabelle 8: Eingeplante Minuten nach Algorithmus

In Tabelle 8 werden die vom System eingeplanten Minuten pro Kalenderwoche dargestellt. Daraus lassen sich einige Erkenntnisse ableiten:

Erwartungsgemäß plant EDS-E als vorwärts planendes System die meisten Minuten ein. Durch die restriktivere Auftragsfreigabe plant EDS-A eine etwas geringere Auslastung. Diese Auftragsfreigabe betrifft aber keine Aufträge, die bereits in der Produktion sind. Deshalb kommt diese Änderung zu EDS-E erst ab der KW24 deutlich zum Tragen. Demgegenüber führt die Optimierung der Personaleinsatzplanung zu einer etwas erhöhten Auslastung, im gesamten Zeitraum bis 2029 werden 218.961 Minuten früher verplant.

JBS-E und JBS-O dagegen planen beide nach Möglichkeit rückwärts und führen damit zu deutlich niedrigeren Werten. Dadurch, dass JBS-O gegebenenfalls Aufträge mit dringendem Bedarf nachträglich vorzieht, erhöht sich die Minutenzahl etwas. Die niedrigere Minutenzahl von JBS-* führt direkt zu einer niedrigeren Betriebsleistung und etwas geringerem Umsatz. Allerdings unterscheidet sich dieser weitaus weniger drastisch als die Fertigungsleistung.

Die EDS Verfahren nehmen also eine Bestandserhöhung in Kauf um die Kapazitäten auszulasten und in den Vorlauf zu kommen. Insbesondere werden bereits freigegebene Aufträge so schnell wie möglich bearbeitet während JBS-* auch in diesem Falle durch Rückwärtsplanung so spät wie möglich produziert.

Einerseits ist eine frühe Fertigung positiv, da sie teure Kapazitäten auslastet, andererseits erhöht sie die Bestände. Es hängt also von den Unternehmenszielen ab,

welche Variante besser geeignet ist. Dabei ist zu beachten, dass EDS-A durch die Parametrierung genauer an die Bedürfnisse angepasst werden kann.

8.3.3 Vergleich der Bestände

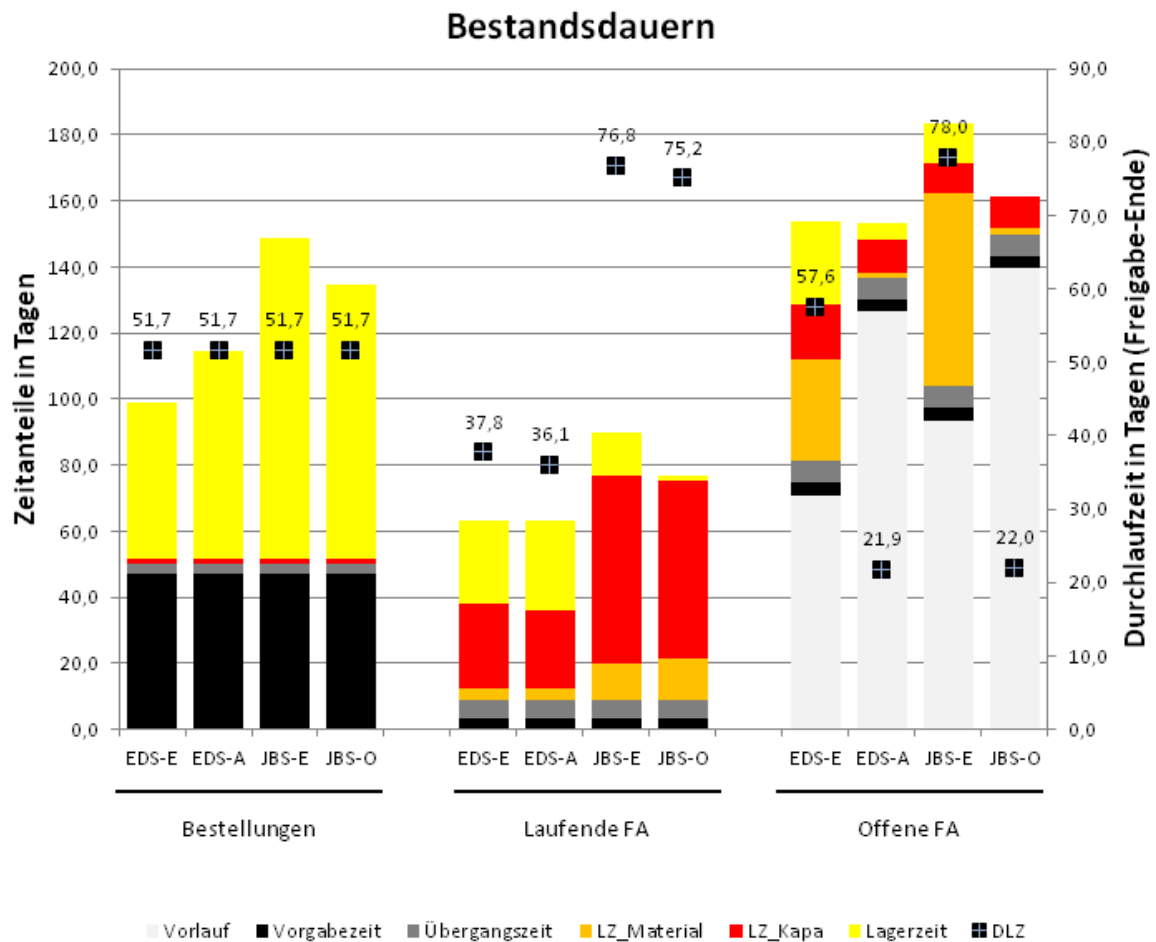


Abbildung 35: Bestände nach Algorithmus

Abbildung 35 zeigt die Durchlaufzeitanteile für alle beeinflussbaren Typen von Bedarfsdeckern. Dazu werden Bestellungen, bereits freigegebene und sonstige (Plan)-Fertigungsaufträge differenziert.

Es wurden nur solche Aufträge betrachtet, bei denen es mindestens einen realen Bedarf bis Ende 2023 gibt. Die Durchlaufzeitanteile bestehen aus der Belastungsverschiebung (nur für Planaufträge, grau dargestellt), den vom System nicht beeinflussbaren Vorgabe- und Übergangszeiten (schwarz/dunkelgrau) sowie verschiedenen Liegezeiten (gelb/orange/rot). Die Marker auf der Sekundärachse repräsentieren die Fertigungsdurchlaufzeit von der Auftragsfreigabe bis zur Rückmeldung des letzten Arbeitsganges. Diese beinhaltet nicht die Verweildauer im Lager sowie die Belastungsverschiebung.

Die Liegezeiten entstehen einerseits durch das Warten auf Komponenten (orange), andererseits das Warten auf Personal- und Maschinenkapazität (rot) und schließlich

der Verweildauer von der Ablieferung an das Lager bis zur Entnahme der ersten Teilmenge (gelb). Die Gesamtdauer des Balkens beginnt bei dem Simulationsstart am 28.05.2019, d.h. die Position des roten Balkens gibt den durchschnittlichen Fertigstellungstermin, die des gelben Balkens die der ersten Verwendung an.

Konzeptionell bedingt sind Bestellungen bereits freigegeben und verfügen über einen festen Liefertermin. Daher beträgt die durchschnittliche Durchlaufzeit in allen Fällen 52 Kalendertage. Die Unterschiede in der Lagerzeit ergeben sich aus den verschiedenen Startterminen der Bedarfe. Da EDS-A den Start dieser Aufträge auf Grund von Kapazitäts- oder Materialengpässen verschiebt, ergeben sich hier längere Verweildauern im Lager. Ähnliches gilt für die Rückwärtsterminierung von JBS sowie deren generell spätere Fertigstellung von Aufträgen.

Bereits laufende Aufträge werden durch EDS-A und EDS-E fast identisch geplant weil sich die Auftragsfreigabe nicht direkt auf diese Kategorie auswirkt. Beide JBS-Verfahren planen ca. 2/3 der Aufträge in dieser Kategorie rückwärts. Die Rückwärtsplanung führt häufig dazu, dass laufende Aufträge sehr lange warten bevor die Bearbeitung überhaupt beginnt (Ø 96,2 Tage Gesamtdurchlaufzeit im Fall von JBS-E). Die vorwärts eingeplanten Aufträge haben dagegen eine durchschnittliche Durchlaufzeit von ca. 40,9 Tagen. Bei JBS-O zeigt sich ein ähnliches Bild.

Diese langen Liegezeiten korrespondieren mit der geringeren Auslastung. Diese Aufträge sind bereits freigegeben und erzeugen damit einen Bestand, werden aber nicht bearbeitet und leisten damit keinen Beitrag zur Auslastung. Dies ist jedoch teilweise dadurch bedingt, dass die Planungsgrundlage am 28.Mai dadurch entstanden ist, dass die Maschinenbau AG die Aufträge nicht nach der Planungslogik von JBS, sondern EDS-A freigegeben hat.

In der Gruppe der offenen FA entscheiden die Verfahren selbständig über den Zeitpunkt der Auftragsfreigabe. EDS-E gibt Aufträge ohne Rücksicht auf mögliche Engpässe, aber nicht vor dem Wunschlieferdatum frei. EDS-A verschiebt die Auftragsfreigabe weit in die Zukunft und reduziert damit Durchlaufzeit und Bestände. Dies gilt sowohl für die Verweildauer im Lager als auch Wartezeiten in der Produktion. Die Gesamthöhe des Balkens und damit die Verfügbarkeit für Folgeprozesse sind dabei nahezu identisch zu EDS-E, entsprechend der Zielsetzung wird die unerwünschte Liegezeit reduziert und in eine Belastungsverschiebung verwandelt.

	EDS-E	EDS-A	JBS-E	JBS-O
Bestellungen	99,2	114,4	148,7	134,9
Laufende FA	63,3	63,1	90,0	76,8
Offene FA	82,8	26,9	90,0	20,8
Gesamt	81,4	58,6	104,4	64,5

Tabelle 9: Mittlere Bestandsdauer

Tabelle 9 zeigt die Summe der Zeitanteile ohne Belastungsverschiebung, d.h. von der Freigabe in die Produktion bis zur Lieferung der ersten Teilmenge an einen Folgebedarf. Dabei erreicht EDS-A mit 58,6 Tagen nur 90% der Bestandswerte von JBS-O.

JBS-O wiederum kann durch die minutengenaue Anpassung von Bedarf und weiteren Vorgängen im Rahmen der Rückwärtsplanung (und in dieser Gruppe werden die weitaus meisten Aufträge rückwärts geplant) die Bestände ebenfalls verringern, erreicht aber dennoch nicht das Niveau von EDS-A.

Leider durften aus Datenschutzgründen keine monetären Bestandswerte verwendet werden. Weiterhin gibt es – unabhängig von Fragen der PPS – andere Faktoren wie Obsoleszenz, Absagen von Kunden etc. welche das Inventar erhöhen. Dennoch erreicht die Auftragsfreigabe ihr Ziel, Liegezeiten in eine Belastungsverschiebung zu verwandeln und ist sogar geringfügig besser als JBS-O.

8.4 Quantitative Ergebnisse – Robustheit

Dieser Abschnitt untersucht wie sich Störgrößen (Störungslevel, Art der Abweichungen usw.) sowie Steuergrößen (verwendeter Algorithmus und dessen Parametrierung) auf die Robustheit der Planung auswirken. Zunächst wird im Rahmen eines Vorversuchs am Beispiel von EDS-E untersucht wie sich verschiedene Störungen grundsätzlich auswirken. Dabei werden auch die grundsätzlichen Analysemethoden und Überlegungen vorgestellt. In den nächsten Untersuchungen wird der Einfluss der Algorithmen und schließlich ihrer Parametrierung untersucht. Bei allen Analysen muss beachtet werden, dass die einzelnen Planungsläufe durch die zufälligen Elemente der Produktionsabweichungen beeinflusst werden. Voruntersuchungen zeigen jedoch, dass diese stochastischen Einflüsse für ein gegebenes Szenario die Termintreue nur um wenige Prozentpunkte verändern und damit auf komplexe statistische Verfahren verzichtet werden kann.

8.4.1 Einfluss des Produktionsabweichungen auf EDS-E

Einfluss der Szenarien

Zunächst wird der Einfluss der Störungen auf die Termintreue von EDS-E untersucht. Dazu werden die Szenarien 00-00-00 (keine Planabweichungen), 30-15-30, 60-30-60 sowie 100-50-100 verglichen. Im Fall von 60-30-60 schwankt die Kapazität und Lieferzeit um $\pm 30\%$, die Wahrscheinlichkeit für eine Auftragsstörung beträgt ebenfalls 30%. Die ursprüngliche, deterministische Planung der Liefertermine ist in allen Szenarien identisch. In der Einzel- und Kleinserienfertigung ist eine minutengenaue Lieferung weder wünschenswert noch möglich. Deshalb wird die Termintreue im Folgenden definiert als der Anteil des Umsatzes, der maximal 24 Stunden nach dem ursprünglich geplanten Datum geliefert wird.

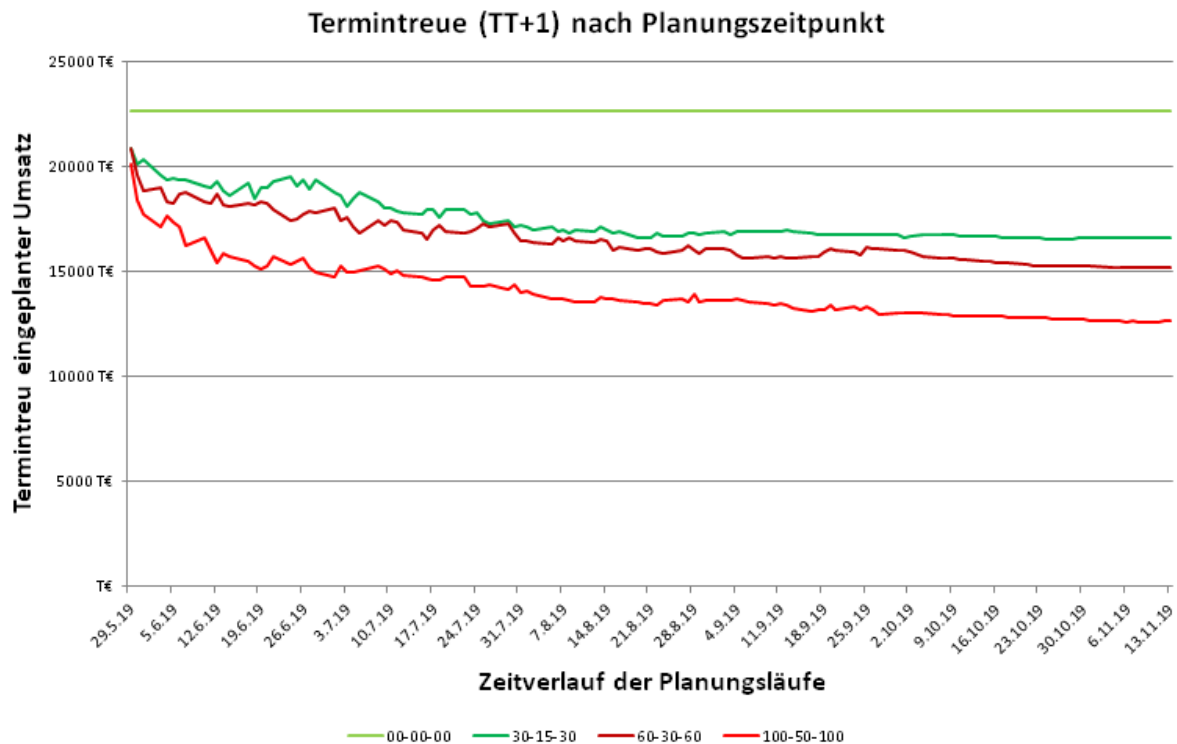


Abbildung 36: Termintreue EDS-E mit verschiedenen Szenarien im Zeitverlauf

Abbildung 36 stellt den Umsatzanteil termintreuer Aufträge im Laufe der Abweichungssimulation dar. Sie zeigt den Umsatz, der am jeweiligen Tag noch termintreu eingeplant wurde. Dies beinhaltet sowohl Aufträge, die zum Planungszeitpunkt bereits pünktlich fertig gestellt wurden als auch solche, die noch offen sind, aber pünktlich eingeplant werden. Erwartungsgemäß gibt es ohne Produktionsabweichungen auch keine Terminabweichungen, das Szenario 00-00-00 plant durchgängig alle Aufträge und damit den gesamten Umsatz auf den gleichen Termin wie die Ursprungsplanung am 28.05.2019.

Je stärker die Störungen sind, desto niedriger ist die resultierende Termintreue. Diese fällt zunächst stark ab, stabilisiert sich jedoch ab September in allen Szenarien. Demzufolge wird die Abweichungssimulation in allen folgenden Darstellungen bis Mitte November berechnet. Im Szenario 60-30-60 werden Mitte November noch knapp 15 Mio. € (von den 22,6 Mio. Euro Auftragsbestand) termintreu prognostiziert.

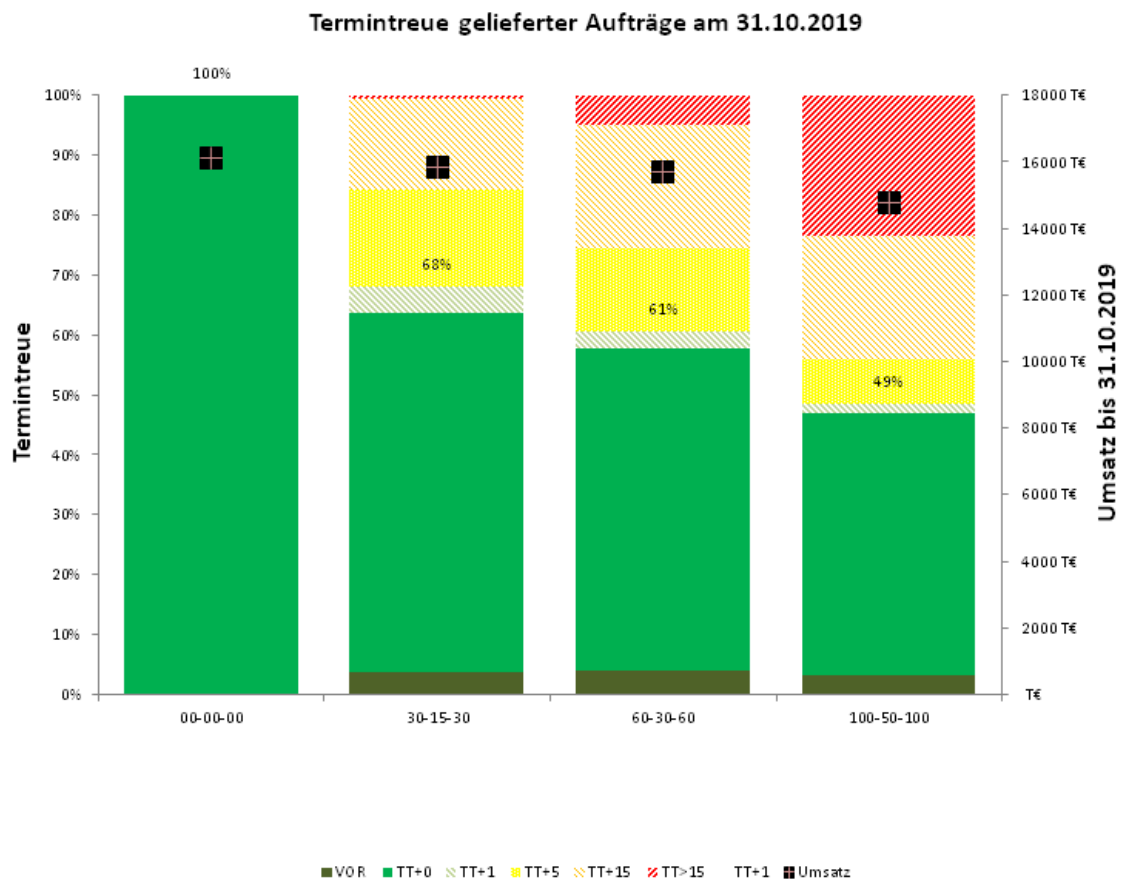


Abbildung 37: Liefertermintreue EDS-E nach Toleranzen

Abbildung 37 schlüsselt den Grad der Lieferterminabweichung auf. Tabelle 10 stellt die wichtigsten Kennzahlen aus dem Diagramm numerisch dar. Betrachtet werden nur Kundenaufträge mit einem Fertigstellungsdatum bis einschließlich 31.10.2019. Dabei bezeichnet VOR vorgezogene Aufträge und die übrigen Abweichungen die Verspätung in Kalendertagen. So beschreibt TT+5 alle Kundenaufträge, die mehr als 1 aber maximal 5 Tage gegenüber der Ursprungsplanung verspätet fertig gemeldet wurden. Die Termintreue entspricht damit der Summe der grün eingefärbten Balken bis einschließlich TT+1 und wird als Prozentwert im Diagramm dargestellt. Der tatsächlich ausgelieferte Umsatz ist auf der Sekundärachse abgetragen und als Markierung gezeigt.

Am 28.05.2019 wurde in allen Fällen 16.104 T€ Umsatz bis Ende Oktober eingeplant. Dieser Umsatz wird im Szenario 00-00-00 realisiert, durch die Störungen fällt der Umsatz mit weiteren Szenarien geringfügig ab. Die Termintreue fällt jedoch deutlich stärker ab, da einerseits Verspätungen teilweise durch vorzeitige Lieferungen kompensiert werden und andererseits auch Aufträge mit signifikanten Terminabweichungen trotzdem noch innerhalb des Planungszeitraums fertig werden.

Szenario	Ist-Umsatz	Anteil am Plan	Termintreue
00-00-00	16.103.921 €	100%	100%
30-15-30	15.849.627 €	98%	68%
60-30-60	15.722.893 €	98%	61%
100-50-100	14.781.862 €	92%	49%

Tabelle 10: EDS-E Kennzahlen in verschiedenen Szenarien

Die Annahmen aus der qualitativen Diskussion bestätigen sich:

- Ohne Produktionsabweichungen werden auch keine Termine verschoben.
- Je stärker die Störungen ausfallen, desto geringer wird die Termintreue.
- Mit zunehmender Simulationsdauer fällt die Termintreue zunächst stark ab, stabilisiert sich jedoch auf einem Niveau, das der Dauer der Fertigungsprozesse und den damit verbundenen Störungen entspricht.
- Der Anteil an negativen Abweichungen ist deutlich größer als der positiven.
- Die Termintreue konvergiert, d.h. doppelt so starke Störungen/ein doppelt so langer Simulationslauf führen keineswegs zu einer Halbierung der Termintreue.
- Störungen wirken sich nicht nur auf die Termintreue, sondern auch den tatsächlich erzielbaren Umsatz und damit die Produktionsleistung aus. Diese Auswirkung ist jedoch deutlich geringer als die Lieferuntreue.

Einfluss der Abweichungsart

In Abbildung 38 wird untersucht, wie sich die Abweichungen im Szenario 30% verteilen. Dazu wurde zunächst nur eine Anpassung der Kapazität um $\pm 30\%$ vorgenommen, dann 30% der Aufträge übersprungen. Danach wurden ausschließlich Bestellzeiten angepasst und schließlich alle Anpassungen gleichzeitig durchgeführt. Die Abweichungen werden dominiert von den auftragsbezogenen Störungen. Dabei ist erkennbar, dass sich die Abweichungen nicht summieren, sondern teilweise sogar kompensieren können.

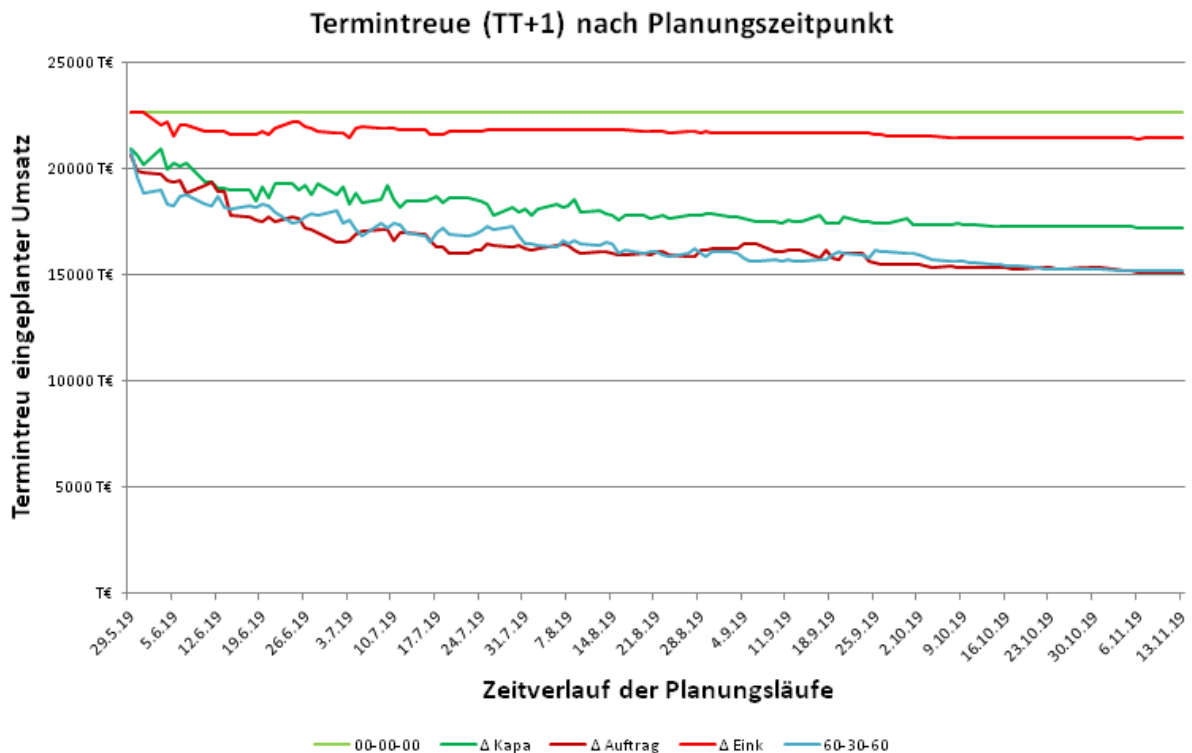


Abbildung 38: Einfluss der Abweichungsart

Der unterschiedliche Einfluss der Abweichungen ergibt sich daraus, dass sich Kapazitäten und Lieferzeiten der Lieferanten maximal um $\pm 30\%$ unterscheiden, in der Regel die Störungen jedoch geringer sind. Auftragsbezogene Störungen führen jedoch mit entsprechender Wahrscheinlichkeit zu einer Verschiebung um 1 Tag pro Vorgang, eine geringere Abweichung ist nicht möglich. Der Gesamteinfluss kann über die Anzahl der Vorgänge auf dem terminbestimmenden Pfad abzüglich der bisher eingeplanten Liegezeiten abgeschätzt werden.

Der verhältnismäßig geringe Einfluss der Einkaufsabweichungen kann dadurch begründet werden, dass kurzfristig lieferbare Teile auch nur eine geringe absolute Abweichung verursachen können während die Effekte von Langläufern teilweise noch gar nicht zum Tragen kamen.

Abbildung 39 zeigt den Grad der Lieferterminabweichung. Während der erzielte Umsatz um weniger als 500T€ (3%) vom Plan abweicht bestätigen sich die deutlichen Unterschiede in der Termintreue die von den auftragsbezogenen Störungen getrieben werden.

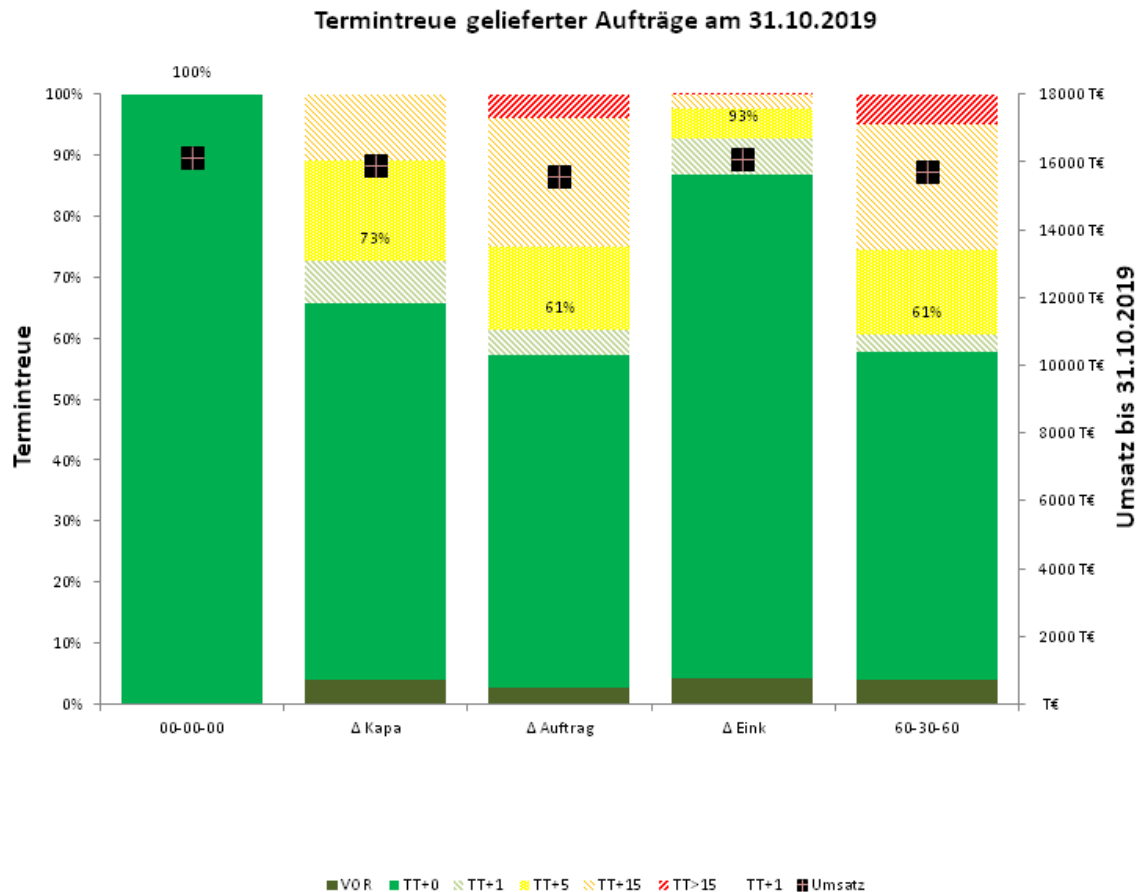


Abbildung 39: Einfluss der Abweichungsart auf EDS-E

8.4.2 Einfluss der Algorithmen

Die wichtigste Fragestellung dieser Dissertationsschrift ist die nach den Vor- und Nachteilen einer ereignisdiskreten Simulation gegenüber herkömmlichen Verfahren. Dieser Abschnitt vergleicht die Auswirkung der implementierten Algorithmen in verschiedenen Szenarien auf die Termintreue, das weitaus wichtigste Kriterium in der Fertigungssteuerung. Zur Einleitung wird die Termintreue im mittleren Szenario 60-30-60 für die verschiedenen Verfahren diskutiert, es folgt eine Betrachtung zu dem Einfluss der stochastischen Effekte und zuletzt eine Gesamtübersicht über alle Szenarien und Algorithmen. In diesem letzten Abschnitt erfolgt die inhaltliche Diskussion der Effekte.

Einfluss der Algorithmen auf das Szenario 60-30-60

Abbildung 40 zeigt am Beispiel des mittleren Szenarios 60-30-60 die Termintreue (maximal 24 Stunden verspätet) im Verlauf der Simulation. Wie erwartet startet JBS-B mit sehr geringen Terminabweichungen, da es nur im Bedarfsfall Aufträge verschiebt. Im Zeitverlauf werden aber immer mehr Aufträge von Störungen betroffen, eine Kompensation ist kaum möglich, da die Kapazitäten bereits anderweitig verplant wurden. Weiterhin fällt auf, dass die EDS-Verfahren ab September stabil ca. 15 Millionen Euro richtig vorhersagen während sich JBS-E und JBS-O erst deutlich später

auf einem Niveau einregeln. Bei JBS-B fällt die Termintreue dagegen im gesamten Untersuchungszeitraum stetig ab.

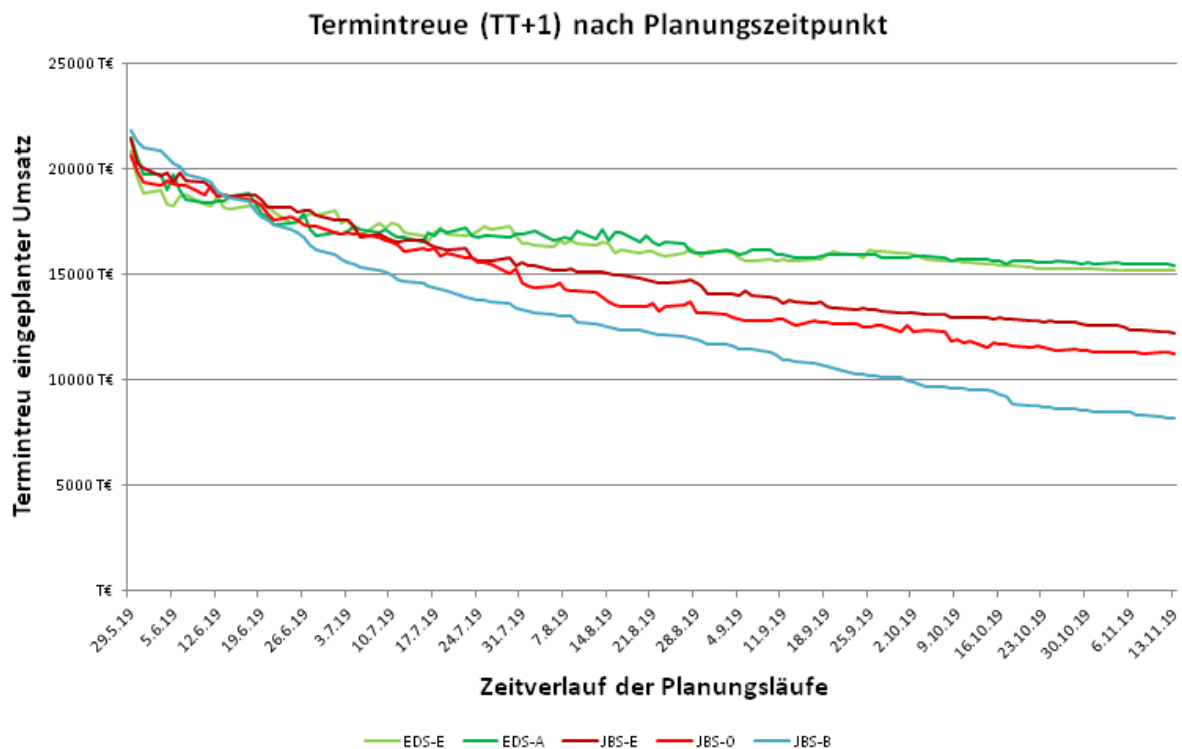


Abbildung 40: Termintreue im Zeitverlauf nach Algorithmus

Abbildung 41 zeigt die Verteilung der Termintreue in diesen Szenarien für die Aufträge, die bis zum 31.10.2019 ausgeliefert wurden. Die EDS-Verfahren erreichen fast identische Werte hinsichtlich Planumsatz (16,1 Mio. €), Termintreue (61% bzw. 62%) und realisierten Umsatz (15,7 bzw. 15,8 Mio. €).

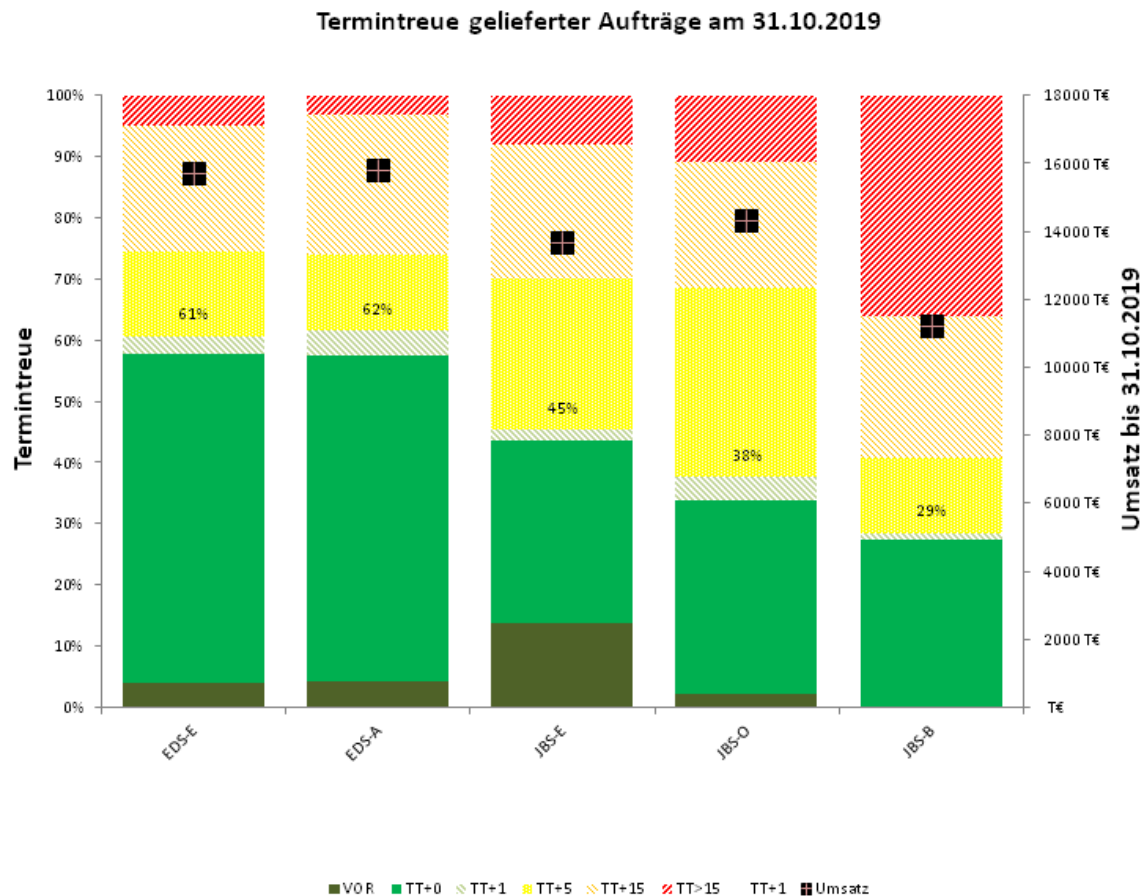


Abbildung 41: Verschiedene Algorithmen im Szenario 60-30-60

In allen Kennzahlen sind sie den lückenbasierten Verfahren JBS-E und JBS-O deutlich überlegen. JBS-B ist in jeder betrachteten Dimension wesentlich schlechter als die übrigen Algorithmen. Der realisierte Umsatz der JBS-Algorithmen ist zwischen 1,5 (JBS-O) und 4,5 (JBS-B) Millionen Euro geringer als der der EDS-Verfahren.

Einfluss der stochastischen Effekte

Während alle Algorithmen in einem Szenario die gleichen Einkaufsabweichungen verarbeiten müssen, unterscheiden sich die Kapazitäts- und auftragsbezogenen Abweichungen mit jedem Durchlauf. Deshalb wurde für jeden Algorithmus das Szenario 60-30-60 dreimal simuliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 42 dargestellt. In dem vorigen Abschnitt sowie allen folgenden Auswertungen wurde für das Szenario 60-30-60 der Durchlauf mit der mittleren Termintreue verwendet. Im Diagramm ist dies mit „STD“ hervorgehoben.

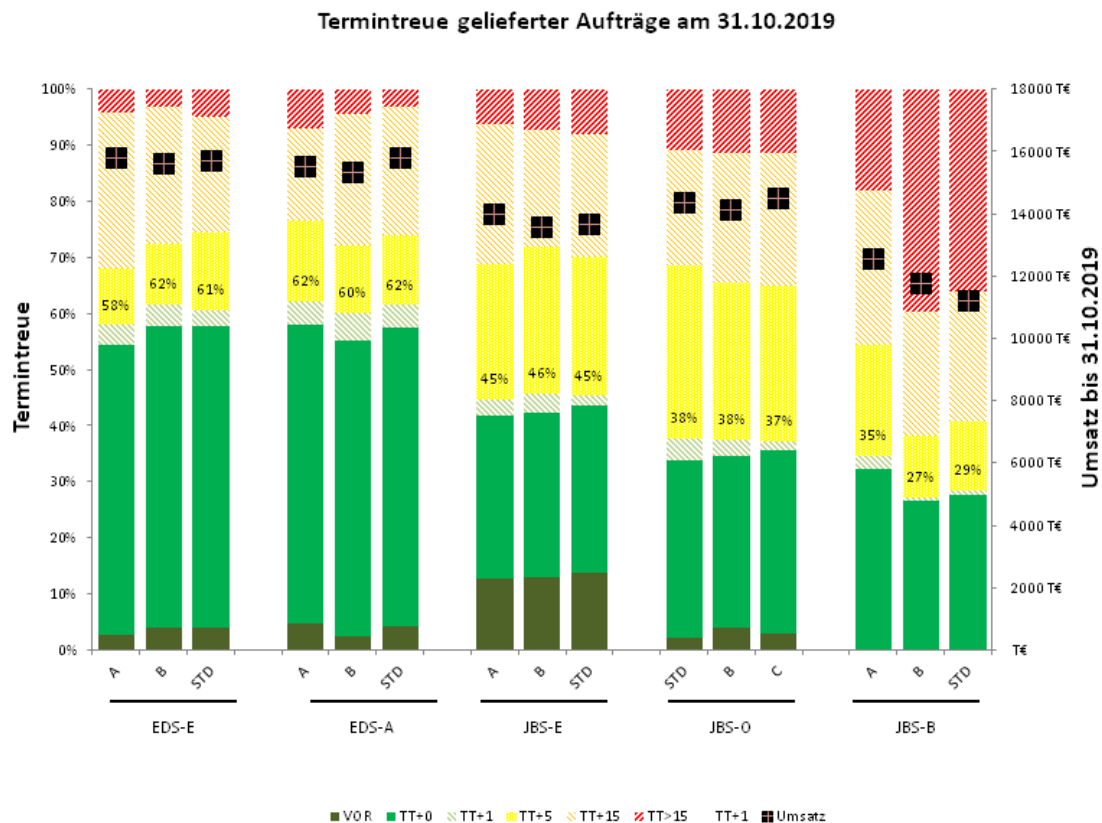


Abbildung 42: Einfluss stochastischer Effekte

Mit Ausnahme von EDS-E (4%-Punkte) und JBS-B (6%-Punkte) liegen die Abweichungen zwischen der minimalen und maximalen Termintreue bei weniger als 2%-Punkten. Die Standardabweichung beträgt in der Regel weniger als 2%-Punkte, am stärksten streut JBS-B mit 4,16%. Auch dies ist jedoch weniger als ein Fünftel der Abweichung zwischen den EDS-Verfahren und JBS-B. Damit sind die Voraussetzungen gegeben, auf eine mehrfache Versuchsdurchführung in weiteren Experimenten zu verzichten (Kleppmann 2013, S. 3).

Auch der realisierte Umsatz weicht - mit Ausnahme von JBS-B – um weniger als 3,5% vom Mittelwert ab. Zusammenfassend ist der Einfluss der stochastischen Effekte deutlich geringer als die Unterschiede zwischen den Algorithmen. Deshalb wurden weitere Szenarien nur einmalig betrachtet.

Vergleich aller Szenarien mit allen Algorithmen

Abbildung 43 erweitert die korrespondierende Abbildung aus dem vorigen Kapitel um den Einfluss der Algorithmen. Die genauen Werte können auch Abbildung 44 entnommen werden. Untersucht werden die Szenarien 00-00-00 bis 100-50-100 für jeweils die Verfahren EDS-E, EDS-A, JBS-E, JBS-O und JBS-B. Die schwarzen Marker auf der Sekundärachse zeigen den erzielten Umsatz, die Prozentzahlen geben die Termintreue (Kategorien VOR, TT+0 und TT+1) an, die farbigen Balken bezeichnen die Verteilung der Termintreue.

In der qualitativen Validierung wurden die Ursachen diskutiert welche dazu führen, dass selbst im Szenario 00-00-00 Terminabweichungen bei den Algorithmen EDS-A, JBS-E und JBS-O auftreten. Mit zunehmender Intensität der Störungen sinken erwartungsgemäß in allen Verfahren Termintreue und Umsatz ab.

In allen übrigen Szenarien weisen die beiden EDS-Varianten eine vergleichbare Termintreue auf welche ca. 20%-Punkte höher ist als die von JBS-O (im Falle von 30-15-30 nur 14%-Punkte zwischen EDS-A und JBS-O). Auch der erreichte Umsatz ist bei EDS höher als im Falle JBS.

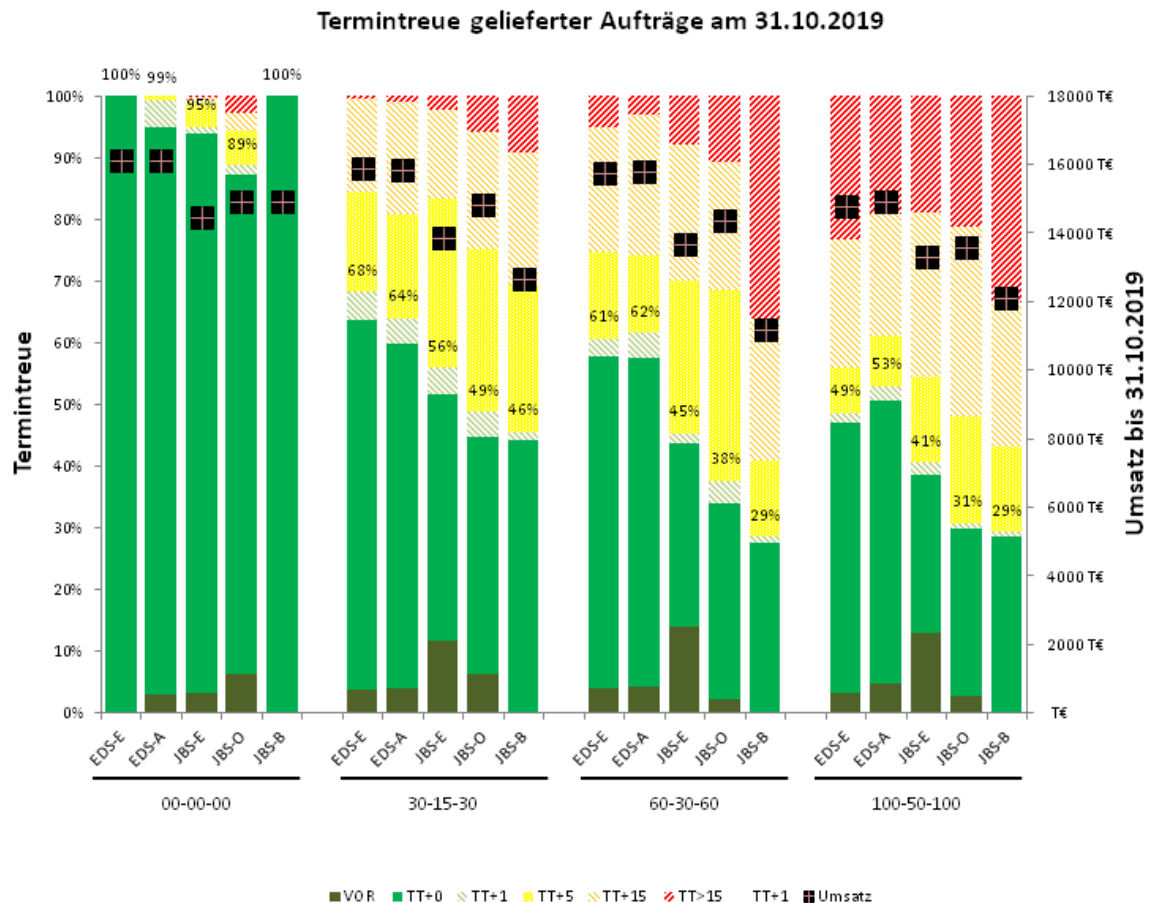


Abbildung 43: Vergleich der Termintreue von Algorithmen

Auf Grund des Versuchsaufbaus plant jeder deterministische Algorithmus einen festen Umsatz für den Betrachtungszeitraum bis zum 31.10.2019 ein (EDS-E und EDS-A jeweils 16,1 Mio. €, JBS-O und JBS-B jeweils 15,0 Mio. € und JBS-E nur 14,4 Mio. €).

	VOR	TT+0	TT+1	TT+5	TT+15	TT>15	TT+1	Umsatz
00-00-00								
EDS-E	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	16.103.921 €
EDS-A	3,1%	91,8%	4,5%	0,7%	0,0%	0,0%	99,3%	16.095.102 €
JBS-E	3,1%	90,6%	1,1%	3,8%	1,0%	0,3%	94,9%	14.434.131 €
JBS-O	6,3%	80,8%	1,6%	5,6%	2,9%	2,8%	88,6%	14.913.762 €
JBS-B	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	14.913.762 €
30-15-30								
EDS-E	3,8%	59,8%	4,6%	16,2%	15,0%	0,6%	68,2%	15.849.627 €
EDS-A	4,1%	55,9%	4,1%	16,7%	18,3%	1,0%	64,0%	15.829.963 €
JBS-E	11,6%	40,0%	4,3%	27,5%	14,3%	2,3%	55,9%	13.827.131 €
JBS-O	6,3%	38,4%	4,0%	26,4%	18,9%	6,0%	48,7%	14.821.683 €
JBS-B	0,0%	44,2%	1,4%	23,7%	21,4%	9,3%	45,6%	12.634.456 €
60-30-60								
EDS-E	4,0%	53,8%	2,8%	14,0%	20,4%	5,0%	60,6%	15.722.893 €
EDS-A	4,2%	53,3%	4,1%	12,6%	22,7%	3,2%	61,5%	15.779.248 €
JBS-E	13,9%	29,7%	1,7%	24,7%	21,9%	8,0%	45,3%	13.672.663 €
JBS-O	2,2%	31,7%	3,7%	30,9%	20,6%	10,8%	37,6%	14.334.372 €
JBS-B	0,0%	27,6%	0,9%	12,4%	23,1%	36,0%	28,5%	11.187.754 €
100-50-100								
EDS-E	3,3%	43,7%	1,6%	7,4%	20,7%	23,3%	48,6%	14.781.862 €
EDS-A	4,7%	45,9%	2,4%	8,2%	19,6%	19,3%	53,0%	14.913.587 €
JBS-E	12,9%	25,6%	2,1%	13,9%	26,7%	18,9%	40,6%	13.306.039 €
JBS-O	2,8%	27,1%	0,8%	17,4%	30,7%	21,2%	30,7%	13.546.371 €
JBS-B	0,0%	28,6%	0,7%	13,9%	23,3%	33,6%	29,2%	12.072.794 €

Abbildung 44: Kennzahlen der Algorithmen

Durch die Planungsfehler, die in Kapitel 8.2.4 diskutiert wurden, plant JBS-E von vorne herein den geringsten Umsatz aller Verfahren ein, die Produktionsabweichungen führen jedoch zu einer ungeplanten, vorzeitigen Lieferung. Dies erklärt den relativ großen Anteil der vorgezogenen Aufträge, die jedoch nicht die von vorne herein geringere Planleistung kompensieren können. Andererseits führen die konservativen Annahmen zu einer etwas höheren Termintreue als JBS-O/JBS-B. Wenn vorzeitige Auslieferungen ebenfalls als negativ betrachtet werden, erreicht JBS-E die geringste Prognosekraft für Liefertermine.

In Summe ist der erzielte Umsatz mit Ausnahme von JBS-B der geringste im Vergleich. JBS-B kann verfahrensbedingt keine Aufträge vorzeitig ausliefern und erzeugt die stärksten Terminabweichungen, da es negative Abweichungen kaum kompensieren weil die bisherigen Ressourcenbelegungen nicht verändert werden.

In den Szenarien 00-00-00 bis 60-30-60 erreichen die beiden EDS-Algorithmen fast ihren geplanten Wert zwischen 15,7 und 16,1 Mio. Euro und damit deutlich mehr Durchsatz als die JBS-Verfahren. JBS-O erreicht in diesen Fällen näherungsweise die (von vorn herein niedrigere) Planleistung, JBS-E und insbesondere JBS-B dagegen brechen auch im erzielten Durchsatz durch die Störungen ein.

Zusammenfassend sind die Prioritätsregeln auch im Bereich einer robusten Lieferterminvorhersage deutlich leistungsfähiger als die JBS-Varianten. Innerhalb dieser Verfahren ist eine komplette Neuplanung deutlich termintreuer als die Reparatur eines bestehenden Planes. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die Freiheitsgrade zur Umplanung nicht zur Rettung von gestörten Aufträgen verwendet werden können. Doch nicht nur die Termintreue oder der eingeplante Umsatz, auch der tatsächlich erzielte Durchsatz ist bei EDS-Verfahren deutlich höher.

8.4.3 Einfluss der Puffer

Nach HOPP und SPEARMAN kann die Termintreue durch die Einplanung von Puffern erhöht werden (Hopp und Spearman 2001, 294ff). Dazu gibt es prinzipiell die Möglichkeiten Bestände, Zeiten und Kapazitäten für unvorhergesehene Zwischenfälle vorzuhalten. Insbesondere in der auftragsbezogenen Fertigung ist das Vorhalten von Beständen mit hohen Risiken durch Obsoleszenz verbunden und prinzipiell nur für Komponenten vor dem Kundenentkoppelungspunkt möglich. Dies jedoch erfordert eine Prognose über zukünftige Bedarfe. Eine tatsächliche Erhöhung der Kapazitäten ist ebenfalls mit Kosten verbunden.

Einfacher ist es deshalb nur einen Teil der Kapazität zu verplanen und längere Übergangs- bzw. Lieferzeiten einzuplanen. Dem geringeren Planumsatz stehen im besten Fall vorzeitige Lieferungen gegenüber so dass die tatsächliche Betriebsleistung nicht beeinflusst wird.

In diesem Abschnitt wird der Einfluss von entsprechenden Parametern untersucht. Als Grundlage dient das mittlere Szenario mit 30%-iger (60-30-60) Störungswahrscheinlichkeit.

Dazu werden folgende Puffer eingeplant:

Name	Erläuterung
BASIS	Basisszenario ohne Puffer
KALL	Alle Vorgabezeiten (Eigen- und Fremd) um 25% erhöht
KSTD	Vorgabezeiten für die Eigenfertigung um 25% erhöht
ZEIT	Verdoppelung der Übergangszeit auf 2 Tage
CONDI	Dynamische Übergangszeit von 1 Tag (vgl. Kapitel 7.7)

Tabelle 11: Untersuchte Pufferstrategien

Die Erhöhung der Kapazitäten (KALL und KSTD) erfolgt dadurch, dass zunächst die entsprechenden Vorgabezeiten in der Schnittstelle mit dem Faktor 1,25 multipliziert werden. In der simulierten Abarbeitung wird die zur Verfügung stehende Kapazität um den gleichen Faktor erhöht. Dadurch werden zunächst weniger Aufträge eingeplant während die Ist-Leistung unverändert bleibt. Dadurch ist zu erwarten, dass einerseits Aufträge vorgezogen und andererseits Verspätungen besser kompensiert werden.

In der Strategie ZEIT wird die Übergangszeit verdoppelt, in der simulierten Abarbeitung steht ein Vorgang jedoch schon nach 1 Tag zur Verfügung. Die Systeme planen also zwei Tage (auch bei folgenden Neuberechnungen), die Produktion kann jedoch früher beginnen. CONDI wiederum wurde nur für die Verfahren EDS implementiert und unterscheidet sich dadurch, dass in der Planung die Übergangszeit bedarfsabhängig gesteuert wird. Sie liegt im Intervall $DLZFix + [0, 2] \times DLZCondi$.

	Planumsatz		Istumsatz		Termintreue	
EDS-E						
BASIS	16.103.921 €		15.722.893 €		60,6%	
KALL	14.715.239 €	91%	15.468.992 €	98%	80,4%	20%
KSTD	14.728.457 €	91%	15.154.391 €	96%	76,4%	16%
ZEIT	14.814.529 €	92%	14.569.169 €	93%	57,3%	-3%
CONDI	14.922.440 €	93%	14.857.298 €	94%	91,2%	31%
EDS-A						
BASIS	16.095.102 €		15.779.248 €		61,5%	
KALL	14.580.562 €	91%	15.182.798 €	96%	82,1%	21%
KSTD	14.724.466 €	91%	15.246.539 €	97%	79,2%	18%
ZEIT	15.046.856 €	93%	14.461.552 €	92%	57,8%	-4%
CONDI	14.998.116 €	93%	14.793.562 €	94%	90,9%	29%
JBS-E						
BASIS	14.398.538 €		13.672.663 €		45,3%	
KALL	13.120.106 €	91%	13.861.049 €	101%	63,4%	18%
KSTD	12.991.443 €	90%	13.751.756 €	101%	57,7%	12%
ZEIT	13.409.984 €	93%	13.097.540 €	96%	47,0%	2%
JBS-O						
BASIS	14.967.203 €		14.334.372 €		37,6%	
KALL	13.958.442 €	93%	14.485.963 €	101%	58,3%	21%
KSTD	13.974.477 €	93%	14.163.844 €	99%	50,7%	13%
ZEIT	14.034.462 €	94%	13.566.550 €	95%	42,2%	5%
JBS-B						
BASIS	14.967.203 €		11.187.754 €		28,5%	
KALL	13.958.442 €	93%	11.552.119 €	103%	33,0%	5%
KSTD	13.974.477 €	93%	11.687.609 €	104%	44,0%	15%
ZEIT	14.034.462 €	94%	12.119.143 €	108%	39,4%	11%

Abbildung 45: Einfluss der Pufferstrategien numerisch

Abbildung 45 zeigt Plan- und Ist-Umsatz sowie die Termintreue der jeweiligen Kombination aus Algorithmus und Parametrierung. Darüber hinaus wird der jeweilige Wert ins Verhältnis zum Wert des Basisszenarios gesetzt.

Erwartungsgemäß führt die Einplanung von allen Arten von Puffern immer zu einer Reduzierung des Planumsatzes (90%-94% des Basisszenarios). Weil die Produktion regelmäßig den Plan übertrifft, leidet der realisierte Umsatz deutlich weniger, in manchen Fällen übersteigt er sogar den des Basisszenarios (92%-108%).

Im Falle der Kapazitätsanpassungen (KALL und KSTD) verringert sich der Ist-Umsatz bei EDS während er im Fall von JBS-* sogar steigt (zwischen 96% und 104% des Basisszenarios). In allen Fällen gibt es eine deutliche Steigerung der Termintreue (zwischen 13 und 21 Prozentpunkte gegenüber dem Basisszenario außer JBS-B). In der Regel sind diese Effekte bei der Betrachtung aller Arbeitsplätze ausgeprägter als wenn nur die Eigenfertigung betroffen ist.

Verlängerte Übergangszeiten (ZEIT) führen zu einer deutlichen Verringerung der Planumsätze, aber auch der realisierten Leistung (92%-96% mit Ausnahme von JBS-B). Dem stehen nur geringe Auswirkungen auf die Termintreue entgegen (-4 bis +5-

Prozentpunkte). Die Systeme können die Potentiale der vorzeitigen Produktion nicht nutzen, da sie stets die exzessiven Übergangszeiten einplanen. Diese Vorgabe führt dazu, dass die Produktion auch keinen Versuch zur Besetzung der entsprechenden Arbeitsplätze unternimmt – der Durchsatz leidet.

Wenn die EDS-Verfahren die verlängerte Übergangszeit proaktiv nutzen können (CONDI) verbessert sich die Termintreue dramatisch (+29 bzw. +31%-Punkte). Prinzipiell bedingt führt diese Strategie jedoch dazu, dass bewusst auf eine vorzeitige Fertigung verzichtet wird, deshalb verringert sich der realisierte Umsatz um 9%.

Zusammenfassend können Puffer die Termintreue wie erwartet zu Lasten des Plenumsatzes erhöhen. Die Verlängerung der Übergangszeiten hat sich als überaus schlecht, das Vorhalten von Kapazitätsreserven als sinnvolle Strategie erwiesen. Die dynamische Zuordnung von Zeitpuffern verringert zwar den tatsächlichen Durchsatz, erreicht aber die größte Verbesserung der Termintreue.

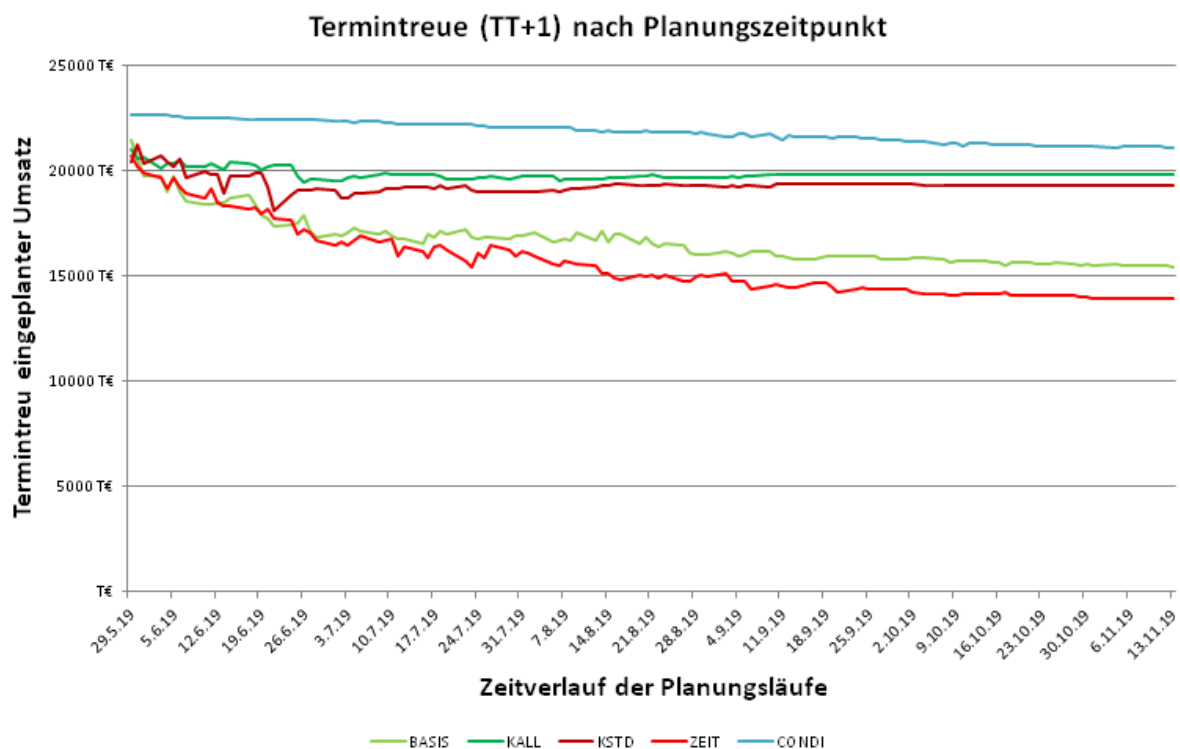


Abbildung 46: Pufferstrategien im Zeitverlauf bei EDS-A

Abbildung 46 zeigt am Beispiel von EDS-A die verschiedenen Strategien im Zeitverlauf. Die verlängerten Übergangszeiten führen zu schlechteren Ergebnissen als das Basisszenario. Die Verwendung von Kapazitätspuffern kann ab Juli die Termintreue auf hohem Niveau stabilisieren. Es ist einleuchtend, dass die Nutzung von Kapazitätsreserven keine Störungen kompensieren kann für Aufträge, die bereits in wenigen Tagen ausgeliefert werden sollen sondern erst auf Dauer zu einer Stabilisierung führt. Auch die anfänglich hohe, aber permanent abnehmende Termintreue bei CONDI ist verständlich. Die Zeitpuffer werden von Anfang an eingeplant, aber im

Zeitverlauf aufgezehrt. Dennoch ist diese Strategie hinsichtlich der Termintreue weit überlegen.

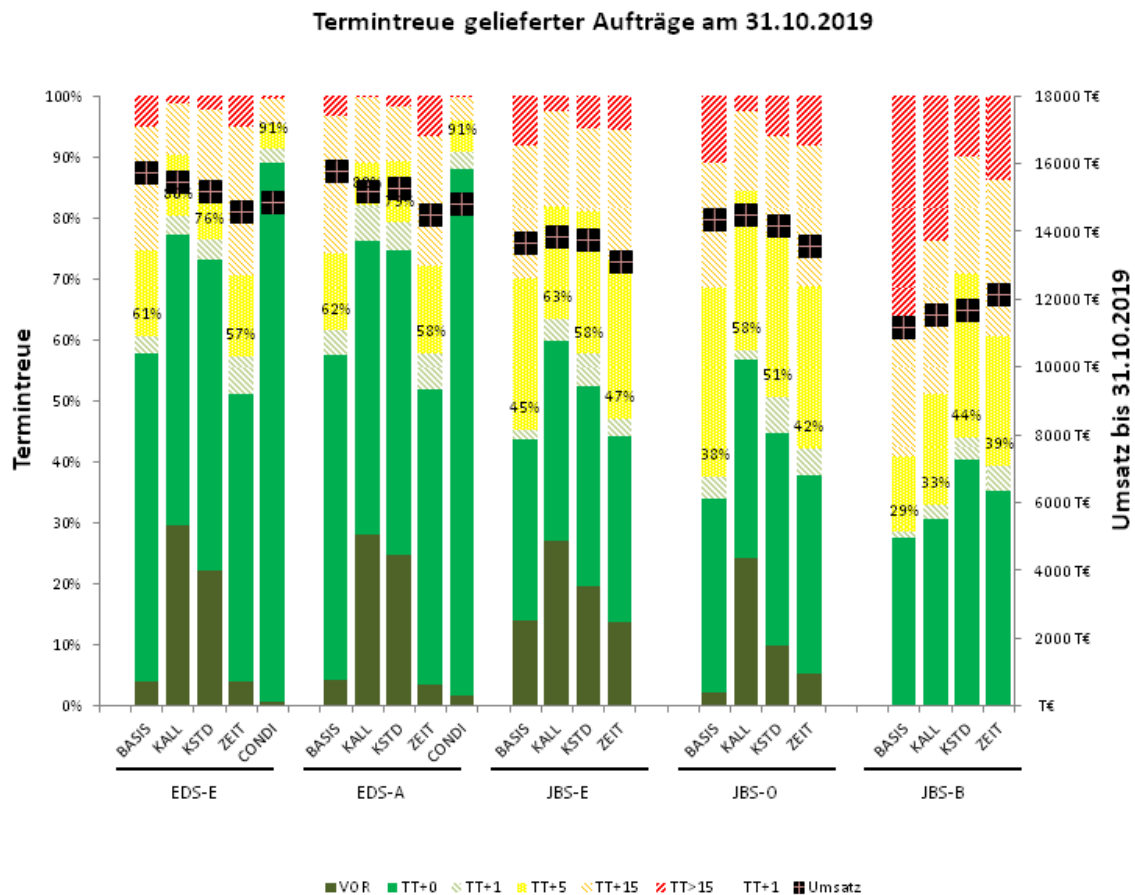


Abbildung 47: Auswirkungen von Puffern

Abbildung 47 präsentiert die numerischen Ergebnisse graphisch. In allen Abweichungskategorien lassen sich die bisher diskutierten Erkenntnisse bestätigen. Die wichtigste neue Erkenntnis ist der Anteil vorgezogener Aufträge. Systembedingt kann JBS-B die bessere Leistung der Produktion nicht nutzen während in allen anderen Fällen die systematische Unterschätzung der Plankapazität zu einer großen Anzahl vorgezogener Aufträge führt.

Demgegenüber erlauben Zeitpuffer nur sehr begrenzt die beschleunigte Fertigung, CONDI verhindert aktiv die vorzeitige Produktion – erhöht damit aber die Termintreue rückständiger Aufträge.

Unabhängig von den Pufferstrategien zeigt sich erneut, dass die EDS-Verfahren im Vergleich zum besten JBS-Verfahren (JBS-O) den gleichen Ist-Umsatz erzielen, aber über 30%-Punkte bessere Termintreue erzielen.

8.5 Praktische Validierungsergebnisse

Das neu entwickelte System wird seit Dezember 2015 operativ bei der Maschinebau AG genutzt. Diese misst ihre Lieferzeittreue in ± 5 Tagen zum zugesagten Liefertermin. Dieser Wert erreicht heute regelmäßig einen 10%-Punkte höheren Wert als bei Projektbeginn.

Das bis 2015 eingesetzte APS Syteline von Infor wurde im Rahmen von mehreren Forschungsarbeiten untersucht. Dieses System arbeitet nach dem oben skizzierten Ansatz JBS.

HAUPTVOGEL untersuchte, in wie weit die Warteschlange vor Anlagen richtig vorhergesagt wurde. Ihre Planungsgüte berechnet sich aus dem Verhältnis von erwarteten zu den tatsächlich vorhandenen Aufträgen in der Warteschlange einer Maschine zu einem definierten Tag (Hauptvogel 2015, S. 124). Sie kam dabei bereits nach 72 Stunden auf eine Güte von weniger als 50% (Hauptvogel 2015, S. 174).

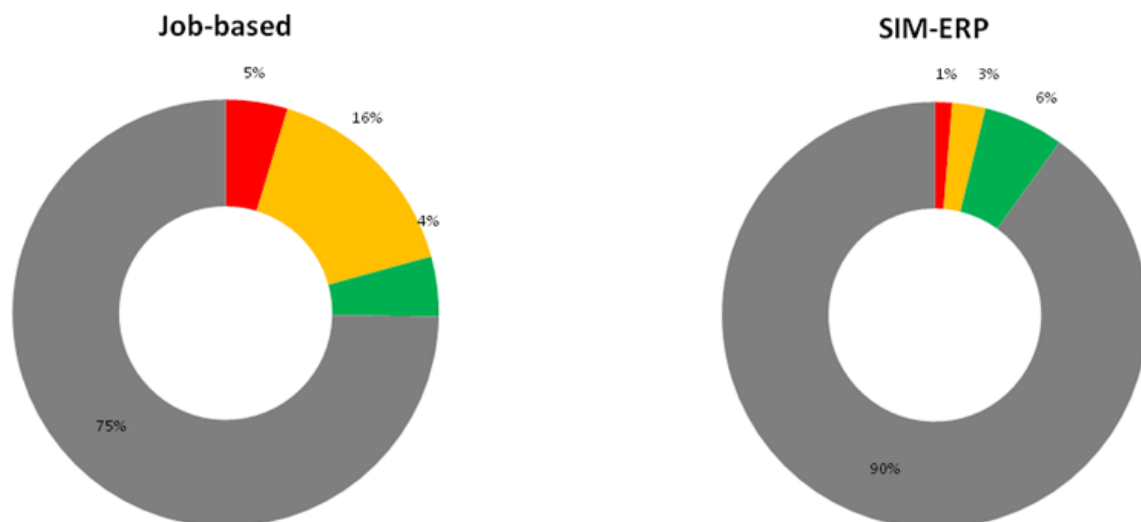


Abbildung 48: Termintreue im praktischen Einsatz bei der Maschinenbau AG

Abbildung 48 wurde aus einem Konferenzbeitrag von STEHR übernommen (Stehr et al. 2018a). Dabei wurden die Termine der Kundenaufträge an zwei aufeinanderfolgenden Tagen verglichen. Das kommerzielle APS „Syteline“ von Infor hatte nach 24 Stunden 25% aller Aufträge verschoben, davon 5% um mehr als 24 Stunden. Die vergleichbaren Zahlen für die neu entwickelte Lösung lagen um den Faktor 4-5 niedriger.

In den Untersuchungen nach HAUPTVOGEL und STEHR sind allerdings einige Einschränkungen zu betrachten:

Syteline APS unterstützt keine Planung von Mehrmaschinenbedienung und Qualifikationsmatrix. Deshalb wurden dort gröbere Annahmen getroffen und Personalverfügbarkeiten nur unzureichend gepflegt. Um die Versorgung von Startbereichen mit Aufträgen sicherzustellen wurden die Kapazitäten im alten APS viel zu hoch angenommen. Zuletzt richtete sich natürlich auch die tatsächliche Abarbeitungsreihenfol-

ge zum Untersuchungszeitpunkt nach den Ergebnissen der ereignisdiskreten Simulation. Das alles erklärt, dass die Unterschiede zwischen den Systemen in dieser Untersuchung noch wesentlich größer ausfallen als in dem systematischen Vergleich in diesem Kapitel.

Neben der Qualität des eigentlichen Algorithmus spielt aber auch die Benutzerführung eine große Rolle. Im Forschungsprojekt PROSENSE wurde unter anderem untersucht, wie lange Fertigungssteuerer zur Beantwortung der Frage: „Warum ist der Kundenauftrag 180242, Position 10, verspätet?“ benötigen (Schuh und Fuß 2015, 125ff; Stehr 2018). Dabei wurden mindestens 50 Klicks, durchschnittlich 4 Programme genutzt und insgesamt 5-10 Minuten aufgewandt. Mit dem Vorgehen, welches in Kapitel 5.2.1 beschrieben wurde, können heute in wenigen Stunden mehrere Hundert Kundenaufträge untersucht und bewertet werden. Dies führt dazu, dass seit 2015 nicht nur einzelne kritische Aufträge überprüft werden, sondern das gesamte Produktionsprogramm mehrmals pro Woche auf Engpässe durchforstet und entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

In einer weiteren Untersuchung der Augenbewegungen zeigte sich, dass die neu entwickelte Benutzerführung gemeinsam mit dem BI-System Qlikview die geringsten Augenbewegungen erfordert um eine Information zu lokalisieren (Schuh und Fuß 2015, S. 128).

8.6 Zwischenfazit

Es wurden die Algorithmen JBS („Job-based-Sequencing“) und EDS („Ereignisdiskrete Simulation“) implementiert. Beide Systeme wurden mit einigen Verfahrensvarianten auf das gleiche Planungsproblem eines mittelständischen Maschinenbauunternehmens angesetzt. Dazu wurden 5 Algorithmen X (4 Störlevel + 4 Pufferstrategien), insgesamt also 40 Experimente zuzüglich einiger Vorversuche durchgeführt. In Summe waren deutlich über 1.000 Stunden Rechenzeit notwendig, davon der weitest- aus größte Teil für die Berechnung der JBS-Verfahren.

Es zeigt sich, dass EDS um den Faktor 44 schneller rechnet (1 Minute im Vergleich zu 44 Minuten) und dabei geringfügig mehr Umsatz bei höherer Auslastung plant. Erwartungsgemäß erzielt die Variante JBS-E einen deutlich geringeren Durchsatz.

JBS-O und EDS-A erreichen aus unterschiedlichen aber nachvollziehbaren Gründen sehr niedrige Bestandswerte (sowohl Lager als auch WIP) während EDS-E und JBS-E insbesondere Materialengpässe nicht antizipieren und damit lange Liegezeiten erzeugen.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Robustheit der prognostizierten Liefertermine gegenüber Störungen. Dazu wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, welche im Wechsel eine Planung ausführt und deren Abarbeitung simuliert. Dabei entstehen stochastische Abweichungen. Diese beziehen sich auf die Lieferzeit von Einkaufsteilen, Kapazitäten für die Eigenfertigung und auftragsbezogene Störungen. Grundlage

der Berechnung ist das Produktionsprogramm der Maschinenbau AG vom 28.Mai 2019. Es wurde der Wechsel von Planung und Abarbeitung bis zum 13.November 2019 berechnet.

Dabei zeigte sich erwartungsgemäß, dass mit zunehmender Intensität der Produktionsabweichungen sowie zunehmender Dauer der Simulation die Abweichung zu den ursprünglich geplanten Terminen zunimmt. Dabei wirken sich negative Produktionsabweichungen systematisch stärker auf die Ergebnisse aus als positive Überraschungen. Die Termintreue fällt jedoch nicht kontinuierlich, sondern stabilisiert sich langfristig auf einem Niveau, dass von der Komplexität der Produktion eines Auftrages (d.h. den beteiligten Komponenten und Arbeitsgängen) sowie dem Umfang der Störungen abhängt.

Zwischen den Algorithmen konnten deutliche Unterschiede festgestellt werden. Die EDS-Verfahren erreichen untereinander eine vergleichbare Termintreue, welche aber ca. 20%-Punkte besser ist als in den bisher eingesetzten JBS-Verfahren. Darüber hinaus fällt auch der tatsächlich erzielte Umsatz höher aus als bei den JBS-Varianten. JBS-B, die bedarfsorientierte Einplanung, hat sich wie theoretisch erwartet als weitaus schlechtestes System gezeigt. Eine Neuplanung kann die Möglichkeiten deutlich besser nutzen als eine Reparatur des bestehenden Planes.

Neben der Termintreue unterscheidet sich auch der in der Simulation erzielte Umsatz. Das neue Verfahren EDS-A erreicht in den untersuchten 5 Monaten stets eine Million Euro Umsatz mehr als das in dieser Hinsicht beste JBS-Verfahren (JBS-O). Entsprechend der Gewinn- und Verlustrechnung der Maschinenbau AG 2018 entfällt ca. 1/3 des Umsatzes auf Materialkosten. Eine Erhöhung des Umsatzes um 2 Mio. Euro im Jahr würde – bei weitgehend fixen sonstigen Kosten – somit das Betriebsergebnis um 1,3 Mio. Euro erhöhen. Bezogen auf den Jahresüberschuss entspricht dies einer Steigerung um 50% (Bundesanzeiger 2018).

Die Einplanung von Zeit-, Kapazitäts- und Bestandspuffern ist unabhängig vom verwendeten Algorithmus ein bewährtes Mittel zur Erhöhung der Termintreue. Der Einfluss dieser Pufferstrategien auf Plan-, Istleistung und Termintreue wurde für die verschiedenen Algorithmen untersucht. Die Bevorratung von Beständen erfordert eine gründliche Planung um das Risiko von Ladenhütern zu vermeiden. Dagegen können die rechnerisch verwendeten Übergangszeiten und Kapazitäten in fast allen Systemen einfach und pauschal angepasst werden. Erwartungsgemäß verlängert sich durch die Unterplanung der Kapazitäten die Planlieferzeit, die Termintreue steigt während der Ist-Durchsatz sich nur geringfügig ändert. Eine simple Erhöhung der Übergangszeit jedoch führt im Wesentlichen zu den skizzierten negativen Effekten während es nur einen geringen Einfluss auf die Termintreue gibt und auch der realisierte Umsatz leidet. Dagegen ist die neu entwickelte Methode der dynamischen Übergangszeiten in der Lage, die Termintreue deutlich zu steigern – allerdings zu Lasten des erzielten Umsatzes. Dieser sinkt, da auch vorzeitige Lieferungen verhindert werden.

Diese Effekte wurden auch durch den praktischen Einsatz bei der Maschinenbau AG bestätigt, bei dem die reale Termintreue durch den Einsatz der neu entwickelten Algorithmen um ca. 10%-Punkte gesteigert werden konnte. Neben der robusten Lieferterminprognose spielte dabei die Verbesserung der Benutzerführung eine wesentliche Rolle. Während die Analyse von einem Kundenauftrag im alten System ca. 5-10 Minuten dauerte, wird heute routinemäßig der gesamte Auftragsbestand wöchentlich auf Probleme untersucht.

Die EDS ist zusammenfassend a) deutlich schneller in der Berechnung b) plant geringfügig mehr Umsatz und deutlich höhere Auslastung pro Monat ein, c) ca. 20%-Punkte termintreuer als herkömmliche Verfahren und d) erreicht einen ca. 7% höheren Ist-Umsatz als die anderen Verfahren. Sie stellt damit im Kontext der Einzel- und Kleinserienfertigung einen deutlichen Fortschritt dar.

9 Fazit und Ausblick

Das erste Kapitel legt dar, dass a) die Bedeutung von kurzen Lieferzeiten und hoher Termintreue steigt, b) die erfolgreichen Verfahren der Taktfließfertigung und Lean Prinzipien nicht in der Einzel- und Kleinserienfertigung angewandt werden können und deshalb dem Einsatz von Software zur Produktionsplanung eine große Bedeutung zukommt.

In den Kapiteln 2 und 3 wurden Begriffe und Kennzahlen definiert und alternative Lösungen zur Produktionsplanung vorgestellt. In der mehrstufigen Einzel- und Kleinserienfertigung sollte eine Produktionsplanung simultan Material-, Personal- und Maschinenkapazitäten betrachten um Liefertermine robust – auch bei Produktionsabweichungen – vorherzusagen. Für diese Multi-Ressourcen-Planung gegen begrenzte Kapazitäten kommen prinzipiell die Suche nach Lücken in den Belegungen („Job-Based-Sequencing, JBS“) sowie Prioritätsregeln bzw. ereignisdiskrete Simulation („EDS“) in Frage. Insbesondere bei JBS-Verfahren wird in der Literatur auf die Problematik von fehlender Planungsrobustheit und –Stabilität hingewiesen. Darunter wird verstanden, dass bereits geringfügige Produktionsabweichungen zu deutlichen Verschiebungen der prognostizierten Liefertermine führen.

Die EDS wurde sehr erfolgreich in der Dimensionierung und Simulation von Produktionssystemen auch mit stochastischen Störungen eingesetzt, ist aber bis heute nur bedingt für die Koordination von Aufträgen über mehrere Dispositionsstufen geeignet. In den Kapiteln 5 bis 7 wurden die dafür notwendigen Prozess- und Datenstrukturen und Verfahrenserweiterungen beschrieben.

Konkret handelt es sich dabei um eine Prioritätsregel, die Dringlichkeit und Wichtigkeit eines Auftrages unterscheidet und ein neues Verfahren zur Auftragsfreigabe. Dieses koordiniert Auftragsnetzen über mehrere Fertigungsstufen hinweg. Daneben wurden Module zur Optimierung der Personaleinsatzplanung mit Hilfe einer Verbesserungsheuristik und zur Dämpfung von Produktionsabweichungen vorgestellt.

In Kapitel 8 wurde ein JBS-Verfahren implementiert und mit dem neu entwickelten Algorithmus auf Basis der EDS verglichen. Dazu wurde das tatsächliche Produktionsprogramm eines größeren Maschinenbauunternehmens als Ausgangsbasis verwendet und die Auswirkung von Produktionsabweichungen simuliert. Die wesentlichen Erkenntnisse sind folgende:

- Sämtliche Verfahrensvarianten planen zwischen 80% und 90% des theoretisch möglichen Umsatzes ein, die Unterschiede zwischen den Algorithmen sind gering. Die Prioritätsregeln sind jedoch durchgängig etwas leistungsstärker.
- EDS-Verfahren lasten die Produktion ca. 25% stärker aus als die JBS-Ansätze.

- Die Bestände sind bei EDS-E sehr hoch, dies war ein Hauptkritikpunkt an bestehenden prioritätsbasierten Ansätzen - die neue Auftragsfreigabe reduziert das Inventar jedoch noch geringfügig stärker als das dahin gehend erfolgreiche JBS auf den geringsten Wert aller Verfahren.
- Die EDS-Verfahren sind deutlich schneller in der Berechnung (Faktor 40).
- Produktionsabweichungen führen grundsätzlich dazu, dass sich der realisierte Umsatz geringfügig und die Termintreue deutlich verringert.
- Die EDS-Verfahren sind dabei jedoch in allen Szenarien ca. 20%-Punkte termintreuer als die Varianten von JBS.
- Sie erreichen dabei einen 6-7% höheren tatsächlichen Umsatz als JBS – dieser Effekt kann das Betriebsergebnis überproportional steigern.
- Grundsätzlich ist eine Fixierung der Aufträge nicht zielführend, da sich die aufgestauten Abweichungen schließlich in umso größeren Plananpassungen entladen. Stattdessen sollten Aufträge täglich neu geplant werden.
- In allen Verfahren profitiert die Termintreue von der Unterplanung der Kapazität um Produktionsabweichungen zu kompensieren. Während die Plantermine später ausfallen, wird die Ist-Leistung kaum beeinflusst.
- Die Einplanung von verlängerten Übergangszeiten ist kontraproduktiv, die neu entwickelte Strategie von dynamisch vergebenen Puffern dagegen kann die Termintreue um fast 30%-Punkte erhöhen, allerdings zu Lasten des tatsächlich gelieferten Umsatzes.

Diese grundsätzlichen Erkenntnisse wurden in der praktischen Umsetzung bestätigt und werden durch Arbeiten aus der Literatur zu Teilproblemen untermauert.

In den Kapitel 1.3 und 4 wurden die wissenschaftstheoretischen Anforderungen an eine Dissertationsschrift definiert. Im Begründungszusammenhang nach ULRICH muss eine Arbeit empirisch nachvollziehbar und im Verwendungszusammenhang gesellschaftlich relevant anwendbar sein. Die Nachvollziehbarkeit ergibt sich einerseits aus der Untersuchung an einem realen Unternehmen und der Offenlegung der entsprechenden Verfahren andererseits. Damit können Dritte die Lösung auf ihre Eignung in weiteren Szenarien testen und ggf. die Hypothese falsifizieren. Die Anwendbarkeit ist mit Verweis auf die wirtschaftliche Bedeutung des verarbeitenden Gewerbes einerseits und die bestehende Verbreitung von Softwaresystemen zur Planung andererseits zu bejahen. Nach PATZAK muss eine Validierung der Arbeit mehrere Anforderungen erfüllen. Die formale und empirische Richtigkeit des Algorithmus wurde durch entsprechende Tests sichergestellt, Produktivität, Handhabbarkeit und geringer Aufwand in der Bedienung wird implizit durch die mittlerweile 4-jährige Einsatzzeit im operativen Betrieb belegt.

Die Forschungsfrage aus Kapitel 1.2 lautete:

Wie können die Vorteile einer DES für operative Produktionsplanung im Umfeld von mehrstufiger Einzel- und Kleinserienfertigung genutzt werden?

Als Ergebnis aus Literaturrecherche, der Validierung gegen ein eigens implementiertes Planungssystem auf Basis von JBS und den praktischen Erfahrungen zeigt sich, dass der Einsatz der EDS im genannten Einsatzfeld möglich ist. Darüber hinaus zeigen sich insbesondere bei der Robustheit der Lieferterminvorhersagen deutliche Vorteile gegenüber bestehenden Systemen auf Basis von JBS. Das vorgestellte Softwaresystem ist in der Lage, automatisiert die Auftragsfreigabe, Reihenfolgenbildung und Kapazitätssteuerung durchzuführen und damit simultan die Material-, Personal- und Maschinenverfügbarkeit sicherzustellen. Die Leistung des Algorithmus ist in jeder untersuchten Dimension besser als die bisher eingesetzten JBS-Verfahren.

Relevante Einflussgrößen sind die zur Verfügung stehenden Kapazitäten und Materialbestände auf der Angebotsseite und die Ressourcennachfrage in Form von Aufträgen, Arbeitsplänen/Stücklisten andererseits. Bis auf die Kapazitäten finden sich all diese Daten in tabellarischer Form in gut gepflegten ERP-Systemen, Kapazitäten können jedoch mit moderatem Pflegeaufwand ergänzt werden.

Das Zielsystem besteht im Wesentlichen darin, die zur Verfügung stehenden Material- und Kapazitätsressourcen möglichst effizient zu nutzen um den Auftragsbestand in möglichst großem Umfang zum Kundenwunschtermin, also so früh wie möglich, zur Verfügung zu stellen. Dadurch wird den weitgehend fixen Kosten der Fabrik ein möglichst hoher variabler Umsatz entgegengestellt.

Um dieses Ziel zu erreichen, sollten die volle zur Verfügung stehende Kapazität und möglichst kurze Übergangszeiten eingeplant werden. Dies reduziert aber naturgemäß die Termintreue. Andererseits sollte der entstandene Plan aber auch unter stochastischen Störungen noch realistische Liefertermine prognostizieren. Dieses Dilemma kann abhängig von der Unternehmensstrategie durch die Einplanung von zusätzlichen Puffern realisiert werden.

Die Untersuchung zeigt, dass die (neu erweiterte) ereignisdiskrete Simulation die Grenze der Planung verschiebt und bei gleichen Pufferzeiten besser die logistischen Ziele (Auslastung, Bestände, Lieferzeiten) erreicht bei wesentlich höherer Termintreue. Dies erreicht sie einerseits durch den verbesserten Algorithmus, aber auch eine veränderte Einbettung in die Arbeitsprozesse der Fertigungssteuerung.

9.1 Ausblick

Diese Untersuchung hat sich auf einen Datensatz konzentriert. Die Validierung könnte einerseits an anderen praktischen Unternehmen und in Konkurrenz zu tatsächlich eingesetzten kommerziellen Softwarepaketen erfolgen. Alternativ wäre es wünschenswert, synthetische Szenarien zu entwickeln um systematisch den Einfluss von Auslastung/Kapazitätssituation, Art der Engpässe usw. zu untersuchen. In diesem Zusammenhang könnten auch Vorschläge für die Parametrierung von Zeit-, Material und Kapazitätsreserven entwickelt werden. Somit würden die Leistungsunterschiede für verschiedene Produktionsumgebungen besser prognostizierbar.

Weitere Arbeiten sollten untersuchen, wie sich Ausschuss und neu eintreffende Kundenaufträge auf die Planungssituation auswirken. Beides erfordert jedoch eine Interaktion mit dem ERP um neue Bedarfsdecker zu erzeugen. Ersatzweise können bestehende Aufträge kopiert und mit neuen Auftragsnummern eingefügt werden.

Neben dieser verbesserten Validierung sollten weitere Entscheidungsvariablen eingeführt werden. Dies beinhaltet vordringlich den Tausch von Materialreservierungen und ggf. die Beeinflussung der Auftragserzeugung. Der Autor hat in einem Beitrag ein mögliches Szenario vorgestellt, wie ERP und APS besser gekoppelt werden können (Stehr et al. 2018b; Stehr und Reschke 2018).

Aus den praktischen Erkenntnissen in der Einführung eines Softwareprojektes hat sich gezeigt, dass es auch im Bereich der Benutzerführung und deren Schulung sowie grundsätzlich der Akzeptanz von Systemvorschlägen noch Verbesserungspotential gibt.

Literaturverzeichnis

Bangsow, S.: Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk, Hanser Verlag, München, 2011

Baum, H-G: Strategisches Controlling. 5., überarb. und erg. Aufl. ,Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2013

Blazewicz, J. et al: Handbook on Scheduling. From Theory to Practice. 2 Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2019

Blum, M: Der Digitale Schatten in der Auftragsabwicklung in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Schriftenreihe Rationalisierung, Bd 163, Hrsg.: G. Schuh. Shaker, Aachen 2008. - Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2019

Bothe, M.; Nissen, V. (Hrsg.): SAP APO® in der Praxis. Erfahrungen mit dem Supply Chain Management-Werkzeug nutzen, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2003

Bretzke, W-R.: Die Logik der Forschung in der Wissenschaft der Logistik. Eine vergleichende Analyse auf wissenschaftstheoretischer Basis, Springer Vieweg, Berlin-Heidelberg, 2016

Bronner, A: Industrielle Planungstechniken. Unternehmens-, Produkt- und Investitionsplanung, Kostenrechnung und Terminplanung, Springer, Berlin, 2001.

Bundesanzeiger (Hrsg.): <http://bundesanzeiger.de>, zuletzt abgerufen am 30.06.2020.

Davis, F; Kottemann, J: User Perceptions of Decision Support Effectiveness. Two Production Planning Experiments. In: *Decision Sciences* 25 (1994), S. 57–76

Desmet, B. et al: Safety stock optimisation in two-echelon assembly systems: normal approximation models. In: *International Journal of Production Research* 48 (2010), S. 5767–5781

DESTATIS (Hrsg.): Kostenstruktur der Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Fachserie 4, Reihe 4.3, 2020

DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft (Hrsg.): Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2013

Dickersbach, J.: Supply chain management with SAP APO. Structures, modelling approaches and implementation of SAP SCM 2008, 3te. Auflage, Springer, Berlin u.a., 2019

Dickersbach, J; Keller, G: Produktionsplanung und -steuerung mit SAP ERP. Umfassendes Handbuch zur diskreten Fertigung mit SAP ; Prozesse und Customizing von PP verständlich erklärt ; mit Informationen zu Sonderbeschaffungsformen und zur Integration mit SAP APO, 4te aktualisierte Aufl. , Galileo Press, Bonn, 2014

- Dörner, D: Die Logik des Misslingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen, 14. Auflage. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Rowohlt Taschenbuchverlag, Hamburg, 2017
- Eley, M: Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Springer, Berlin, Heidelberg, 2014
- Engelhardt-Nowitzki, C.; Nowitzki, O.: Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement. Erfolgsfaktoren und Implementierungsszenarien, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2008
- Enns, S. T.: Finite capacity scheduling systems: Performance issues and comparisons. In: *Computers & Industrial Engineering* 30 (1996), S. 727–739
- Fatih T. et al.: Particle swarm optimization and differential evolution for the single machine total weighted tardiness problem. In: *International Journal of Production Research* 44 (2006), S. 4737–4754
- Ford, H; Crowther, S: Mein Leben und Werk. Autobiografie eines modernen Unternehmers, AMRA, Hanau, 2017
- Fransoo, J. et al: Behavioral Operations in Planning and Scheduling. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011
- Genin, P. et al.: How to manage robust tactical planning with an APS (Advanced Planning Systems). In: *J Intell Manuf* 18 (2007), S. 209–221
- Georgi: Job Shop Scheduling in der Produktion, Physica-Verlag, Heidelberg, 1995
- Glover, F et al: Handbook of metaheuristics, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003
- Goldratt, E.; Cox, J.: Das Ziel. Ein Roman über Prozessoptimierung, Erw. Neuausg, Campus-Verlag, Frankfurt/Main, 2003
- Graves, R.; Milne, R.: A new method for order release. In: *Production Planning & Control* 8 (1997), S. 332–342
- Gulyácssy, F.; Vithayathil, B.: Kapazitätsplanung mit SAP®. Langfristige und kurzfristige Kapazitätsplanung implementieren ; Prozesse und Funktionen für alle Branchen ; integrierte Planung mit SAP ERP und SAP APO, Galileo Press, Bonn, 2014
- Günther, H-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. Supply Chain und Operations Management, 12te verbesserte Auflage, Nordersted, 2016
- Günther, M.: Hochflexibles Workforce Management. Herausforderungen und Lösungsverfahren, Zugl-Technische Universität Ilmenau, Diss., 2010
- Hauptvogel, A.: Bewertung und Gestaltung von cyber-physischer Feinplanung. Ergebnisse aus der Produktionstechnik Produktionssystematik, 2015,6, Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2015

- Helber, S: Operations-Management-Tutorial, Helber, Hildesheim, 2014
- Ho , C.-J.: Examining dampening effects for alternative dampening procedures to cope with system nervousness. In: *International Journal of Production Research* 43 (2005), S. 4009–4033
- Hopp, W.; Spearman, M.: Factory physics. Foundations of manufacturing management, 2te Auflage, Irwin/McGraw-Hill, Boston 2002
- Kleppmann, W.: Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren, 8., überarb. Aufl, Hanser, München, 2013
- Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT), Springer, Berlin, 2013
- Krockert, M.: Dynamische Losbildung für eine dezentral geplante und gesteuerte Produktion, 26. Interdisziplinäre Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, 2021.
- Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. 5., durchges. und aktualisierte Aufl, Oldenbourg, München 2003
- Kuyumcu, A: Modellierung der Termintreue in der Produktion, Zugl: Technische Universität Hamburg-Harburg, Diss, 2013
- Kyle, R. G.; Ludka, C. R.: Simulating the furniture industry. In: 2000 Winter Simulation Conference Proceedings, IEEE(2000), S. 1347–1350.
- Lambeck, C; et.al: (Re-)Evaluating User Interface Aspects in ERP Systems -- An Empirical User Study. In: 2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE (2014), S. 396–405
- LFConsult: 3-Liter-PPS: LFConsult. Online verfügbar unter <https://www.lfconsult.de/de/id-3liter-pps.html>, zuletzt abgerufen 08.08.2020
- Lin, W; et al.: An effective algorithm for flexible assembly job-shop scheduling with tight job constraints. In: *Intl. Trans. in Op. Res*(2020)
- Lödding, H.; Wiendahl, H-P.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Zugl.: Hannover, Univ., Habil.-Schr., 2004
- Lu, H. L et al: Integrating order review/release and dispatching rules for assembly job shop scheduling using a simulation approach. In: *International Journal of Production Research* 49 (2011), S. 647–669
- Mönch, L.; Rose O.: Shifting-Bottleneck-Heuristik für komplexe Produktionssysteme: Softwaretechnische Realisierung und Leistungsbewertung, 2004
- Moon, Y.; Phatak, D.: Enhancing ERP system's functionality with discrete event simulation. In: *Industr Mngmnt & Data Systems* 105 (2005), S. 1206–1224

- Munkelt, T; Krockert, M: AGENT-BASED SELF-ORGANIZATION VERSUS CENTRAL PRODUCTION PLANNING. In: 2018 Winter Simulation Conference (WSC). 2018 Winter Simulation Conference (WSC). Gothenburg, Sweden, IEEE(2018), S. 3241–3251.
- Munkelt, T; Krockert, M: An Approach to a Self-organizing Production in Comparison to a Centrally Planned Production. In: *SNE* 30 (2020), S. 23–30
- Omkumar, M.; Shahabudeen, P.: Ant Colony Optimisation for multi-level assembly job shop scheduling. In: *IJMR* 4 (2009), S. 410.
- Ōno, T.: Das Toyota-Produktionssystem. Das Standardwerk zur Lean Production. 3., erw. und aktualisierte Aufl, Campus-Verlag, Frankfurt am Main, 2003
- Orlicky, J: Material requirements planning. The new way of life in production and inventory management, McGraw-Hill, New York, 1975.
- Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Springer, Berlin, Heidelberg, 1982
- Pegden, D.: How Variability Helps Schedulers. Online verfügbar unter <https://www.simio.com/resources/white-papers/Why-Variation-Matters-Scheduling/index.php>, letzter Zugriff 08.08.2020
- Pereira, M.; Santoro, M.: An integrative heuristic method for detailed operations scheduling in assembly job shop systems. In: *International Journal of Production Research* 49 (2011), S. 6089–6105
- Peterson, C: Parallel Distributed Approaches to Combinatorial Optimization: Benchmark Studies on Traveling Salesman Problem. In: *Neural Computation* 2 (1990), S. 261–269
- Pfohl, H-C; Stölzle, W.: Funktionen und Prozesse der Planung. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: WiSt: Zeitschrift für Studium und Forschung* 1996 (5), S. 233–237.
- Pinedo, M.: Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems, 5-te erw. Aufl, Springer, Heidelberg, New York, u.a. 2016
- Pongcharoen, P.; Hicks, C.; Braiden, P. M.: The development of genetic algorithms for the finite capacity scheduling of complex products, with multiple levels of product structure. In: *European Journal of Operational Research* 152 (2004), S. 215–225
- Prajapat, N.; Tiwari, A.: A review of assembly optimisation applications using discrete event simulation. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 30 (2017, 2-3), S. 215–228
- Proth, J. M. et al.: Supply management for cost minimization in assembly systems with random component yield times. In: *J Intell Manuf* 8 (1997), S. 385–403
- Pujawan, I.; Smart, A.: Factors affecting schedule instability in manufacturing companies. In: *International Journal of Production Research* 50 (2012), S. 2252–2266

- Ramasesh, R: Dynamic job shop scheduling: A survey of simulation research. In: *Omega* 18 (1990), S. 43–57
- Reeja, M.; Rajendran, C.: Dispatching rules for scheduling in assembly jobshops - Part 1. In: *International Journal of Production Research* 38 (2000), S. 2051–2066
- Rockwell Automation: Industry Solutions - Manufacturing Simulation Software. Hrsg. v. Rockwell Automation. Online verfügbar unter <https://www.arenasimulation.com/industry-solutions/industry/manufacturing-simulation-software>, zuletzt abgerufen 08.08.2020
- Roy, R.; Meikle, S. E: The Role of Discrete Event Simulation Techniques in Finite Capacity Scheduling. In: *Journal of the Operational Research Society* 46 (1995), S. 1310–1321
- Sander, U: Simultane Kapazitäts- und Reihenfolgeplanung bei variantenreicher Serienfertigung. 1. Aufl. Aachen: Verl. der Augustinus-Buchhandl , Aachener Beiträge zu Humanisierung und Rationalisierung, Bd. 11, Zugl: Aachen, Techn. Hochschule, Diss., 1994
- SAP AG (Hrsg): Verfügbarkeitsprüfung nach ATP-Logik. SAP AG. Online verfügbar unter https://help.sap.com/doc/saphelp_sfin100/1.10/de-DE/6b/77b6535fe6b74ce10000000a174cb4/content.htm?no_cache=true, zuletzt abgerufen 08.08.2020
- Schneider, H. et al: Operative Produktionsplanung und -steuerung. Konzepte und Modelle des Informations- und Materialflusses in komplexen Fertigungssystemen. ,Oldenbourg, München, 2005
- Schuh, G et al: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017 Internet of Production für agile Unternehmen. Apprimus Verlag, Aachen, 2017.
- Schuh, G.; Fuß, C. (Hrsg): ProSense. Ergebnisbericht des BMBF-Verbundprojektes ; hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik, Apprimus Verl., 2015
- Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. 4., überarbeitete Auflage. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2015
- Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg): Produktion am Standort Deutschland. Ergebnisse der Untersuchung 2013. FIR e.V.
- Simini et. al.: Proceedings of the 38th conference on Winter simulation. s.l.: Winter Simulation Conference, 2006
- Srinivasan, G.: Shifting Bottleneck Heuristic, Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=JUz0pCG51DE>, zuletzt geprüft am 01.08.2021
- Stadtler, H.; Kilger, C.: Supply chain management and advanced planning. Concepts, models, software and case studies. Springer, Berlin, 2008

- Statistisches Bundesamt (Hrsg): Statistisches Jahrbuch Deutschland 2018, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2018
- Stehr, E-A: Benutzerführung in der Produktionsfeinplanung, IT+Production, online verfügbar unter <https://www.it-production.com/fertigungsnahe-it/mes-aps-forschungsprojekt-prosense/>, zuletzt abgerufen 01.08.2021
- Stehr, E-A.: API-Salat. Generische Schnittstelle für Produktionssysteme. Generische Schnittstelle für Produktionssysteme. In: *iX* 2018 (9), S. 114, 2018
- Stehr, E-A; Reschke, J.; Schuh, G. (2018a): Discrete Event Simulation – A New Approach to Multi-level Capacitated Planning? In: *Advances in Production Management Systems*, Springer International Publishing, Cham, 2018, S. 425–432
- Stehr, E-A; Reschke, J; Stich, V. (2018b): A New IT Architecture for the Supply Chain of Configurable Products. In: *Advances in Production Management Systems*, Springer International Publishing, Cham, 2018, S. 281–288.
- Stumvoll, U: Überwachung und Verbesserung von Losgrößenmodifikatoren eines PPS-Systems im laufenden Betrieb.
- Tempelmeier, H: Material-Logistik. Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen, 6-te neubearbeitete Aufl, Springer, Berlin 2006
- Tempelmeier, H: Material-Logistik. Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen, 7-te Auflage, Springer, Berlin, 2008
- Trovarit AG (Hrsg): IT-Matchmaker Guide. Advanced Planning & Scheduling - APS, Trovarit AG, Aachen, 2018
- Trovarit AG (Hrsg): Marktspiegel Business Software - MES 2017/18, Trovarit AG, Aachen, 2018
- Ulrich, H.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: *WiSt: Zeitschrift für Studium und Forschung* 1975 (7), S. 305–309
- Ulrich, H.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). In: *WiSt: Zeitschrift für Studium und Forschung* 1976 (8), S. 345–348
- van Donselaar, K.: The use of MRP and LRP in a stochastic environment. In: *Production Planning & Control* 3 (1992), S. 239–246
- van Hoorn, Jelke J.: The Current state of bounds on benchmark instances of the job-shop scheduling problem. In: *J Sched* 21 (2018), S. 127–128
- Voigt, K-I.: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/mehrstufige-produktion-37518/version-260952>. In: *Gablers Wirtschaftslexikon*, 2019
- VDI (Hrsg): VDI 3633 - Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen.

Wang, L; Zheng, D-Z: An effective hybrid optimization strategy for job-shop scheduling problems. In: *Computers & Operations Research* 28 (2001), S. 585–596

Welt Online: Der Mega-Diesel: Mit 13.600 PS übers Wasser, Online verfügbar unter <https://www.welt.de/mediathek/reportage/technik-und-wissen/sendung175871689/Der-Mega-Diesel-Mit-13-600-PS-uebers-Wasser.html>, zuletzt abgerufen 01.08.2020

Wiendahl, H-H.; Kluth, A.: Advanced Planning & Scheduling, Online verfügbar unter <https://www.trovarit.com/service/>, zuletzt abgerufen 01.08.2020

Wink, R. (Hrsg.): Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung. Springer, Wiesbaden, 2013

Wöhe, G; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 25-te, überarbeitete und aktualisierte Auflage. Verlag Franz Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften), München, 2013.

Womack, J.; Jones, D.: Lean thinking. Banish waste and create wealth in your corporation, Free Press, New York, 2013

Womack, J.; Jones, Daniel T.; Roos, D.: The machine that changed the world. Based on the Massachusetts Institute of Technology 5 million dollar 5 year study on the future of the automobile. Rawson, New York, 1990

Zäpfel, G.; Braune, R.: Moderne Heuristiken der Produktionsplanung. Am Beispiel der Maschinenbelegung. Vahlen (WiSo-Kurzlehrbücher Reihe Betriebswirtschaft), München, 2005.

Anhang

MRP

Im entsprechenden Kapitel wurden die Vor- und Nachteile des MRP-Verfahrens vorgestellt. In diesem Anhang wird eine detaillierte Verfahrensanweisung gegeben.

Aus der Produktionsprogrammplanung sind die Primärbedarfe (Kundenaufträge und Vorplanungsbedarfe) bekannt. Jedem Artikel wird eine Dispositionsstufe zugeordnet. Die Produkte der Stufe 0 sind in keiner Stückliste enthalten während die Komponenten auf der untersten Stufe keine weiteren Stücklistenpositionen mehr besitzen. Das Verfahren arbeitet nun der Reihe nach alle Materialnummern sortiert nach Dispositionsstufen ab (Hopp und Spearman 2001, 109ff; Tempelmeier 2006, 114ff).

Zunächst werden der Bruttobedarf einerseits und Bestände sowie fest eingeplante Zugänge (d.h. Plan- bzw. Fertigungsaufträge und Bestellungen) andererseits chronologisch sortiert und verrechnet. Solange Bestände/Zugänge vorhanden sind, werden die Bedarfe gedeckt. Aus dem ungedeckten Bedarf ergibt sich ein Nettobedarf. Dieser wird mit Hilfe von Losgrößenregeln zusammengefasst. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um sehr einfache Verfahren wie geringste und maximale Losgröße, es gibt jedoch auch zahlreiche Verfahren, welche versuchen ein Optimum aus Lagerkosten (durch geringe Losgrößen) und niedrigen Rüstzeiten (durch große Lose mit wenigen Umrüstungen) zu finden. (Günther und Tempelmeier 2016; Tempelmeier 2006). Durch fest hinterlegte Wiederbeschaffungszeiten in den Stammdaten ergibt sich eine Vorlaufverschiebung der (ggf. neu erzeugten) Aufträge, aus den Stücklisten der abgeleitete Sekundärbedarf. Dieser Bedarf wird jetzt auf der nächsten Dispositionsstufe mit erfasst und im weiteren Verlauf des Algorithmus berücksichtigt.

Das Verfahren wird am Beispiel der Erzeugnisstruktur aus Kapitel 2.2.1 erläutert. Darin bestand das Erzeugnis P1 aus dem Einzelteil E1 (2 Stück) und der Baugruppe B1 (3 Stück). Diese wiederum benötigt jeweils 2 Einzelteile E2.

Periode	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Erzeugnis P1 (Dispostufe = 0, Los-für-Los-Fertigung)									
Primärbedarf				50		50			50
Aufgelöster Bedarf			50		50			50	
Baugruppe B1 (Dispostufe = 1, Mindestlosgröße = 200)									
Sekundärbedarf			150		150			150	
Primärbedarf			10	10	10	10	10	10	10
Bestand	250	250	90	80					
Nettobedarf					80	10	10	160	10
Bedarf für Auflösung				200	-	-	200	-	-
Einzelteil E2 (Dispostufe = 2, Mindestlosgröße = 100)									
Sekundärbedarf				600			600		
Primärbedarf			10	10	10	10	10	10	10
Bestand/Zugang	550		100						100
Angepasste Zugänge				100			200		
Bestand	550	550	640	30	20	10			
Nettobedarf							590	10	10
Bedarf für die Auflösung						600		100	

Tabelle: Beispiel für einen MRP-Lauf

Die Tabelle zeigt an diesem Beispiel einen MRP-Lauf. Auf Ebene des Erzeugnisses gibt es keinen Lagerbestand. Der Primärbedarf wird lediglich um eine Periode vorgezogen um die Montagezeit zu berücksichtigen. Diese Vorlaufverschiebung ist im Materialstammsatz hinterlegt. Der Sekundärbedarf der Baugruppe ist auf Grund der Stückliste dreimal so hoch wie der aufgelöste Bedarf der Erzeugnisse. Darüber hinaus gibt es noch einen Primärbedarf, beispielsweise als Ersatzteillieferung. Der Bestand von 250 Stück deckt die Bedarfe bis Periode 3, danach werden die Bedarfe als Nettobedarf übernommen. Der Bedarf für die Auflösung wird wiederum um eine fest hinterlegte Fertigungszeit in die Vergangenheit verschoben. Darüber hinaus werden die Bedarfe entsprechend einer Mindestlosgröße zusammengefasst. Diese Mindestlosgröße erzwingt, dass am Ende von Periode ein Restbestand existiert.

Im Fall von E2 wiederholt sich das Muster. Allerdings existieren hier neben dem Lagerbestand noch Bestellungen die in den Perioden 2 und 8 erwartet werden. Das System prüft zunächst, wie weit der Bestand von 550 Stück reicht. Dies ist bis Perio-

de 3 der Fall. Demzufolge kann die Bestellung aus Periode 2 verschoben werden. Dennoch kommt es in Periode 6 zu einer Unterdeckung. Das Vorziehen der zweiten Bestellung lässt jedoch immer noch einen Nettobedarf offen. Dieser führt entsprechend einer Losgrößenregelung zu zwei neuen Planaufträgen bzw. Bestellanforderungen in Periode 5 und 7 durch die Vorlaufverschiebung (Hopp und Spearman 2001, S. 116).

Pseudocode MRP

- 1 Sortiere Bedarfe nach Bedarfsdatum
 - 2 Sortiere Zugänge incl. Anfangsbestand nach geplantem Zugangsdatum
 - 3 Durchlaufe alle Bedarfe
 - 4 Durchlaufe alle Zugänge
 - 5 Reservierungsmenge $r = \text{MIN}(\text{Zugangsmenge}, \text{Bedarfsmenge})$
 - 6 Reduziere Bedarfsmenge und Zugangsmenge um r
 - 7 Füge ggf. Reservierungsvormerkung ein („Pegging“)
 - 8 Setze Bedarfs-/Verfügbarkeitsdatum
 - 9 Durchlaufe offene Bedarfe (Bedarfsmenge > 0)
 - 10 Erzeuge Planaufträge gemäß Losgrößenregelung
-

Algorithmus: MRP

Das Bild beschreibt die technische Umsetzung. Wenn in Schritt 8 eine Reservierung zustande kommt ($r > 0$), wird das früheste Bedarfsdatum korrigiert. Eine Änderung im Vergleich zum bisher gespeicherten Eckendtermin des Bedarfsdeckers führt zu einer Handlungsaufforderung an den Disponenten (Änderungsmitteilung oder Alarm). Zuletzt werden ungedeckte Bedarfe aufgelöst, indem neue Bedarfsdecker / Planaufträge generiert werden. Die Erzeugung hängt von der Losgrößenstrategie ab, so kann für jeden Bedarf ein Planauftrag erzeugt werden (Lot-for-Lot), eine Zusammenfassung zu einem Los oder diverse Heuristiken/Verfahren angewandt werden, die in der Regel auf einen Ausgleich von Rüstkosten und Lagerbindungskosten abzielen.

Das Verfahren MRP erzeugt mit dieser Logik neue Planaufträge und Änderungsmitteilungen für bestehende Aufträge. Die Umsetzung dieser Änderungswünsche ist Aufgabe der entsprechenden Planer bzw. Disponenten. Wenn die Wiederbeschaffungszeit für die Komponente E2 mehr als 5 Perioden beträgt, kann der Bedarf nicht rechtzeitig gedeckt werden. Das führt zwar zu einer Ausnahmemeldung für das entsprechende Material E2, nicht aber für davon abhängige Bedarfe. Es ist also nicht direkt ersichtlich, dass in dem Falle die Erzeugnisse P1 in Periode 8 nicht pünktlich geliefert werden können.

Shifting Bottleneck Heuristik

Der Algorithmus beruht auf folgenden Überlegungen: Es ist möglich, die Planung einer Maschine mit Prioritätsregeln effizient (wenn auch nicht optimal, dies ist ein NP-hartes Problem) zu lösen. Zweitens hängt die Leistung eines Produktionssystems überwiegend von den Engpassarbeitsplätzen ab. Daher besteht die Grundüberlegung darin, die Maschinen nach ihrer Auslastung sortiert zu planen.

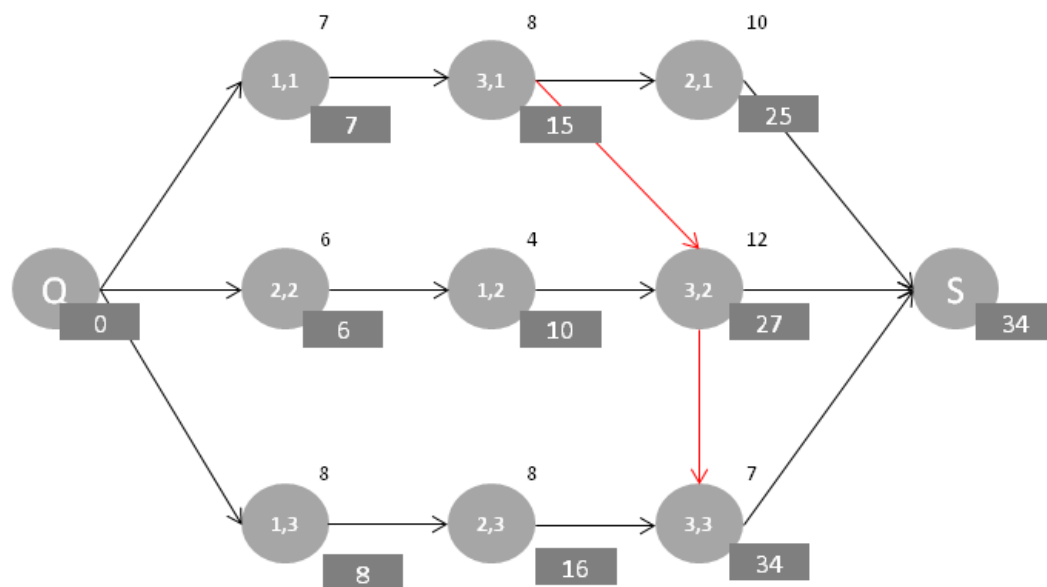


Abbildung 49: Shifting-Bottleneck-Heuristik

Abbildung 49 zeigt einen Produktionsplan als Graphen in Anlehnung an SRINIVASAN (G. Srinivasan 2012). Jede Reihe steht für einen Auftrag, jeder Knoten mit Ausnahme der Quelle Q und der Senke S für einen Arbeitsgang. Die Bezeichnung der Knoten folgt dem Format <Maschine>,<Auftrag>. Rechts oberhalb der Knoten ist die Bearbeitungszeit angegeben, rechts unten die früheste Fertigstellung, die sich als längster Pfad von der Quelle zur Senke ergibt. Am Beispiel des mittleren Auftrages kann der erste Arbeitsgang frühestens nach 6, der zweite nach $6+4=10$, der Dritte nach $6+4+12 = 27$ Zeitschritten fertig gestellt werden wenn es keine Konkurrenz um knappe Ressourcen gibt.

Im ersten Schritt kann die Gesamtdauer als maximale Auftragsdauer bestimmt werden. Durch Summierung der Vorgabezeiten pro Maschine wird die am höchsten ausgelastete Maschine, der Engpass, bestimmt. In diesem Falle handelt es sich um die Maschine 3 mit einer Gesamtbearbeitungsdauer von $7 + 12 + 8 = 27$ Zeiteinheiten.

Nun werden für alle Vorgänge, die auf dieser Maschine bearbeitet werden müssen die frühesten und spätesten Ecktermine festgelegt. Die Starttermine ergeben sich aus dem längsten Pfad bis zum entsprechenden Knoten, die Endtermine aus der vorläufigen Gesamtdauer abzüglich des längsten Pfades zur Senke.

Dieses Problem kann jetzt als ein $1|r_j|L_{max}$ Problem betrachtet werden. Darunter wird verstanden, dass eine einzelne Maschine eine Menge von Aufgaben erledigen muss, die erst ab einem gewissen Bearbeitungszeitpunkt r_j zur Verfügung stehen. Das Ziel ist die maximale Verspätung gegenüber gegebenen Endterminen zu minimieren. Dieses Problem ist zwar NP-hart, allerdings gibt es einfache Heuristiken sowie effiziente Branch-and-Bound-Lösungsverfahren (G. Srinivasan 2012), (Pinedo 2016, 193ff).

Somit kann für die Maschine 3 eine (exakte) Reihenfolge von den Aufträgen 1, 2, 3 ermittelt werden. Die roten Kanten im Graph modellieren dieses Zwischenergebnis. Die Kante zwischen den Knoten (3,1) und (3,2) erzwingt, dass Auftrag 2 erst nach Beendigung des entsprechenden Vorgangs von Auftrag 1 ausgeführt werden kann, analog gilt dies für (3,2) und (3,3). Diese Kanten verändern den längsten Pfad und erzeugen neue Restriktionen die sich wiederum in den Eckterminen der Vorgänge für andere Maschinen widerspiegeln.

Im weiteren Verlauf des Verfahrens werden die übrigen Engpassmaschinen nacheinander gelöst und die maschinenabhängigen Reihenfolgenbedingungen ermittelt. Daraus lässt sich schließlich ein terminlich bestimmter Produktionsplan ableiten.

Diese Heuristik kann erweitert werden um anstelle der Dauer der Produktion („Makespan“) die gewichtete Verspätung von Aufträgen („Tardiness“) zu minimieren. Allerdings garantiert erwartungsgemäß auch diese Heuristik keine optimale Lösung und die Einzelprobleme können im Extremfall bei exakten Lösungsverfahren zu sehr langen Laufzeiten führen. Weiterhin ist das Verfahren nicht geeignet, um Schichtkalender und Mitarbeiter (oder allgemeiner Multi-Ressourcen-Probleme) zu lösen.

MÖNCH und ROSE berichten von einer solchen Heuristik für einen Halbleiterhersteller (Lars Mönch und Oliver Rose 2004). Dabei werden Prioritätsregeln für die Lösung des Ein-Maschinen-Problems verwendet und Verfahrenserweiterungen zur Modellierung von Losgrößen und reihenfolgeabhängigen Rüstkosten entwickelt. Mit der Nutzung solcher Prioritätsregeln berechnet das System bei 286 Maschinen in 13 Sekunden eine deutlich verbesserte Produktionsplanung (ca. 34% weniger Verspätungen) gegenüber dem reinen Einsatz von Prioritätsregeln. Auf Grund der Produktionsstruktur in der Halbleiterfertigung berücksichtigt diese Arbeit weder Personal- noch Materialverfügbarkeit.

Constraint Propagation

Constraint Propagation ist ein Verfahren, welches zunächst nur eine mögliche Lösung findet, nicht aber automatisch eine optimierte. Analog zum Shifting Bottleneck Verfahren wird zunächst für jeden Vorgang ein frühester und spätester Termin durch Vorwärtsterminierung vom Freigabedatum und Rückwärtsplanung vom Ecktermin festgelegt. Daraus ergeben sich pro Arbeitsgang mögliche Terminfenster. Wenn das Zeitfenster von Vorgang i vor dem von Vorgang j liegt, wird eine entsprechende Vor-

gänger/Nachfolgerbeziehung eingefügt. Diese Beziehungen verengen die möglichen Zeitfenster erneut, so dass dieser Schritt mehrfach ausgeführt wird. Es verbleiben jedoch sehr viele Vorgänge, für die keine direkte, zwingende Aussage zur Reihenfolge möglich ist. In diesem Falle wird die Flexibilität zur Umplanung mit Hilfe von Kennzahlen bewertet. Nun wird zunächst der weniger flexible Vorgang eingeplant und daraufhin die Zeitfenster der anderen Vorgänge eingeschränkt. Da diese Heuristik jedoch nicht garantiert optimale Ergebnisse liefert, muss der Algorithmus gegebenenfalls bereits getroffene Entscheidungen rückgängig machen. (Pinedo 2016, S. 207).

Auch dieses Verfahren kann unter Umständen sehr lange Berechnungszeiten aufweisen und garantiert keine optimale Lösung.

Lineare Programmierung

Es ist bekannt, dass lineare Gleichungssysteme verhältnismäßig schnell gelöst werden können. In der Operations Research Literatur gibt es zahlreiche Modelle, mit denen Produktionsplanungsfragestellungen als Gleichungssystem dargestellt und gelöst werden können. Abbildung 50 zeigt ein solches in Anlehnung an HOPP und SPEARMAN (Hopp und Spearman 2001, S. 538). Dieses Modell wurde vom Autor in Excel implementiert und nutzt den eingebauten Solver.

Als Eingabe werden Deckungsbeiträge pro Stück und Kosten für Lagerhaltung sowie Überstunden angegeben. Darüber hinaus werden pro Monat eine maximal mögliche Absatzmenge und eine Produktionskapazität in Stück / Monat angegeben.

Das Modell bestimmt automatisch eine optimale Verteilung von Produktion, Absatz, Überstunden und Beständen, so dass der Gewinn optimal wird. Die Zielfunktion besteht dabei aus dem Deckungsbeitrag der Verkäufe abzüglich der Kosten für Überstunden und Lagerhaltungskosten.

Bewertungen								
r	Deckungsbeitrag pro Stück in €		10					
h	Bestandskosten pro Stück und Monat in €		1					
I_O	Startbestand		0					
C_O	Kosten für Überstunden in € / gefertigtem Stück		3					
Timerelated inputs			1	2	3	4	5	6 Total
c_t	Kapazität pro Periode		100	100	100	120	120	120 660
d_t	Bedarf pro Periode		80	100	120	140	90	140 670
Entscheidungsvariablen / Ergebnisse			1	2	3	4	5	6 Total
X_t	Produktionsvolumen pro Periode		100	100	100	140	110	120 670
S_t	Verkauf pro Periode		80	100	120	140	90	140 670
I_t	Bestand am Periodenanfang	0	20	20	0	0	20	0 60
O_T	Überstunden in der Periode (in Stück)		0	0	0	20	0	0 20
Objective			Formel					
Profit	Deckungsbeitrag X Abverkauf - Bestandskosten - Überstunden		6580					
Randbedingungen		Setting Solver	1	2	3	4	5	6 Total
S_t	Absatz <= Bedarf	S_t <= this line	80	100	120	140	90	140
X_t	Produktion <= Kapazität + Überstunden	X_t <= this line	100	100	100	140	120	120
I_t	Lagerbilanzgleichungen	this line = 0	0	0	0	0	0	0
O_T	Überstunden begrenzt auf 20% der regulären Kapazität		20	20	20	24	24	24

Abbildung 50: Produktionsplanung mit linearer Optimierung

Dazu kann der Solver die grau hinterlegten Zellen nach Belieben füllen, muss dabei allerdings die Randbedingungen einhalten. Diese werden an dieser Stelle nur skizziert:

Die Produktion in einem Monat muss geringer sein als die Summe aus regulärer Kapazität und Überstunden. Die Anzahl der Überstunden ist begrenzt, Bedarf, der nicht gedeckt werden kann, geht verloren (Kunden warten nicht auf die Verfügbarkeit). Das Gleiche gilt für den Absatz, der den Bedarf nicht überschreiten darf. Produktion und Abverkauf werden durch die Lagerbilanzgleichungen verbunden. Dabei gilt:

$$I_t = I_{t-1} + X_t - S_t$$

Der Bestand I_t in Periode t ergibt sich aus dem Bestand der Vorperiode I_{t-1} plus der Produktion X_t der Periode abzüglich den verkauften Mengen S_t . Durch einfaches Umstellen ergibt sich

$$0 = I_{t-1} + X_t - S_t - I_t$$

Dies kann im Solver als Randbedingung ausgewählt werden. Das Modell kann prinzipiell erweitert werden auf mehrere Produkte und sogar eine mehrstufige Produktion. Für diesen Fall werden die Lagerbilanzgleichungen der Komponenten so angepasst, dass anstelle eines Absatzes die gemäß Stücklisten benötigten Mengen aus der Produktion abgeleitet werden. Allerdings haben diese Verfahren wesentliche Einschränkungen:

- Die Komplexität der Modelle nimmt schnell zu; sie werden unübersichtlich
- Die Optimierung berechnet zunächst Gleitkommazahlen. In der Realität sind jedoch oftmals ganzzahlige Produktionsmengen notwendig. Gerade bei geringen Stückzahlen ist die Rundung fehleranfällig, eine gemischt-ganzzahlige

Optimierung, bei der einzelne Variablen nur ganzzahlig sein dürfen ist extrem rechenintensiv

- Die Diskretisierung in Perioden als solche reduziert die Aussagekraft
- Die Tatsache, dass die Kapazitäten in einer Periode ausreichen besagt noch nicht, dass der Produktionsplan in der Periode auch tatsächlich umgesetzt werden kann.

Aus all diesen Gründen werden Verfahren auf Basis von linearer Optimierung auch vor allem in der Grobplanung eingesetzt, in der auftragsbezogenen Feinplanung kommen dagegen Heuristiken zum Einsatz. SAP APO ist in dieser Hinsicht ein typisches Produkt (Dickersbach 2009, 277ff).