

Evaluation der Produktionsplanungssoftware Repetitive Manufacturing Optimization von Oracle

Reinthalder, Stephan Ulrich

Published: 01/01/2005

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Reinthalder, S. U. (2005). *Evaluation der Produktionsplanungssoftware Repetitive Manufacturing Optimization von Oracle*. (Schriftenreihe des Instituts für Transportwirtschaft und Logistik - Supply Chain Management; No. 02/2005). Institut für Transportwirtschaft und Logistik, WU Vienna University of Economics and Business.

Institut für Transportwirtschaft und Logistik

Institute of Transport Economics and Logistics
Vienna University of Economics and Business Administration



Wirtschaftsuniversität Wien, Augasse 2-6, A-1090 Wien, Austria

Schriftenreihe des Instituts für Transportwirtschaft und Logistik Nr. 2 (2005 SCM)

Reinthal, Stephan Ulrich

**Evaluation der Produktionsplanungssoftware Repetitive
Manufacturing Optimization von Oracle**

**Herausgeber: die Professoren des Instituts für
Transportwirtschaft und Logistik**

Supply chain planning:

**Evaluation der Produktionsplanungssoftware Repetitive
Manufacturing Optimization von Oracle**

Diplomarbeit

**zur Erlangung des akademischen Grades eines
Magister rer. soc. oec.**

**am Institut für Transportwirtschaft und Logistik der
Wirtschaftsuniversität Wien**

vorgelegt von

Stephan Ulrich Reinthaler

begutachtet von Univ. Prof. Dr. Herbert Meyr

Wirtschaftsuniversität Wien - Institut für Transportwirtschaft
und Logistik, Nordbergstraße 15, A - 1090 Wien

Wien Juni 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	3
1.2	Vorgehensweise der Arbeit.....	3
2	Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung	5
2.1	Fließlinienproduktion.....	5
2.2	Erzeugnisstruktur.....	6
2.3	Produkteigenschaften	6
2.4	Losgrößen- und Reihenfolgeplanung	7
2.4.1	Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei einstufiger Mehr- produktproduktion	8
2.4.2	Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei mehrstufiger Mehrproduktproduktion	9
2.5	Modellierungstechnische Annahmen.....	10
2.6	Von der Modellierung zum Produktionsplan	11
3	Peoplesoft Production Scheduling Discrete (PSD)	13
3.1	Erstellen eines Modells.....	13
3.2	Lösung eines Modells	18
3.2.1	Eigenschaften des Lösungsalgorithmus	18
3.2.2	Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Lösungs- algorithmus	19
3.3	Analyse des Produktionsplans.....	20
4	Prüfung der Performance von RMO	24
4.1	Modell1L3P.....	24
4.2	Modell1VP1EP	26
4.3	Modell2VP1EP	29
4.4	Modell2VP2EP	31
4.5	Modell Kostenabrechnung	35
4.5.1	Lagerkostenabrechnung.....	35
4.5.2	Rüst- und Produktionskostenabrechnung.....	36
4.6	Zusammenfassung der Zwischenergebnisse	38
5	Eignung von RMO zur simultanen Losgrößen- und Reihenfolge- planung.....	39
5.1	Anpassung der modellierungstechnischen Basisannahmen von RMO und GLSP.....	39
5.1.1	Herstellung äquivalenter Zeitstrukturen	41
5.1.2	Herstellung äquivalenter Kostenabrechnung	44
5.2	Einstufige Modelle	46
5.2.1	Einlinienprobleme	46
5.2.2	Mehrlinienprobleme	52
5.3	Mehrstufige Modelle	60

5.3.1	Ein divergierender Produktionsprozess	66
5.3.2	Ein dreistufig-konvergierender Produktionsprozess	68
5.3.3	Ein praxisnaher Produktionsprozess	73
6	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.....	80
	Literaturverzeichnis.....	85
	ANHANG	87

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Planungsaufgaben von APS Software Modulen	2
Abb. 2: Software Module von Peoplesoft für das Supply Chain Planning	2
Abb. 3: Benutzeroberfläche von PSD. A = Toolbars, B = Model Workspace, C = Master Model, D = Calendar Editor, E = Work Order Editor, F = Changeover Editor, G = Key Performance Indicators View, H = Supply and Demand Editor, I = Scenarios, J = Object Window	14
Abb. 4: Verwendung von logischen Losgrößen.....	16
Abb. 5: Beispiel einer Operation mit Resource Set	16
Abb. 6: Changeover Editor Ansicht in PSD	17
Abb. 7: Demand Gantt Ansicht eines Produktionsplans.....	21
Abb. 8: Resource Gantt Ansicht in PSD	21
Abb. 9: Item Graph Ansicht in PSD	22
Abb. 10: Operation Gantt Ansicht in PSD.....	22
Abb. 11: Resource Contention Ansicht in PSD, während eines Lösungsvorgangs	23
Abb. 12: Operation Gantt Modell1L3P.....	25
Abb. 13: Operation Gantt Modell1L3P, Rüstzustand am Beginn = Operation#2	26
Abb. 14: Resource Gantt Modell1VP1EP ohne RMO	27
Abb. 15: Resource Gantt Modell1VP1EP mit RMO.....	27
Abb. 16: Resource Gantt Modell2VP1EP, ohne RMO	29
Abb. 17: Resource Gantt Modell2VP1EP, RMO mit eingeschränktem Planungshorizont.....	30
Abb. 18: Resource Gantt Modell2VP2EP, PRE, Planungshorizont = 1 Woche	31
Abb. 19: Resource Gantt Modell2VP2EP, PRE, Planungshorizont = 26 Stunden ...	32
Abb. 20: Resource Gantt Modell2VP2EP mit RMO.....	32
Abb. 21: Resource und Operation Gantt Modell2VP2EP, JIT	33
Abb. 22: Resource und Operation Gantt Modell2VP2EP, JIT mit Vergabe von Prioritäten	33
Abb. 23: Resource Gantt, PRE ohne RMO	34
Abb. 24: Resource Gantt Modell2VP2EP, PRE mit RMO	35
Abb. 25: Modell Lagerkostenabrechnung.....	36
Abb. 26: Periodeneinteilung mit PSD auf Wochenbasis (JIT)	42
Abb. 27: Periodeneinteilung in PSD ohne Stillstandzeiten (JIT).....	43
Abb. 28: Periodeneinteilung in PSD mit der build strategy PRE	43
Abb. 29: Vergleich der Lagerkostenberechnung in PSD (a) und GLSP (b).....	45

Abb. 30: Produktionspläne des Modells Glsp1l3j2t des Szenarios Glsp1l3j2t / Schedule#1	48
Abb. 31: Produktionspläne Modell 1l4j1t des Szenarios Glsp1l4j1t_#2 / Schedule#5	50
Abb. 32: Produktionspläne Modell 1l4j1t des Szenarios Glsp1l4j1t_#2 / Schedule#5	51
Abb. 33: Resource Gantt Ansicht in RMO, Modell Glsp1l4j1t: Rüstkostenminimale Reihenfolgeplanung: $d_j = 10$ ME (a), $d_j = 24$ ME (b).....	52
Abb. 34: Produktionspläne Modell 2l4j3t des Szenarios Glsp1l4j1t_#1 / Schedule#4	53
Abb. 35: Produktionspläne Modell 2l4j3t des Szenarios Glsp1l4j1t_#3 / Schedule#6	55
Abb. 36: Auslastungsvergleich von RMO und GLSP	57
Abb. 37: Produktionspläne Modell 2L6j4t mit Angabe von Produktionsmenge /Produktnummer des Szenarios Glsp2l4j3t_#1 / Schedule#1	59
Abb. 38: Linienkoordination in RMO bei Modellierung mittels Routings und unterschiedlichen Produktionsgeschwindigkeiten	63
Abb. 39: Produktionspläne GLSPMS1VP2EP des Basisszenarios.....	65
Abb. 40: Gozinthograph GLSPMS4VP1EP	69
Abb. 41: Rüstkostenvergleich Szenarios- _Basis bis #3 GLSPMS4VP1EP.....	72
Abb. 42: Vergleich der Durchlaufzeiten der Szenarios- #Basis bis #3 GLSPMS4VP1EP	73
Abb. 43: Rüstkostenvergleich GLSPMS_Praxis der Perioden 1-4	77
Abb. 44: Gesamtkosten GLSPMS_Praxis in den Perioden 1-4.....	78

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Periodeneinteilung in GLSP	41
Tab. 2: Basisdaten der Szenarien des Modells Glsp1l3j2t (Schedule#x = Glsp1l3j2t_x).....	47
Tab. 3: Rüstzeiten- und Rüstkostenmatrix Modell 1l4j1t des Szenarios Glsp1l4j1t_#2 / Schedule#5.....	50
Tab. 4: Basisdaten Modell 2l4j3t des Szenarios Glsp1l4j1t_#1 / Schedule#4.....	52
Tab. 5 Basisdaten Modell 2l6j4t des Szenarios Glsp2l4j3t_#1 / Schedule#1.....	58
Tab. 6: Kostenvergleich Modell2l6j4t des Szenarios Glsp2l4j3t_#1 / Schedule#1 ...	60
Tab. 7: Produktionspläne GLSPMS2VP4EP des Basisszenarios	67
Tab. 8 Kostenvergleich GLSPMS2VP4EP des Basisszenarios	67
Tab. 9 Produktionspläne GLSPMS2VP4EP mit WIP-Beständen	68
Tab. 10 Kostenvergleich GLSPMS2VP4EP des Szenarios mit WIP-Beständen	68
Tab. 11: Produktionspläne GLSPMS4VP1EP des Basisszenarios, erste Periode mit Angabe von Produktionsmenge/Produktnummer	70
Tab. 12: Kostenvergleich GLSPMS4VP1EP Basisszenario.....	71
Tab. 13: Vergleich der Durchlaufzeiten. GLSPMS*: s = 1 je Periode.....	71
Tab. 14: Periodenbedarfe der Szenarios -_Basis bis -#3 GLSPMS4VP1EP	72
Tab. 15: Rüstmatrix GLSPMS_Praxis	74
Tab. 16: Stückliste GLSPMS_Praxis	75
Tab. 17: Produktionspläne GLSPMS_Praxis, erste Periode mit Angabe von Produktionsmenge/Produktnummer	76
Tab. 18: Gesamtkostenvergleich GLSPMS_Praxis.....	78
Tab. 19: Vergleich der Durchlaufzeiten GLSPMS_Praxis (gerund. auf ZE).....	79

Abkürzungsverzeichnis

APS	Advanced Planning Systems
CLSP	Capacitated Lotsizing Problem
CP	Constraint Programming
CSP	Constraint Satisfaction Problems
DLSP	Discrete Lotsizing and Scheduling Problem
EP	Endprodukt
ERP	Enterprise Resource Planning
FIFO	First In First Out
GE	Geldeinheit
GLSP	General Lotsizing and Scheduling Problem
GLSPMS	General Lotsizing and Scheduling Problem for Multiple production Stages
GLSPPL	General Lotsizing and Scheduling Problem für Parallele Linien
GUI	Graphical User Interface
JIT	Just-In-Time
KPI	Key Performance Indicators
LTB	Large Time Bucket
ME	Mengeneinheit
MRP	Material Requirements Planning
RMO	Repetitive Manufacturing Optimization
P	Produkt
PPS	Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme
PRE	Pre-Build
PSD	Production Scheduling Discrete
STB	Small Time Bucket
VP	Vorprodukt
WIP	Work-In-Progress
ZE	Zeiteinheit

1 Einleitung

In den vergangenen 20 Jahren hat die Informationstechnik die Planung, Steuerung und Durchführung der in einem Unternehmen ablaufenden Geschäftsprozesse erheblich beeinflusst. Enterprise Resource Planning Systems (ERP-Systeme) sind in der Lage, interne betriebliche Prozesse vom Kundenauftrag bis zur Fakturierung zu integrieren. Sie umfassen neben Modulen zur Buchführung und zum Controlling auch komplexere Module zur operativen Produktionsplanung. Diese sog. Produktionsplanungs- und –Steuerungssysteme (PPS-Systeme) weisen aufgrund ihrer Sukzessivplanungseigenschaften nur sehr beschränkte Möglichkeiten zu einer integrierten Gesamtplanung auf.¹ So muss beispielsweise zuerst ein Produktionsplan erzeugt werden, um im Anschluss daran zu prüfen, ob der Produktionsplan mit den verfügbaren Ressourcen überhaupt realisierbar ist. In vielen Fällen wird sogar gänzlich auf die Prüfung verzichtet und die Ressourcenknappheit erst während der Produktion erkannt.

Die in den vergangenen Jahren entwickelten Advanced Planning Systems (APS) vermeiden derartige Schwächen und bieten umfassende Planungsfunktionen auf allen Ebenen entlang der Supply Chain. Quantitative Konzepte, die zumeist nur als Insellösungen in der Praxis implementiert wurden, können nun wertschöpfungskettenübergreifend genutzt werden. Des weiteren ermöglichen es APS, rasch auf unvorhersehbare Ereignisse zu reagieren, und bestehende ERP-Datenbanken bestmöglich zu nutzen.² Die verbesserten Planungsfunktionen sollen dazu beitragen, die Kosten, bei gleichzeitiger Verbesserung der Kundenzufriedenheit, zu senken. APS bestehen zumeist aus verschiedenen Softwaremodulen, die mit unterschiedlichen Planungsaufgaben ausgestattet sind.³ Anbieter dieser Softwaremodule sind unter anderem Peoplesoft, SAP und i2 Technologies. Während das Modulangebot und die Bezeichnung der einzelnen Module von Hersteller zu Hersteller variieren, sind die Planungsfunktionen im Prinzip die Gleichen. Die Summe der angebotenen Module lässt eine APS-Grundarchitektur erkennen, die in Abbildung 1 dargestellt ist.

¹ Vgl. Tempelmeier (1999), S. 306

² Vgl. Stadtler (2005), S. VIII

³ Vgl. Rohde et al. (2000)

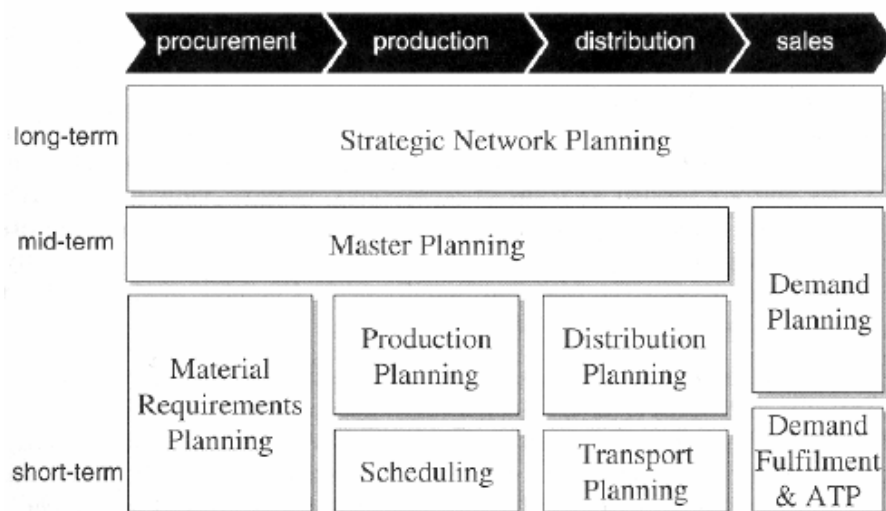


Abb. 1: Planungsaufgaben von APS Software Modulen⁴

Die Firma Peoplesoft wurde 1987 mit Hauptsitz in Pleasanton, Kalifornien, gegründet und bietet traditionelle ERP Software an. Im Jahr 2003 übernahm Peoplesoft den APS- und ERP-Entwickler J.D. Edwards und wurde zum zweitgrößten Anbieter von Unternehmenssoftware. „Supply Chain Planning“, der APS Bereich von J.D. Edwards wurde in die Peoplesoft EnterpriseOne™ Produktfamilie integriert. Aufgrund der Übernahme durch Oracle im Jänner 2005, konnte das fusionierte Unternehmen bedeutend an Marktanteilen gegenüber dem Marktführer SAP gewinnen. Abbildung 2 zeigt die APS Software Module von EnterpriseOne™.

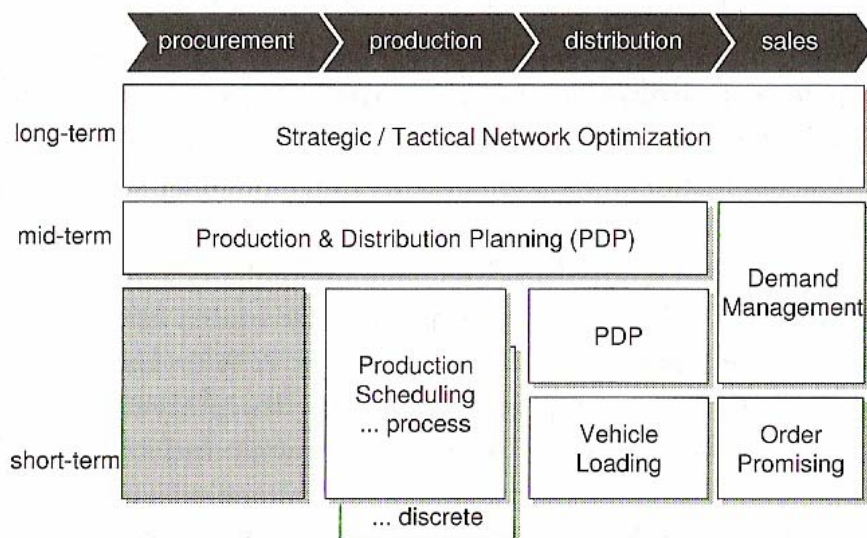


Abb. 2: Software Module von Peoplesoft für das Supply Chain Planning⁵

⁴ Stadler/Kilger (2005), S. 109

⁵ Stadler/Kilger (2005), S. 346

1.1 Problemstellung

Die Unterstützung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung ist in den bestehenden APS Modulen noch weitgehend unzureichend umgesetzt.⁶ Vor allem bei anonymer Auftragsproduktion und mehrstufigen Mehrlinienproblemen gibt es bisher kaum zufrieden stellende Softwarelösungen. Begründbar ist diese bisher noch mangelhafte Umsetzung darin, dass die meisten APS Module im Bereich der operativen Produktionsplanung zeitorientierte Ziele verfolgen (z.B. Minimierung der Durchlaufzeit) und Kosten keinen Einfluss auf den Produktionsplan haben. Auch die von Mauch evaluierte PSD Version 3.0 bildete hierbei keine Ausnahme.⁷ Da aber gerade Rüst-, Lager- und u.U. Produktionskosten einen wesentlichen Einfluss auf die Losgröße haben, sollten diese daher auch in den operativen Modulen berücksichtigt werden.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Prüfung der Eignung des Moduls Production Scheduling Discrete (PSD) von Peoplesoft und der darin enthaltenen Funktion Repetitive Manufacturing Optimization (RMO) für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung. PSD ist vor allem für Mehrlinienprobleme mit wandernden Engpässen (floating bottlenecks) für diskrete mehrstufige Fertigung ausgelegt. Eine Charakteristik der Produktion sind komplexe Stücklisten und eine im Verhältnis dazu geringe Anzahl von Endprodukten. RMO stellt hierbei einen alternativen Algorithmus dar, der identische Arbeitsgänge an einer Ressource unmittelbar hintereinander abfolgen lässt. Laut Herstellerangaben können dadurch Produktionsunterbrechungen vermieden und Rüstzeiten bzw. -Kosten eingespart werden.⁸ Die Bedarfe gehen entweder aufgrund von konkreten Kundenaufträgen oder Prognosen in die Produktionspläne ein. In eigens erstellten Modellen soll geprüft werden, ob mit RMO eine sinnvolle Losgrößen- und Reihenfolgeplanung möglich ist. Die Prüfung wurde anhand der PSD Version 8.10 durchgeführt.

1.2 Vorgehensweise der Arbeit

Im theoretisch fundierten Teil der Arbeit werden die Voraussetzungen für eine simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei kontinuierlicher Fließfertigung auf mehreren parallelen Linie geschildert. Danach wird PSD vorgestellt und eine grundlegende Einführung in die Modellierung gegeben. Es werden nur die für die Problemstellung der Arbeit relevanten Funktionen erklärt.

In einem weiteren Schritt wird anhand von einfachen Modellen die Performance des RMO-Solvers mit derjenigen des konventionellen PSD-Solvers verglichen.

Der Ergebnisvergleich von RMO mit der allgemeinen Formulierung des *General Lotsizing and Scheduling Problem* (GLSP) für einstufige Probleme bzw. dem *General Lotsizing and Scheduling Problem for Multiple production Stages* (GLSPMS) für mehrstufige Probleme soll Aufschluss darüber geben, ob RMO für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung geeignet ist. Hierzu werden

⁶ Vgl. u.a. Tempelmeier (1999), S. 337

⁷ Vgl. Mauch (2002)

⁸ Vgl. Peoplesoft (2004), S. 1

zunächst einfache Modelle aufgestellt, deren Komplexitätsgrad sukzessive erhöht wird. Als „Maßstab“ für die Lösungsgüte des Solvers dienen die erstellten Produktionspläne und die damit errechneten Rüst-, Lager- und Produktionskosten.

2 Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Grundbegriffe für die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung beschrieben. Es wird dabei auf jene Merkmale eingegangen, die für die Problemstellung dieser Arbeit von Bedeutung sind.

2.1 Fließlinienproduktion

PSD ist vordergründig für die Fließlinienproduktion, die durch starre vordefinierte Produktionswege charakterisiert ist, konzipiert. Auf einer oder mehreren parallel angeordneten Linien können technologisch verwandte Produkte erzeugt werden. Die Arbeitssysteme (Operationen) sind linear hintereinander angeordnet, so dass sie von allen Produkten in derselben Reihenfolge durchlaufen werden. Die technologisch bedingte Starrheit des Produktionsprogramms lässt Kapazitätserhöhungen nur langfristig zu.⁹ Dies ist meist nur durch Hinzufügen einer weiteren Linie oder durch qualitative Verbesserungen der bestehenden Linien möglich (z.B. Erhöhung der Effizienz). Im Allgemeinen wird bei Fließlinienproduktion nur von einigen wenigen Produktionsstufen ausgegangen, da auf einer Linie bereits mehrere unterschiedliche Arbeitsschritte zusammengefasst werden. Ablaufbedingte Liegezeiten ergeben sich dadurch, dass die Lose nach dem Eintreffen an der nächsten Produktionsstufe nicht sofort weiterverarbeitet werden können, weil zuerst andere Aufträge abgearbeitet werden müssen. Diese Work-In-Progress (WIP) Bestände sind bei der Fließlinienproduktion aufgrund des gut koordinierten Materialflusses und der daraus resultierenden niedrigen Durchlaufzeiten zumeist gering.¹⁰

Von kontinuierlicher Fließlinienproduktion spricht man, wenn während der Produktion zwischen kontinuierlichen Produkten (z.B. Lacke, Gummi) gewechselt wird. Darunter fällt auch die Chargenproduktion in der chemischen Industrie. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei diskreter Produktion um die Herstellung von Konsumgütern aus festen Bestandteilen, die beispielsweise aus Stücklisten zu entnehmen sind. Da in der Chargenproduktion zumeist mit technologisch vorgegebenen Losgrößen¹¹ geplant wird, weswegen eine simultane Losgrößen und Reihenfolgeplanung obsolet ist, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit in der kontinuierlichen Fertigung.

Da die Produktionslinien in den meisten Fällen sehr kapitalintensiv sind, muss mit hohen Outputraten produziert werden um die Linien möglichst effizient zu nutzen. Dies erfordert präzise Bedarfsprognosen.

⁹ Vgl. Meyr (1999), S. 27

¹⁰ Vgl. Meyr (1999), S. 27

¹¹ z.B. maximales Fassungsvermögen eines Kessels

2.2 Erzeugnisstruktur

Der Planungsumfang nimmt mit der Komplexität der Erzeugnisstruktur zu. Je mehr Produktionsstufen in einem Produktionsprozess vorhanden sind, desto schwieriger ist es simultane Losgrößen- und Reihenfolgeentscheidungen zu treffen. So erschweren beispielsweise unterschiedliche Produktionskoeffizienten der parallelen Linien und verschieden hohe Direktbedarfe die Linienkoordination zwischen den einzelnen Produktionsstufen. Bei der Fließlinienproduktion wird typischerweise von ein bis drei Produktionsstufen ausgegangen.¹²

In einer linearen Erzeugnisstruktur hat jedes Erzeugnis höchstens einen direkten Nachfolger und höchstens einen direkten Vorgänger. Der Produktionsprozess ist dadurch gekennzeichnet, dass die Bearbeitung eines Rohmaterials durch mehrere Arbeitsgänge auf einer Linie erfolgt und am Ende ein lagerfähiges Zwischen- oder Endprodukt hervorgeht. Die konvergierende Erzeugnisstruktur ist dadurch gekennzeichnet, dass jedes Erzeugnis höchstens einen direkten Nachfolger hat, aber mehrere direkte Vorgänger haben kann. Diese Erzeugnisstruktur ist für Montageprozesse üblich. Bei der divergierenden Erzeugnisstruktur hat jedes Erzeugnis höchstens einen direkten Vorgänger, aber mehrere direkte Nachfolger. Die in dieser Arbeit relevante programmbedingte Divergenz, bei der ein Erzeugnis mehrmals in unterschiedliche Produkte eingehen kann, ist von der prozessbedingten Divergenz, bei der ein Produkt in mehrere Erzeugnisse aufgespaltet wird, zu unterscheiden.¹³ Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass auch für die in der chemischen Industrie häufig auftretende prozessbedingte Divergenz eine Losgrößenplanung erforderlich ist.

2.3 Produkteigenschaften

Die oben beschriebenen technologischen Restriktionen der Fließlinienproduktion erlauben nur eine eingeschränkte Sortimentsgestaltung. Da die Reihenfolge der zu bearbeitenden Arbeitssysteme für alle Produkte in etwa gleich ist, müssen auch die auf einer Linie hergestellten Produkte miteinander verwandt sein. Häufig lässt sich das gesamte Produktangebot in wenige Produktfamilien unterteilen.¹⁴

Die für die Umrüstung zwischen diesen Produktfamilien in Anspruch genommene Zeit verringert die gesamte zur Verfügung stehende Kapazität. Die Gesamtkapazität der Linien beträgt aufgrund der hohen angestrebten Auslastung zumeist 24 Stunden pro Tag. Für derartige Umrüstungen fallen auch Kosten für den Faktorverbrauch (z.B. Reinigungsmaterial) und Opportunitätskosten im Sinne von entgangenen Produktionsaufträgen an.¹⁵ Darüber hinaus kann es einige Zeit in Anspruch nehmen, bis die jeweilige Linie wieder ihre richtige Produktionsgeschwindigkeit erreicht. In der Zwischenzeit kann es zu fehlerhaften Produkten kommen, die entweder nachbearbeitet werden müssen oder zu Ausschuss werden.

¹² Vgl. Meyr (1999), S. 27

¹³ Vgl. Tempelmeier (1999), S. 109

¹⁴ Vgl. Fleischmann (1988), S. 362

¹⁵ Vgl. Tempelmeier (1999), S. 139; z.B. bei Vollaustattung bzw. Kapazitätsengpässen

Ist die Höhe der Rüstkosten davon abhängig, welches Produkt als letztes auf einer Linie produziert wurde, so können reihenfolgeabhängige Rüstkosten bzw. Rüstzeiten vorkommen. So ist beim Lackieren eine Reinigung von hellen zu dunklen Farben mit weniger Reinigungsmaterial durchzuführen und dabei weniger zeitintensiv als bei der Umstellung von dunklen zu hellen Lacken. Innerhalb der Produktfamilien kann es eine große Anzahl von Variationen geben, so dass die Anzahl der Endprodukte wiederum um ein Vielfaches größer ist als die Zahl der Produktfamilien. Produktwechsel innerhalb der Familien sind häufig mit geringeren Rüstkosten und –zeiten behaftet. Man spricht hier von Rüstfamilien.

2.4 Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

Gegenstand der Losgrößenplanung ist die Bestimmung der Menge eines Produktes, das ohne Unterbrechung durch Umrüsten auf ein anderes Produkt auf einer Linie erzeugt wird. Im mehrperiodigen Fall erfolgt eine Zuordnung der Produktionsmengen zu den einzelnen Perioden, so dass innerhalb der Losgrößenplanung eine Reihenfolge für die Erfüllung der Bedarfe vorgegeben wird.¹⁶ Die Reihenfolge der Verteilung der Produktionsaufträge ergibt sich hinsichtlich Umfang und Anzahl aus der Losgrößenplanung. Die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung gehört zur operativen Produktionsplanung und soll unter Berücksichtigung der Eckdaten der übergeordneten Planungsebene dezentral durchgeführt werden. Diese Eckdaten über die vorhandene Kapazität, sowie über die grobe Mengen- und Zeitplanung, können dem sog. Masterplan entnommen werden. Die Planung erfolgt umso genauer, je sicherer die Daten und je kurzfristiger der Planungshorizont ist. Die vollständige Losgrößen- und Reihenfolgeplanung kann abhängig vom Unternehmen zwischen einigen Tagen und maximal drei Monaten erfolgen.¹⁷ Die Losgrößenplanung sollte nicht getrennt von der Reihenfolgeplanung getroffen werden, sondern beide sollten als Gesamtproblem betrachtet werden:

„Sehr deutlich ist dieser Zusammenhang, wenn reihenfolgeabhängige Rüstzeiten vorliegen: Die für eine Losgrößenplanung zur Verfügung stehende (knappe) Kapazität ist erst bekannt, wenn die Produktsequenz festgelegt ist. Letztere wiederum ist von der Auflagehäufigkeit eines Produktes abhängig, die aber eine Entscheidungsgröße des Losgrößenproblems ist.“¹⁸

Ziel der Losgrößenplanung ist die Minimierung der von der Losgrößenentscheidung abhängigen Kosten. Es sind dies i.d.R. Rüst-, Lager-, und Produktionskosten, wobei Rüst- und Lagerkosten sich gegenläufig verhalten. Fasst man den Periodenbedarf eines Produktes für einen bestimmten Zeitraum zu einem Fertigungslos zusammen, so verursacht der damit verbundene Lagerungsprozess bedingt vor allem durch die Kapitalbindung Lagerkosten. Andererseits werden durch die Losbildung die Anzahl der erforderlichen Rüstvorgänge und die damit verbundenen Rüstkosten reduziert. Dies ist immer dann von Vorteil, wenn die Linienkapazitäten knapp sind.

¹⁶ Vgl. Helber (1994), S. 5

¹⁷ Vgl. Stadler/Kilger (2005), S. 58

¹⁸ Meyr (1999), S. 31

In der klassischen Produktionsplanung werden die Losgrößenbestimmungen und die Reihenfolgebestimmungen als eigenständige Planungsprobleme angesehen, die nacheinander bearbeitet werden. Die Losgrößenplanung wird dabei eher der Produktionsplanung, die Reihenfolgeplanung eher der Produktionssteuerung zugeordnet.¹⁹

2.4.1 Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei einstufiger Mehrproduktproduktion

Bei der einstufigen Mehrproduktproduktion kann die Losgröße für ein Produkt einzeln oder für alle Produkte simultan bestimmt werden. Dabei wird die Losgrößenplanung vor der Reihenfolgeplanung vorgenommen. Diese Vorgehensweise ist dann möglich, wenn nur eine Linie zur Verfügung steht und keine reihenfolgeabhängigen Rüstkosten vorliegen.²⁰ Es muss genügend Kapazität vorhanden sein, so dass häufiges Rüsten nicht dazu führt, dass die zu produzierende Menge nicht innerhalb des Planungshorizontes fertig gestellt wird. Liegen Kapazitätsrestriktionen vor, muss die durch das Rüsten beanspruchte Kapazitätsminderung in die Betrachtung mit einbezogen werden. Ein Fertigungslos darf die Linie nicht so blockieren, dass andere Produktionsaufträge erst nach ihrem Liefertermin fertig gestellt werden können.

Neben den einfachen statischen Losgrößenformeln und zahlreichen heuristischen sowie exakten Verfahren gilt das Capacitated Lotsizing Problem (CLSP)²¹ als Standardmodell für die einstufige, kapazitierte Mehrprodukt-Losgrößenplanung. Beim Discrete Lotsizing and Scheduling Problem (DLSP)²² werden auch Reihenfolgeentscheidungen mit eingeschlossen. Hierbei können Lose Perioden überdauern. Es wird eine so kleine Periodeneinteilung vorgenommen, dass immer nur ein Produkt pro Periode hergestellt werden kann. Im General Lotsizing and Scheduling Problem (GLSP)²³ können mehrere Lose desselben Produkts in einer Periode aufgelegt werden. Es werden sowohl reihenfolgeabhängige Rüstkosten als auch reihenfolgeabhängige Rüstzeiten berücksichtigt. Dabei werden als Außenzeitraster Makroperioden (z.B. mehrere Wochen) verwendet. Die Makroperioden werden in variable Mikroperioden unterteilt. Eine ununterbrochene Folge von Mikroperioden, in denen ein Produkt hergestellt wird, bildet ein Los d.h. Lose können Makroperioden überdauern und sind innerhalb dieser frei terminierbar.

Stehen mehrere parallele Linien zur Verfügung, so nimmt der Planungsumfang stark zu, da die Zuweisung von Produkten nicht eindeutig zu sein braucht. Ein Produkt kann entweder durchgehend auf einer Linie oder gleichzeitig auf mehreren Linien gefertigt werden. Es muss daher bestimmt werden, welche Produkte bzw. welcher Anteil am Periodenbedarf auf welcher Linie gefertigt werden. Besteht ein Auftrag aus einem einzigen Arbeitsgang, gibt es folgende Unterscheidungsfälle für parallele Linien: Identische parallele Linien mit gleichen Produktionsgeschwindigkeiten und

¹⁹ Vgl. Domschke et al. (1993), S. 16

²⁰ Vgl. Adam (1997), S. 494ff

²¹ Vgl. z.B. Meyr (1999), S. 56, Tempelmeier (1999), S. 167, Maes/Van Wassenhove (1988)

²² Vgl. z.B. Meyr (1999), S. 59, Tempelmeier (1999), S. 169, Grünert (1998), S. 145

²³ Vgl. Meyr (1999), S. 75

heterogene parallele Linien mit auftragsabhängigen Produktionsgeschwindigkeiten. Für heterogene Linien müssen auch Produktionskosten der jeweiligen Linien in die Betrachtung miteinbezogen werden.²⁴ Die Losgröße- und Reihenfolgeentscheidung ist idealerweise simultan zu treffen. Teilt man die Produkte den Linien zu, so ist es notwendig, vorab die zur Produktion nutzbaren Linienkapazitäten zu kennen. Liegen Rüstzeiten vor, so sind die verfügbaren Kapazitäten allerdings erst nach der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bekannt. Wird die Reihenfolgeplanung vorab durchgeführt so schränkt man die Freiheitsgrade für die Losgrößenplanung ein. Es ist dann bereits vorbestimmt zu welchem Zeitpunkt, welche Produkte auf welcher Linie hergestellt werden sollen. Dieser Umstand kann zu einer suboptimalen Kostenrealisierung führen.

Für einstufige, Mehrproduktprobleme bei parallelen Linien wird an dieser Stelle das von Meyr entwickelte General Lotsizing and Scheduling Problem für Parallele Linien (GLSPPL)²⁵, das auf der Formulierung des GLSP²⁶ basiert, als Referenzmodell genannt.

2.4.2 Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei mehrstufiger Mehrproduktproduktion

In der betrieblichen Praxis sind häufig mehrstufige Erzeugnisstrukturen auf parallelen Linien mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten- und Kosten anzutreffen. Die erhöhte Planungskomplexität im Vergleich zur einstufigen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung ergibt sich aus dem Umstand, dass eine Linie von Produkten auf unterschiedlichen Dispositionsstufen beansprucht wird. Des Weiteren wirken sich unterschiedliche Vorlaufzeiten erschwerend auf die Planung aus. Üblicherweise wird die Planung für jede einzelne Produktionsstufe getrennt durchgeführt. Dies ist nur dann zulässig, wenn die betrachtete Produktionsstufe keinen potentiellen Engpass darstellt und ausreichend Kapazität vorhanden ist. Ist dies nicht der Fall, kann es schnell zu Kapazitätsüberschreitungen oder Verletzung der Vorgänger-Nachfolgerbeziehungen kommen.²⁷ Deshalb ist es sinnvoll, die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung gemeinsam für alle Produktionsstufen zu treffen. Bei einer mehrstufigen Produktion führen kleinere Lose häufig dazu, dass die Linien flexibler belegt werden können und die Stillstandzeiten dadurch reduziert werden.

Zu mehrstufigen Mehrprodukt-Problemen gibt es bisher wenige wissenschaftliche Arbeiten. Meyr stellt basierend auf der Formulierung des GLSP eine MIP-Modellformulierung für eine mehrstufige kontinuierliche Losgrößen- und Reihenfolgeplanung vor.²⁸

²⁴ Vgl. Meyr (1999), S. 160

²⁵ Vgl. Meyr (1999), S. 159ff

²⁶ Siehe 5.1

²⁷ Vgl. Kimms (1997), S. 9

²⁸ Vgl. Meyr (2004), S. 5ff

2.5 Modellierungstechnische Annahmen

Um einen Produktionsprozess modellhaft abbilden zu können, müssen zunächst einige modellierungstechnische Annahmen getroffen werden. Zunächst einmal stellt sich die Frage, innerhalb welcher Zeitintervalle Zustandsänderungen im Modell auftreten können. So ist beispielsweise zu klären, ob ein Los über die volle Periodenlänge produziert werden muss, oder ob in derselben Periode auch Umrüstungen möglich sind. Wird ein sehr feines Zeitraster verwendet, so ist die Abbildungstreue höher, allerdings ist auch die Rechenzeit länger. Darüber hinaus ist es schwieriger, länger andauernde Rüstzeiten abzubilden. In der Literatur wird gemäß dem Zeitraster in Small Time Bucket (STB) Modelle und Large Time Bucket (LTB) Modelle unterschieden.²⁹ STB-Modelle verwenden sog. Mikroperioden, die sich zumeist über wenige Stunden erstrecken. Sie haben häufig die Länge von Arbeitsgängen oder Operationen. Aus diesem Grund ist die gesamte Produktionskapazität bereits im Vorhinein bekannt. Innerhalb dieser Mikroperioden können dann ein bis zwei Produkte hergestellt werden. Der Anfall der Bedarfe und die Abrechnung der Lagerkosten können entweder je Mikroperiode oder beispielsweise auf Wochenbasis erfolgen. LTB-Modelle benutzen als Zeitraster Makroperioden, die wiederum durch Mikroperioden unterteilt werden können. Im Gegensatz zu STB-Modellen sind Mikroperioden nicht vordefiniert, sondern eine Entscheidungsgröße des Modells.

In engem Zusammenhang mit der Wahl der Zeitstruktur steht die Festlegung des Planungshorizonts. Dieser sollte wenn möglich nicht zu groß gefasst werden, da ansonsten unvorhersehbare Umwelteinflüsse wie z.B. Maschinenausfälle oder plötzliche Bedarfsschwankungen nur ungenügend berücksichtigt werden können. Der zeitliche Anfall der Bedarfe stellt eine weitere Einflussgröße dar. Fallen die Bedarfe vor Ende des Planungshorizonts an, so können Nachlieferungen zugelassen werden.³⁰ Das Zulassen von Nachlieferungen gestaltet die Produktionsplanung flexibler. Es ist allerdings zu bedenken, dass Nachlieferungen häufig nicht möglich sind und sich außerdem negativ auf den Servicegrad d.h. die Fähigkeit Liefertermine einzuhalten auswirken.

Eine weitere modellierungstechnische Annahme kann über die Berücksichtigung von unvorhersehbaren Umwelteinflüssen getroffen werden. Diese können einen bereits erstellten zulässigen Produktionsplan im Nachhinein ungültig machen. Deswegen können beispielsweise für Maschinenausfälle pauschale Reparaturzeiten pro Planungsperiode oder für plötzliche Bedarfsschwankungen Sicherheitsbestände in das Modell eingeführt werden, so dass in der Losgrößenplanung von bekannten Daten ausgegangen werden kann.³¹

Weitere modellierungstechnische Annahmen ergeben sich aus den technologischen Restriktionen des Produktionsprozess. Oft ist es möglich, dass Fertigungslose sowohl auf einer Linie als auch auf mehreren parallelen Linien gleichzeitig (Lossplitting) aufgelegt werden können. Wenn Lose nur als Ganzes an eine

²⁹ Vgl. Meyr (2004), S. 2

³⁰ Unter der Annahme, dass sich der späteste mögliche Lieferzeitpunkt mit dem Ende des Planungshorizonts deckt

³¹ Vgl. Meyr (1997), S. 52

nachfolgende Produktionsstufe weitergegeben werden können, spricht man von „geschlossener“ Losweitergabe. Dürfen fertige Teile eines Loses auf der nächsten Stufe weiterverarbeitet werden, ohne dass das Ende des Gesamtloses abgewartet werden muss, herrscht „offene“ Losweitergabe.

2.6 Von der Modellierung zum Produktionsplan

Sind die modellierungstechnischen Grundannahmen getroffen, kann der Produktionsprozess modelliert werden. Das Modell sollte alle relevanten Aspekte der Produktion erfassen. Hier gehen Daten von Produkten, Vorprodukten, Linien, Operationen, Routings, Rüstmatrizen, Kosten, Bedarfe, Zeitpläne usw. ein. Sinnvollerweise sollten nur jene Linien modelliert werden, die einen potentiellen Engpass darstellen. Dies impliziert, dass nur jene Daten in das Modell aufgenommen werden, die mit der kapazitierten Linie in Verbindung stehen. Weiters sollen auch situationsabhängige Daten berücksichtigt werden. Es sind dies Daten über Anfangsbestände, WIP-Bestände, den Rüstzustand einer Linie am Periodenanfang, Losgrößenregeln (z.B. Mindestlosgrößen), Prioritäten für Bedarfe und Routings.

Um einen Produktionsplan zu erstellen, müssen Ziele vorgegeben werden, die es ermöglichen im Idealfall optimale Lösungen zu generieren. In vielen APS Modulen zur operativen Produktionsplanung werden zeitorientierte Ziele verfolgt wie z.B. die Minimierung des Makespan, der Summe der Verspätungen, der maximalen Verspätung, der Durchlaufzeiten oder der Rüstzeiten. Kostenorientierte Ziele sind die Minimierung von variablen Produktionskosten, Strafkosten für Nachlieferungen und Rüstkosten. Die gleichzeitige Verfolgung mehrerer Ziele ist möglich, wurde aber in bisherigen APS Modulen nur ungenügend umgesetzt. Der damit verbundene relativ hohe Aufwand steht zumeist nicht in Relation mit der zu erwartenden Lösung. So wird man durch die Minimierung von Rüstzeiten nicht wesentlich unterschiedliche Ergebnisse erhalten als durch die Minimierung von Rüstkosten, da lange Rüstzeiten nicht selten mit höheren Rüstkosten verbunden sind.

Um alle Daten erfassen zu können, werden diese aus ERP-Systemen, dem Master Planning und dem Demand Planning übernommen. Nachdem die relevanten Daten in das Modell eingegangen sind, können in einem nächsten Schritt bestimmte Annahmen, z.B. über den zeitlichen Anfall von Bedarfsprognosen oder die Höhe der Rüst- und Lagerkosten, getroffen werden. Jede Abwandlung des Ausgangsmodells kann stellt ein Szenario dar, welches es zu lösen gilt. Danach wird der erste Produktionsplan erstellt, der im nächsten Schritt analysiert wird. Wird keine Lösung gefunden, weil der Plan unlösbar ist oder soll versucht werden, mit anderen Annahmen bessere Lösungen zu finden, müssen neue Szenarios erstellt werden. Sobald die Lösung den Erwartungen entspricht, wird das Szenario als Produktionsplan übernommen. Dieser Produktionsplan wird an ERP und Material Requirements Planning (MRP) Systeme weitergegeben mit derer Hilfe der Plan

umgesetzt wird und alle für die Produktion notwendigen Materialien ermittelt werden.³²

³² Vgl. Stadler/Kilger (2005), S. 200

3 Peoplesoft Production Scheduling Discrete (PSD)

Nachdem in einem ersten Schritt PSD vorgestellt wird, folgt eine Einführung in die Modellierung. Dabei wird auf die für diese Arbeit notwendigen Daten und ihre Eingabemöglichkeiten eingegangen. Darauf aufbauend wird die Erstellung eines Produktionsplans beschrieben, sowie dessen Darstellung und Analyse-möglichkeiten. Schließlich werden der Solver und dessen Beeinflussungsmöglichkeiten dargestellt.

In PSD lassen sich sehr komplexe Modelle aufstellen, für die die Software eine Reihe von Modellierungseinstellungen anbietet. Die für diese Arbeit irrelevanten Einstellungen werden nachfolgend nicht betrachtet.

PSD ermöglicht es mehrstufige Produktionsprozesse mit mehreren Linien und komplexen Stücklisten und Routings zu modellieren. Die Länge der Operationen bilden die kleinstmöglichen Zeitintervalle, die zu Losen zusammengefasst werden können.³³ Im einfachsten Fall kann mit einer Operation ein Produkt hergestellt werden. Die Operationen bzw. Lose werden den Linien zeitlich zugeordnet. Somit enthält der Produktionsplan die Ergebnisse einer Losgrößenplanung und Reihenfolgeplanung sowie einer Linienzuweisung der Produkte. Die zum Aufstellen des Modells notwendigen Daten können aus anderen Peoplesoft-Modulen³⁴ und aus ERP-Systemen importiert werden. Fertige Pläne sollen exportiert werden können, um z.B. in angeschlossenen ERP-Systemen die Produktion nach diesem Plan zu steuern.

3.1 Erstellen eines Modells

Die Graphical User Interface (GUI) wird in einem Windows Fenster geöffnet und enthält diverse Menüleisten sowie den Model Workspace. Abbildung 3 zeigt die Benutzeroberfläche von PSD.

³³ kleinstmögliche Operationslänge in PSD = 1 Sekunde, kleinstmögliche Losgröße in PSD = 1 Mengeneinheit

³⁴ Demand Management, Tactical Network Optimization, PDP

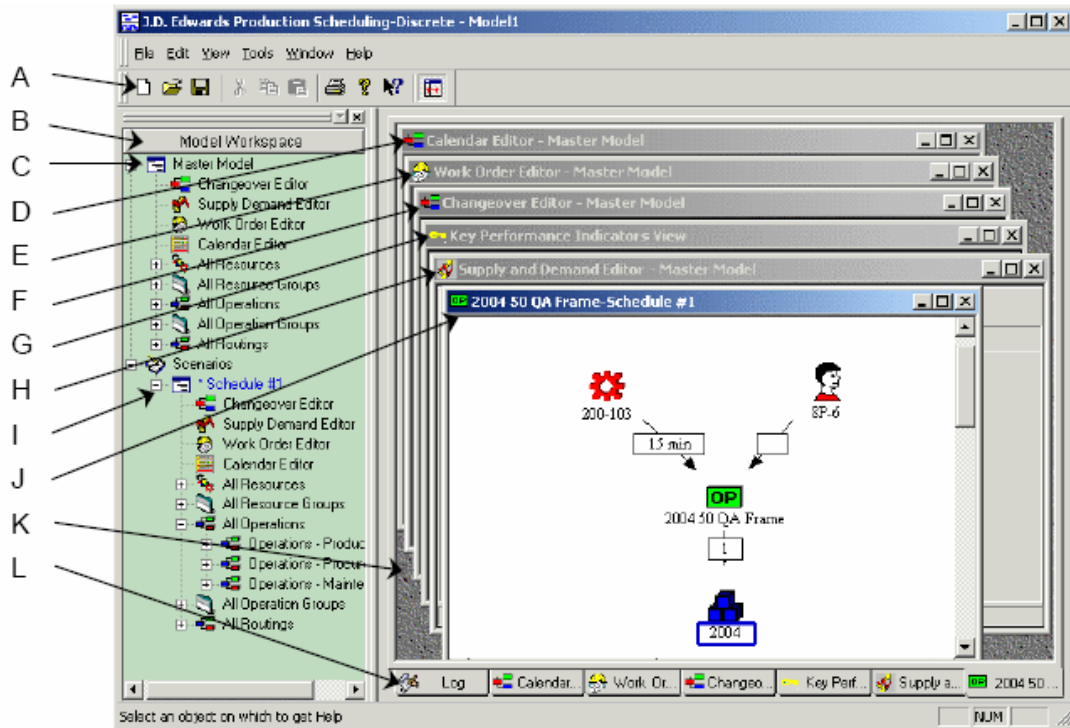


Abb. 3: Benutzeroberfläche von PSD. A = Toolbars, B = Model Workspace, C = Master Model, D = Calendar Editor, E = Work Order Editor, F = Changeover Editor, G = Key Performance Indicators View, H = Supply and Demand Editor, I = Scenarios, J = Object Window

Im Modell Workspace wird ein Basismodell (Master Modell) aufgestellt, welches im Anschluss in Szenarios abgewandelt werden kann. Anhand von Szenarios können „was wäre, wenn“-Möglichkeiten getestet werden und mit Lösungen aus anderen Szenarios verglichen werden. Die beste Lösung kann erneut als Basismodell abgespeichert werden.

Am Beginn der Modellierung sind unter Eigenschaften (Properties) im Master Modell Modelldaten zu definieren. Diese Daten umfassen das Ende des Planungszeitraums, einen eventuellen Fixkostenblock, die Perioden der Kostenabrechnung³⁵, sowie die Möglichkeit den Alternativalgorithmus RMO einzuschalten.

Die Antwort auf die Frage, ob RMO für ein Modell zugelassen wird, ergibt sich aus den Charakteristika des Produktionsprozesses. Haben Linien hohe Rüstkosten oder lange Anlaufzeiten bis sie effizient laufen, so ist es kostengünstiger die Linie solange auszulasten, bis eine gewisse Anzahl eines Produktes hergestellt wurde. Somit können Rüstkosten und –zeiten eingespart werden, was eine Verkürzung der Durchlaufzeit und eine Erhöhung der Linienauslastung zur Folge hat. Unter Eigenschaften im Master Modell muss fixiert werden, ob Rüstkosten oder Rüstzeiten minimiert werden sollen. Darüber hinaus ist der Produktionszyklus, in dem eine Mengeneinheit (ME) eines Produkts üblicherweise erzeugt wird (minimum cycle

³⁵ die Abrechnung der Kosten kann pro Minute, Stunde, Schicht, Tag oder Woche erfolgen

time), zu bestimmen. Mögliche Zykluszeiten sind „day“, „shift“ und „week“. Wenn ein Produkt nicht öfter als einmal am Tag erzeugt wird, sollte die Zykluszeit auf „day“ gestellt werden.

In einem weiteren Schritt sollen die Linien (Machines) modelliert werden. Für jede Linie lässt sich eine Kapazität eingeben, d.h. wie viele Operationen gleichzeitig durchgeführt werden können. Da in dieser Arbeit angenommen wird, dass bei einstufiger Produktion je Operation ein Produkt hergestellt werden kann, würde eine Erhöhung der Linienkapazität auf „zwei“ gleichbedeutend mit zwei parallelen Linien sein. Ferner ist RMO nur für einfache Linienkapazität verfügbar, weshalb im Folgenden von einer Operation je Linie ausgegangen wird. Außerdem kann der Rüstzustand am Beginn der Planungsperiode definiert werden. Hierbei ist jene Operation zu wählen, welche als Letztes auf dieser Linie durchgeführt wurde. Soll eine Linie erst angefahren werden, wenn ausreichend Vorprodukte vorhanden sind um eine Vollauslastung dieser Linie zu garantieren, kann dieser Umstand mitberücksichtigt werden.³⁶ Darüber hinaus ist die zeitliche Verfügbarkeit der Linie zu bestimmen. Als Kostengröße stehen Produktionskosten zur Wahl.

Für Produkte (Items) ist es notwendig zu definieren, ob diese hergestellt oder zugekauft werden. Für zugekaufte Produkte muss ein Anfangsbestand sowie ein Maximalbestand festgesetzt werden. Als Kosteneinstellungen gibt es Lagerkosten und Fehlmengenkosten. Letztere sind Kosten, die entstehen, wenn das Produkt nicht auf Lager und somit nicht lieferbar ist. Dazu zählen z.B. Konventionalstrafen für Überschreitung des Liefertermins oder Opportunitätskosten aufgrund entgangener Deckungsbeiträge.

Operationen (Operations) dienen dazu, Arbeitsgänge eines Produktionsprozesses zu veranschaulichen. In dieser Arbeit stellen Operationen die Beziehung zwischen Linien und Produkten dar. Hier gehen die Produktionskoeffizienten ein, d.h. wie viele Zeiteinheiten je Mengeneinheit notwendig sind. Die kleinste Operationslänge d.h. das kleinstmögliche Zeitintervall kann eine Sekunde betragen. Die Aufgabe von PSD im Rahmen der Erstellung des Produktionsplans ist es, die einzelnen Operationen zu Lösen zusammenzufassen. In dieser Arbeit wird soweit als möglich davon ausgegangen, dass jede Operation maximal eine ME Output produziert. Im Handbuch wird vorgeschlagen, logische Losgrößen³⁷ bereits vorab zu definieren, weil dies den Lösungsprozess erleichtert.³⁸ Das Problem von logischen Losgrößen ist, dass sie mehr Zeit in Anspruch nehmen, um eine gewisse Anzahl von Produkten, herzustellen. Dazu ein Beispiel: In der linken Hälfte von Abbildung 4 kann in vier Stunden jeweils ein Output (A, B, C) hergestellt werden. Operation B kann nach dem Start von Operation A beginnen (Starts after Start-Beziehung). Output C wird jeweils nach 12 und nach 16 Stunden hergestellt. In der rechten Hälfte von Abbildung 4 wird die Anzahl an Operationen verkürzt, indem logische Losgrößen verwendet werden. Da die Operationen B bzw. C nicht vor Beendigung von A beginnen können, ist die Durchlaufzeit um acht Stunden höher. Außerdem

³⁶ die Einstellung dafür ist „Upstream Buffering“; Voraussetzung ist, dass die Vorprodukte zwischengelagert werden können

³⁷ z.B. wenn in einer Stunde 1 ME produziert wird, können in 10 Stunden 10 ME hergestellt werden.

³⁸ Vgl. Peoplesoft (2004), S. 37

kann es u.U. zu einer Überproduktion kommen. Dieser Umstand wirkt sich auch negativ auf die Höhe der Lagerkosten aus.

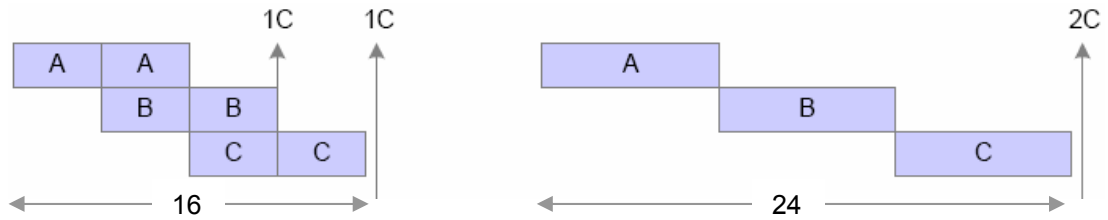


Abb. 4: Verwendung von logischen Losgrößen

RMO bietet die Möglichkeit Mindestlosgrößen vorzugeben. Die Mindestlosgröße kann entweder auf Basis der zeitlichen Beanspruchung einer Linie, oder auf Basis des produzierten Outputs in ME gewählt werden. Will man parallele Linien modellieren, so kann man entweder für jede Linie eine eigene Operation definieren, oder innerhalb einer Operation ein Resource Set einfügen. In einem Resource Set kann man die Priorität, welche Linie als erstes ausgelastet werden soll, festlegen. Legt man keine Prioritäten fest, so lastet der Solver beide Linien gleichmäßig aus. Außerdem müssen in einem Resource Set immer alle vorhandenen Linien für RMO modelliert werden. Für Operationen können Produktionskosten bestimmt werden, die jedes Mal, wenn die Operation durchgeführt wird, abgerechnet werden. Abbildung 5 zeigt die Modellierung eines Resource Set in einer Operation. Dabei geht aus der Operation eine ME des Produkts EP#2 hervor, wofür zwei ME von VP#2 benötigt werden. Die Herstellung erfolgt dabei entweder in einer Minute auf Linie#1 oder alternativ in fünf Minuten auf Linie#2. Die grüne Umrandung definiert die Linienpriorität d.h. welche Linie als erstes eingeplant werden soll. In Abbildung 5 haben beide Linien dieselbe Prioritätszahl, da beide grün umrandet sind.

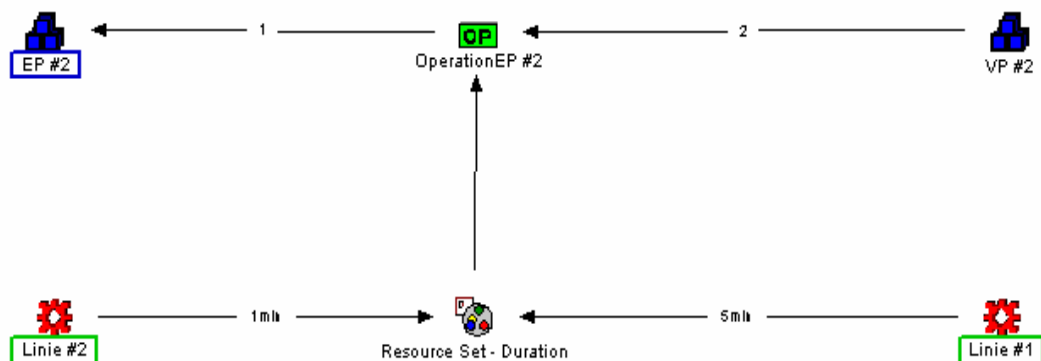


Abb. 5: Beispiel einer Operation mit Resource Set

Ist die Abfolge bestimmter Operationen immer gleich, können Routings bestimmt werden. In diesen wird die Reihenfolge festgelegt, sowie die Art der Anfangs- und

Endbeziehungen der Operationen. Letztere umfassen "Starts after Start", "Starts at End", "Starts after End", "Starts at Start" und "Ends at End". Während eine Operation unter Anwendung der Prioritätsregel "Starts at End" genau nach Ende der Vorgängeroperation beginnen muss, kann bei "Starts after End" eine Zeitspanne angegeben werden, innerhalb welcher die Nachfolgeoperation beginnen kann. In einem Routing kann immer nur eine Linie für RMO modelliert werden. Des weiteren können auf diese Weise Transport- oder Liegezeiten von Zwischenproduktbeständen zwischen zwei Produktionsstufen modelliert werden bzw. es können WIP-Bestände generell verboten werden. Werden Operationen mittels Routings verbunden, so kann RMO nur für jeweils eine Linie eingeschaltet werden.

Rüstvorgänge und die dabei anfallenden Rüstkosten und -zeiten werden im Changeover Editor eingetragen (Abb.6). Außerdem ist es notwendig auch den Zeitrahmen, innerhalb welchen eine Umrüstung stattfinden kann, im Feld „Calendar“ einzutragen. In PSD sind die Rüstvorgänge an den Operationen orientiert; die Operationen lassen sich zu Gruppen zusammenfassen. So können im Changeover Editor Operationen bzw. Produkte in Form von Rüstfamilien berücksichtigt werden.

	Machine	From Operation	To Operation	Duration	Calendar	Cost
1	Linie #1	OperationVP #1	OperationVP #2	5 hrs	Default	5.00
2	Linie #1	OperationVP #2	OperationVP #1	5 hrs	Default	5.00
3	Linie #2	OperationEP #1	OperationEP #2	5 hrs	Default	5.00
4	Linie #2	OperationEP #2	OperationEP #1	5 hrs	Default	5.00
5	Linie #3	OperationEP #1	OperationEP #2	5 hrs	Default	5.00
6	Linie #3	OperationEP #2	OperationEP #1	5 hrs	Default	5.00

Abb. 6 Changeover Editor Ansicht in PSD

Über den Calendar Editor lassen sich die Stillstandzeiten der Linien im Produktionsplan festlegen. Dabei können mehrere Zeitpläne erzeugt werden. So ist es möglich, den einzelnen Linien unterschiedliche Stillstandzeiten zuzuweisen.

In einem letzten Schritt müssen die Bedarfe im Supply & Demand Editor festgelegt werden. Da davon ausgegangen wird, dass zugekaufte Vorprodukte immer in ausreichender Anzahl vorhanden sind, werden Lieferungen vernachlässigt. Zu einem Zeitpunkt können mehrere Einzelbedarfe (line items) an verschiedenen Produkten zu einem Bedarf (demand) zusammengefasst werden. Ein derartiger Bedarf sollte sämtliche Lieferungen an einen Kunden zu einem bestimmten Zeitpunkt umfassen. Die Einzelbedarfe haben das bestellte Produkt und dessen Menge zum Inhalt. Weiterhin kann angegeben werden, ob es sich bei dem Bedarf um eine konkrete Bestellung (order) oder um eine Bedarfsprognose (forecast) handelt. Diese Einstellung hat jedoch keinen Einfluss auf das Lösungsverhalten.

Die oben vorgestellten Modelldaten können auf zwei unterschiedliche Weisen in PSD eingegeben werden. Bei kleineren Modellen empfiehlt es sich die Modelldaten direkt im Programm mit Hilfe der Editoren einzugeben. Dabei werden Diagramme aufgerufen, in welche Objekte, die durch graphische Symbole dargestellt sind, über

drag & drop aus dem Model Workspace eingebunden sind. Verbindungen zwischen den Modellen und Objekten in den Diagrammen lassen sich problemlos mit der Maus herstellen. Die Attribute der Objekte und der Verbindungen können in Kontextmenüs eingestellt werden. Bei komplexen Modellen mit großen Datenmengen ist es sinnvoller die Modellierung via Microsoft Excel vorzunehmen. Für diese Vorgehensweise ist ein eigenes Excel Spreadsheet mit vordefinierten Feldern vorhanden. Da die richtige und vor allem vollständige Erfassung der Daten sich als umständlich erweist, ist es empfehlenswert zuerst ein rudimentäres Modell³⁹ in PSD aufzustellen, das im Anschluss in Excel vervollständigt wird. Nachdem die Daten auf ihre Gültigkeit überprüft wurden, können sie in PSD importiert werden. Falls dabei Fehler auftreten, protokolliert PSD diese in einer Log-Datei.

Ist das Master Modell erstellt, können daraus Szenarios abgeleitet werden. Dabei handelt es sich um Kopien des Master Modells, deren Modelldaten anwendungsspezifisch veränderbar sind.

3.2 Lösung eines Modells

3.2.1 Eigenschaften des Lösungsalgorithmus

Nach Aufstellen eines Modells folgt der Lösungsvorgang. Der „herkömmliche“ PSD-Solver sowie der RMO-Solver basieren auf constraint programming (CP).⁴⁰ CP ist ein relativ neuer Ansatz, Lösungen für kombinatorische Entscheidungsprobleme, wie sie in der operativen Produktionsplanung vorkommen, zu programmieren. Die Grundidee von CP ist einen groben Rahmen für Modellformulierungen und Lösungsmöglichkeiten basierend auf einer einzigen Programmiersprache zu bieten. Eher generell gehaltene Lösungsverfahren werden im Anschluss in das CP-System eingebettet. Dadurch ist der Anwender in der Lage nicht nur das Entscheidungsproblem (Modell) zu formulieren, sondern auch grobe Richtlinien vorzugeben, wie nach einer möglichen Lösung gesucht werden soll. Diese groben Richtlinien sind im Fall von PSD Nebenbedingungen, die im Lösungsprozess entweder aufgenommen oder vernachlässigt werden können (siehe 3.2.2). Für den Lösungsvorgang verwendet CP keine mathematischen Optimierungsprobleme d.h. es gibt keine Zielfunktion, die es zu minimieren bzw. maximieren gilt. Stattdessen werden Constraint Satisfaction Problems (CSP) gelöst, die Variablen, Domänen und Gleichungen⁴¹ zum Inhalt haben. Für jede Variable gibt es eine entsprechende Domäne, die eine Liste von möglichen Werten enthält. Die Aufgabe des CSP ist nun jeder Variable einen Wert so zuzuordnen, dass alle Gleichungen erfüllt werden. Ist die kritische Nebenbedingung erfüllt, wird zur nächsten kritisch gewordenen Nebenbedingung (floating bottlenecks) übergegangen. Die Lösungssuche wird von Suchalgorithmen unterstützt, welche die Anzahl der Domänen systematisch reduzieren.⁴²

³⁹ Grundstruktur bestehend aus beispielsweise einer Operation, einem Produkt, einem Bedarf usw.

⁴⁰ Vgl. Stadler/Kilger (2005), S. 493

⁴¹ die Gleichungen müssen nicht lineare oder integrale Werte annehmen. Z.b. für die Variablen x_1 und x_2 : $x_1 \neq x_2$, $x_1 \cdot x_2 \leq 10$ oder $x_1 \geq 3 \rightarrow x_2 \geq 7$

⁴² Vgl. Stadler/Kilger (2005), S. 494

PSD kann für alle Modelle, die lösbar sind, einen Produktionsplan erzeugen. Dabei benutzt PSD einen selbst-konfigurierenden Solver der sich an geänderte Modelldaten anpasst. Falls sich keine Lösung ergibt, d.h. das Modell wird als unlösbar angezeigt, werden die Gründe für das Scheitern in einer Log-Datei protokolliert. Vor allem bei komplexeren Modellen reichen diese Fehlerprotokolle zumeist nicht aus, um die genaue Ursache für das Scheitern herauszufinden.

3.2.2 Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Lösungsalgorithmus

Ist das Master Modell bzw. eine Abwandlung davon gelöst und ist daraus ein gültiger aber nicht zufriedenstellender Produktionsplan entstanden, so kann ein repair solve gestartet werden. Bevor der erneute Lösungsversuch gestartet wird, können die Nebenbedingungen des Modells vernachlässigt werden. Solche Nebenbedingungen sind unter anderem Bedarfstermine und Planungshorizont aber auch die Eigenschaften der Linien (Kapazität, Stillstandzeiten). Eine Erweiterung von Nebenbedingungen, z.B. die Einführung von neuen Stillstandzeiten, ist problemlos möglich. Wird beispielsweise die Kapazität einer Linie relaxiert, so berücksichtigt der Solver diese beim Lösungsversuch nicht mehr. Auf diese Weise lässt sich gegebenenfalls die Fehlerquelle eines unlösbaren Produktionsplans finden, in dem man feststellt, ob sich der Fehler nur auf eine oder mehrere Linien beschränkt.

Eine weitere Möglichkeit der Einflussnahme besteht darin, sog. Bedarfsregeln zu verwenden. Für jeden Bedarf werden neben dem geforderten Produkt, der Menge und dem Liefertermin noch weitere Daten aufgenommen, die Einfluss auf die Lösung haben. So kann man als Art der Terminierung (build strategy) entweder just-in-time (JIT) oder pre-build (PRE) wählen. Bei JIT erfolgt eine Rückwärtsterminierung, d.h. die Operationen werden beginnend vom Zeitpunkt des Bedarfsanfalls rückwärts schreitend so früh wie möglich eingeplant. So können die spätesten Startzeitpunkte ermittelt werden. Bei der Vorwärtsterminierung wird davon ausgegangen, dass jede Operation so bald als möglich begonnen wird. Als Ergebnis erhält man den frühest möglichen Fertigstellungszeitpunkt. Diese Variante impliziert höhere Lagerkosten. Außerdem lassen sich Prioritätsregeln für die Bedarfe festlegen. Hierbei kann den Bedarfen eine Priorität für die Einplanung zugewiesen werden. So wird ein Bedarf mit Priorität 1 bei JIT möglichst als letzter eingeplant.

Erlaubt man Nachlieferungen (back orders), so gibt man dem Solver damit umso mehr Freiheiten, die Operationen einzuplanen, desto weiter man das Ende des Planungshorizonts vom zeitlichen Anfall der Bedarfe nach hinten verschiebt.⁴³

Laut Handbuch soll bei der Makespan-Strategy entweder so schnell wie möglich (minimize) oder so langsam wie möglich (maximize)⁴⁴ produziert werden, wobei sich auch hier Prioritäten vergeben lassen. Die Funktion der Makespan-Strategy konnte wie bereits in der von Mauch evaluierten Version 3.10 nicht nachvollzogen werden, da kein Produktionsplan erzeugt wurde, bei dem eine Änderung der Einstellung

⁴³ auf die Probleme von Nachlieferungen wurde bereits in Abschnitt 2.5 hingewiesen

⁴⁴ die theoretische Sinnhaftigkeit dieser Einstellung konnte nicht ermittelt werden

Auswirkungen auf den Plan gehabt hätte.⁴⁵ Auf diese Funktion wird daher nachfolgend nicht weiter eingegangen.

3.3 Analyse des Produktionsplans

Die Lösung, d.h. der Produktionsplan, kann entweder in PSD über hauptsächlich graphische Darstellungen betrachtet werden oder in eine Excel-Datei exportiert werden. Die in PSD verwendeten Ansichten sind: Demand Gantt, Resource Gantt, Item Graph, Item Gantt⁴⁶, Operation Gantt, Resource Utilization, Resource Contention, Resource Calendar und MultiCapacity Resource Graph. In diesen Ansichten lassen sich Nebenbedingungen vor einem Repair Solve gezielt vernachlässigen. Im Folgenden wird auf die wichtigsten graphischen Darstellungsmöglichkeiten eingegangen.

Demand Gantt

Die Demand Gantt Ansicht (Abb. 7) gliedert sich in zwei Teilbereiche; einerseits in den Demand Tree und andererseits in eine Kalender Ansicht. Der Demand Tree enthält die im Supply & Demand Editor eingegebenen Bedarfe. In der obersten Darstellungsebene („All Demands“) wird in der Kalender Ansicht mittels eines Balkens auf gleicher Höhe die Gesamtdauer der Produktionszeit angezeigt. Die aggregierten Gesamtbedarfe lassen sich bis zu den für die Einzelbedarfe notwendigen Operationen auflösen. Die Produktions- bzw. Rüstzeit der in den Operationen verwendeten Linien kann ebenfalls angezeigt werden. Schwarze Balken kennzeichnen Bedarfe, die termingetreu erfüllt werden können. Rote Balken stehen für Bedarfe, bei denen Nachlieferungen erforderlich sind. Der Anfang des Balkens wird vom Anfangszeitpunkt der frühesten Operation bestimmt, das Ende vom Zeitpunkt der letzten Operation. In Abbildung 7 gliedert sich der aggregierte Gesamtbedarf „1“ in die zwei Einzelbedarfe „1“ und „2“. Für den Einzelbedarf „1“ (Produkt EP_dl) sind sechs Operationen erforderlich. Für zwei ME von EP_dl, die nicht bedarfssynchron produziert werden können, sind vier ME von Produkt VP_d notwendig. VP_d wiederum wird auf Linie#1 hergestellt.

⁴⁵ Vgl. Mauch (2002), S. 30

⁴⁶ während die Item Graph Ansicht den Bestandsverlauf eines Produktes darstellt, gibt die Item Gantt Ansicht Auskunft über die mengenmäßige und zeitliche Zuweisung eines Produktes zu einer Linie

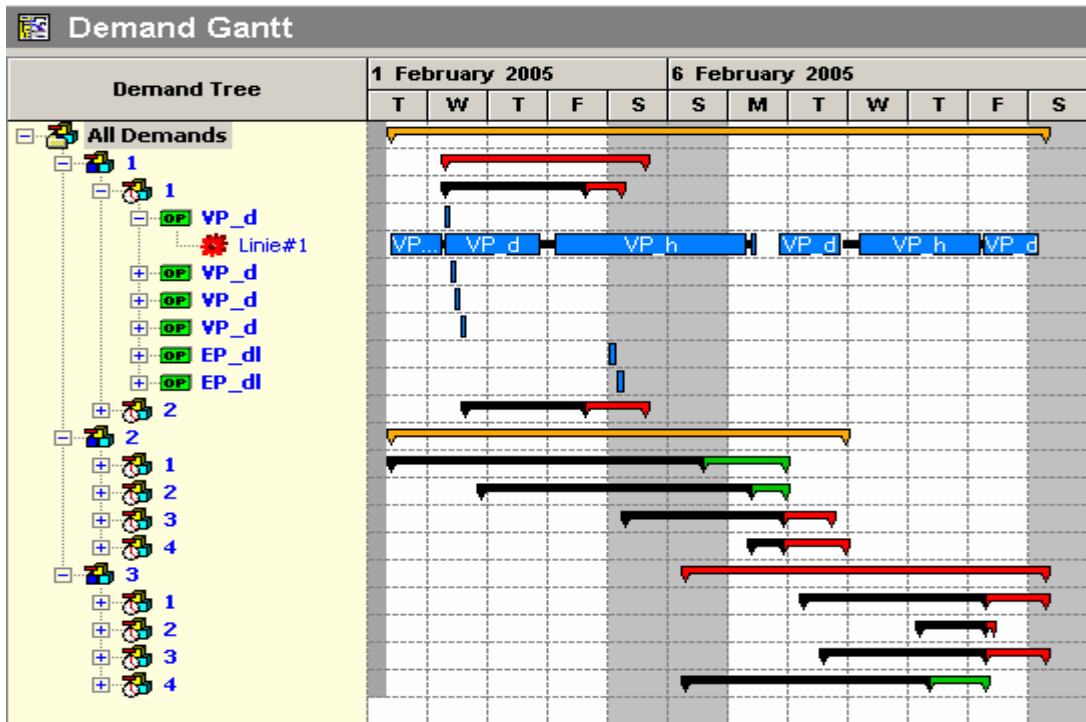


Abb. 7: Demand Gantt Ansicht eines Produktionsplans

Resource Gantt

Diese Ansicht stellt den Produktionsplan auf Linienebene dar (Abb. 8). Der Resource Gantt gibt Aufschluss darüber, zu welchem Zeitpunkt die einzelnen Operationen auf einer Linie eingeplant werden bzw. wann ein Produktwechsel erfolgt. Für jede Linie werden im Kalender die auf ihr durchgeführten Operationen mit blauen Balken angezeigt. Stillstandzeiten sind durch rote, Rüstzeiten durch schwarze dünne Querbalken gekennzeichnet.

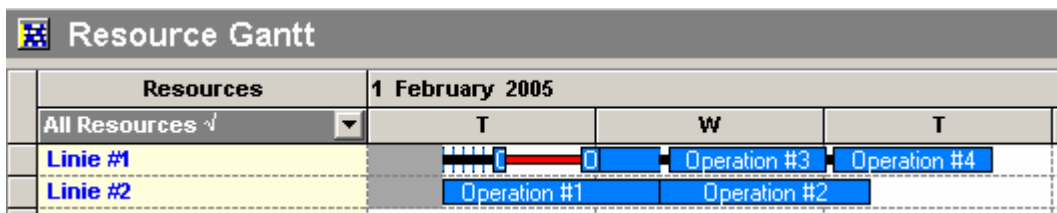


Abb. 8: Resource Gantt Ansicht in PSD

Item Graph

Die Item Graph Ansicht zeigt den Bestandsverlauf aller zugekauften bzw. hergestellten Produkte innerhalb des Planungszeitraums. Abbildung 9 zeigt die absolute Bestandshöhe eines Vorproduktes innerhalb eines Planungszeitraums von

16 Tagen an. Im rot unterlegten Bereich würden Fehlmengen mit Bestandsunterschreitungen liegen.

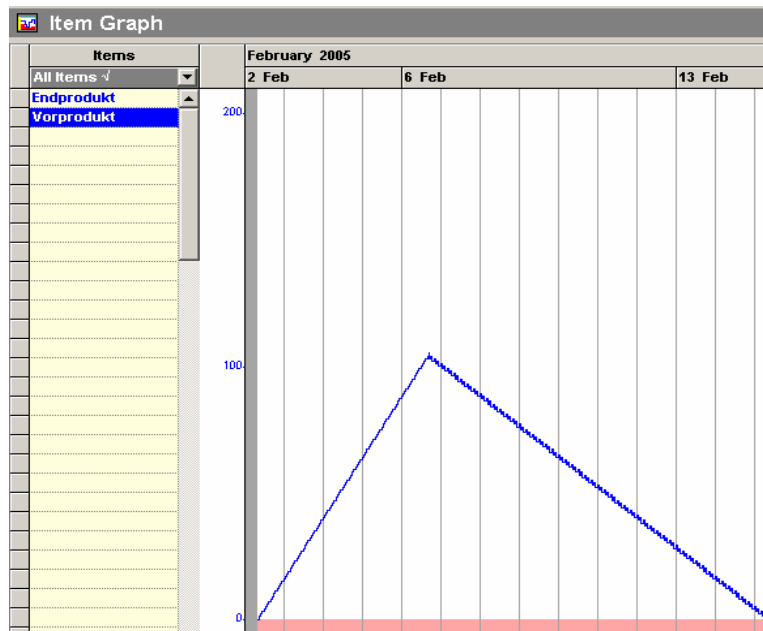


Abb. 9: Item Graph Ansicht in PSD

Operation Gantt

Operationen werden im Kalender mit ihren geplanten Anfangs- und Endzeiten mit blauen Balken dargestellt (Abb.10). Werden Operationen zu Losen zusammengefasst, so ergibt sich die Operationslänge aus der Gesamtdauer der Summe der Einzeloperationen. In dieser Ansicht ist es möglich einzelne Operationen zu fixieren, so dass sie nach einem Repair Solve wieder zur selben Zeit eingeplant werden. Des weiteren können Operationen in bestehende Bereitschaftszeiten einer Linie manuell verschoben werden, sofern dies vom Routing bzw. der Dispositionsstufe zugelassen wird.

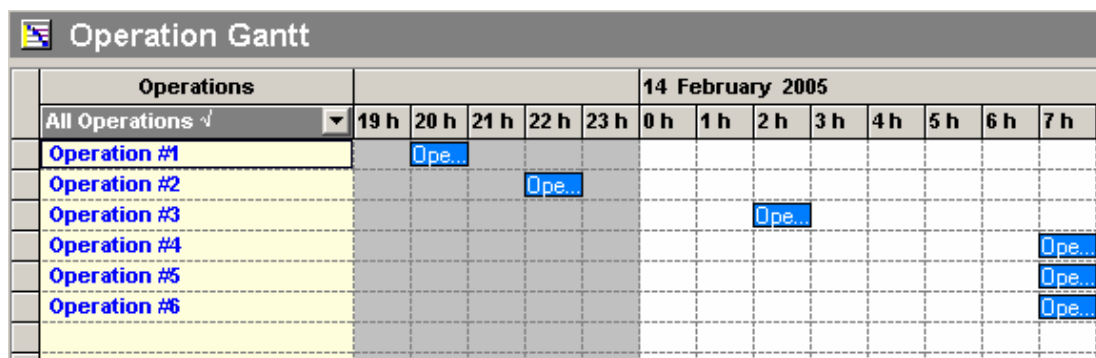


Abb. 10: Operation Gantt Ansicht in PSD

Resource Contention

Diese Darstellungsform zeigt die Auslastung einer Linie über den Zeitraum ihrer Beanspruchung (Abb.11). Rotgefärbte Balken bedeuten beispielsweise eine Linienauslastung von 90 bis 100%, dunkelgrüne Balken 0 bis 10% und orange Balken 80 bis 90%. Wird die Resource Contention Ansicht während eines Lösungsvorgangs geöffnet, so kann die Linienbeanspruchung durch die einzelnen Operationen bei ihrer Einplanung mitverfolgt werden.

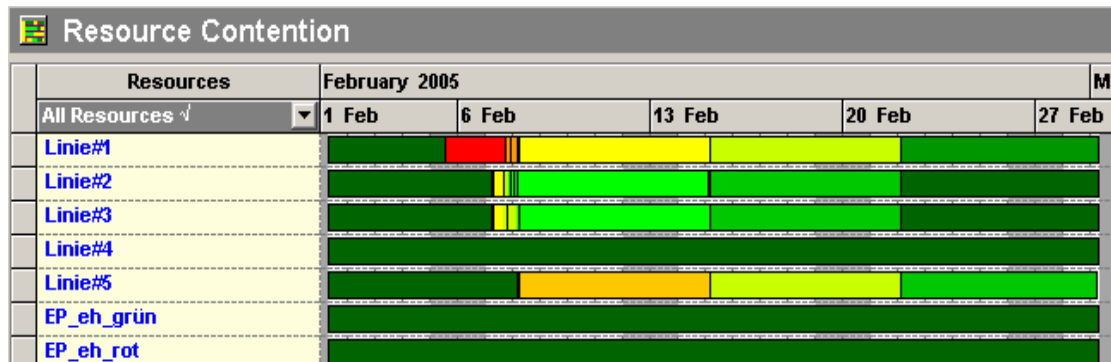


Abb.11: Resource Contention Ansicht in PSD, während eines Lösungsvorgangs

Die zweite Möglichkeit den erstellten Produktionsplan graphisch aufzubereiten, erfolgt in Excel. Dazu werden die Daten eines gelösten Modells nach Excel exportiert und in diversen Tabellen angezeigt. Die Darstellungsformen sind den PSD Ansichten nachempfunden.

Zur Evaluierung eines Produktionsplans und zum Vergleich mehrere Szenarios gibt es in PSD sog. Key Performance Indicators (KPI), die ebenfalls nach Excel exportierbar sind. Diese Kennzahlen gliedern sich in vier Gruppen: Customer Service, Materials, Costs und Manufacturing. Unter Customer Service wird unter anderem die Fähigkeit Bedarfe aus dem Lager zu befriedigen angezeigt. Materials enthält z.B. den Lagerumschlag, Manufacturing die Summe aller Rüstzeiten und die gesamte Linienauslastung des Planungshorizonts. Die Kostengruppe zeigt Rüst-, Lager-, und Produktionskosten an. PSD bietet die Möglichkeit sämtliche KPI aller gelösten Szenarios miteinander zu vergleichen.

4 Prüfung der Performance von RMO

Im folgenden Abschnitt wird die Performance von RMO geprüft. Dabei werden verschiedene einfache Modelle aufgestellt und sowohl mit dem herkömmlichen PSD-Solver als auch mit RMO gelöst. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Maßstab für die Eignung von PSD für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung. Werden unterschiedliche Ergebnisse von einem Modell angesprochen, so beziehen sich diese auf Szenarios des Master Modells. Um die Rechenzeit des Solvers zu verkürzen und unnötige Modellkomplexität zu vermeiden, sei nochmals darauf hingewiesen, dass auf die Verwendung von nicht relevanten Daten verzichtet wird.⁴⁷ In allen Modellen und Szenarios wird von einem Beginn des Planungshorizonts um 08:00 Uhr ausgegangen. Wenn nicht explizit anders erwähnt, ist das Ende des Planungshorizonts ebenfalls 08:00 Uhr. Die Planungsperiodenlänge ist dabei modell- bzw. szenarioabhängig. Bei mehrstufigen Problemen ist von offener Losweitergabe auszugehen. Eine ME kann erst nach erfolgter Herstellung weiterverarbeitet werden. Die Modelle und Ergebnisse sind auf der beigelegten CD-ROM, deren Inhalt im Anhang erläutert wird, abgespeichert.

4.1 Modell1L3P⁴⁸

In diesem ersten Modell mit einer Produktionslinie (1L) und drei Produkten (3P) sollen grundlegende Eigenschaften von RMO wie die Bestimmung der Losgröße bzw. das Rüstverhalten untersucht werden. Darüber hinaus soll geprüft werden, ob Rüst- bzw. Lagerkosten einen Einfluss auf das Lösungsverhalten ausüben.

In einer Stunde kann auf einer Linie ein Produkt hergestellt werden. Aus Operation#1 (-#2, -#3) gehen die Produkte P1, P2 und P3 hervor. Die Rüstzeiten bei einem Produktwechsel betragen einheitlich eine Stunde. Der Planungshorizont umfasst eine Woche, was einer Maximalkapazität von 55 ME je Produkt entspricht. In einem ersten Szenario⁴⁹ wird ein Bedarf angenommen, der am Ende des Planungshorizonts anfällt und der Maximalkapazität entspricht. Es soll hierbei die Logik der Losgrößenwahl bzw. des Rüstverhaltens von RMO überprüft werden. Gemäß Abbildung 12 wird immer der Gesamtbedarf von 55 ME eines Produktes erzeugt, bevor für das Nächste gerüstet wird. Somit wird die Minimalrüstzeit von zwei Stunden erreicht, was sowohl für die Pre-Built als auch für die JIT-Lösung zutrifft. Der Rüstzustand am Periodenbeginn wurde nicht explizit definiert.

⁴⁷ diese Daten beinhalten z.B. Zugekaufte Rohstoffe, Lieferanten, Lagerkapazitäten, Arbeiter usw.

⁴⁸ siehe Anhang A.I

⁴⁹ Schedule#1RMO

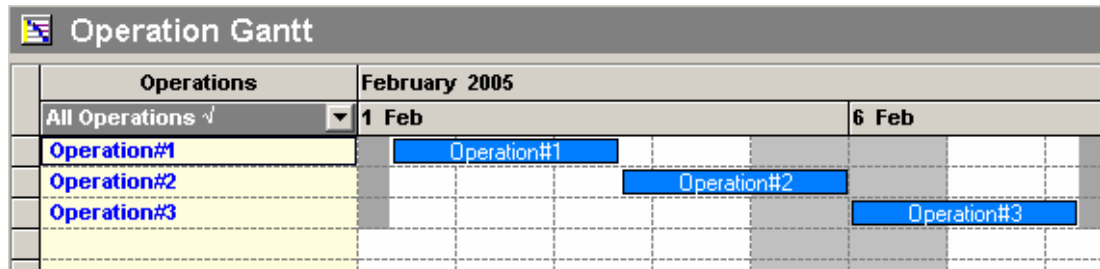


Abb. 12: Operation Gantt Modell1L3P

In diesem sehr einfachen Modell soll zunächst der Einfluss von Rüstkosten auf das Lösungsverhalten untersucht werden.⁵⁰ Deshalb werden die Rüstkosten von Operation#1 auf Operation#2 um 10 GE erhöht. Alle übrigen Rüstreihenfolgen weisen die gleichen Rüstkosten auf (10 GE). Soll es zu einer Minimierung der Rüstkosten kommen, so kann außer der Rüstreihenfolge von Produkt#1 auf Produkt#2 jede beliebige Reihenfolge eingeplant werden. Die minimalen Rüstkosten dieses Szenarios betragen daher 20 (10+10) GE. RMO belässt bei der Erstellung eines neuen Produktionsplans die Rüstreihenfolge jedoch unverändert, wodurch Rüstkosten von 30 (20+10) GE entstehen. Dieses Ergebnis lässt den Schluss zu, dass reihenfolgeabhängige Rüstkosten keinen Einfluss auf die Lösung haben, obwohl in den Modelleigenschaften die Minimierung der Rüstkosten explizit eingestellt werden kann.

Als nächstes wurde die Berücksichtigung von Lagerkosten untersucht.⁵¹ Dazu wurde für P2 und P3 ein Lagerkostensatz von 1 GE/ME definiert. Die Lagerkosten für eine ME des Produkts P1 betragen 10 GE. Rüstkosten wurden vernachlässigt. Um einen kostenminimalen Produktionsplan zu erstellen, sollte daher das Los von P1 bedarfssynchron d.h. möglichst am Ende des Planungshorizonts eingelastet werden. Auch in diesem Szenario bleibt die Reihenfolgeplanung im Vergleich zum Ausgangsszenario unverändert. Es ist daher offensichtlich, dass auch die Lagerkosten vom Solver nicht berücksichtigt werden.

Eine Neuerung gegenüber früheren Versionen von PSD ist die Modellierung des Anfangszustandes einer Linie. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass diese Funktion fehlerhaft ist. Definiert man z.B., dass die Linie am Periodenbeginn für P2 gerüstet ist, so ist zu erwarten, dass zunächst der gesamte Bedarf von P2 eingeplant wird, bevor ein Produktwechsel erfolgt. Alle erstellten Produktionspläne beginnen aber mit einem Umrüsten von Operation#2 auf Operation#1 bevor die Produktion von P2 überhaupt beginnen kann.⁵² Dies kann in den KPI, die den unnötigen Rüstvorgang ausweisen, sowohl an den Rüstzeiten als auch –kosten abgelesen werden. Erhöht man die Rüstzeiten von Operation#1 auf Operation#2 und von Operation#2 auf Operation#3 um 30 Minuten so kommt es zu einer Losteilung: In Abbildung 13 wurde Operation#2 als anfänglicher Rüstzustand definiert und die Einstellung PRE gewählt. RMO beginnt hierbei richtigerweise mit P2, teilt aber das Los, indem er eine ME an das Ende des Planungshorizonts

⁵⁰ Schedule#2RMORüstkosten

⁵¹ Schedule#2RMOLagerkosten

⁵² Schedule#2lastop#2

verschiebt, wodurch ein zusätzlicher Produktwechsel von P3 auf P2 erforderlich wird. Dieser unnötige Rüstvorgang impliziert zusätzliche Rüstzeiten bzw. –kosten.

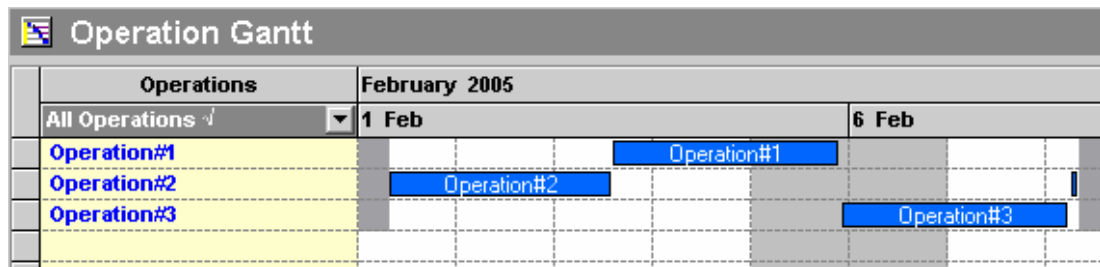


Abb. 13: Operation Gantt Modell1L3P, Rüstzustand am Beginn = Operation#2

Erhöht man sämtliche Rüstzeiten auf 90 Minuten, so dass sich zeitlich gerade noch eine optimale Lösung mit zwei Produktwechseln ausgeht, kann bei Definition des Anfangszustandes für P2 kein gültiger Produktionsplan mehr erstellt werden. Dies ist deshalb der Fall, weil RMO nun keine freie Kapazität für einen zusätzlichen (unnötigen) Rüstvorgang hat. Es scheint daher, dass der Solver dabei jene Operation als erstes einplant, die an oberster Stelle im Model Workspace erstellt wurde. Es kann möglicherweise sein, dass RMO deshalb am Periodenende eine Umrüstung auf Operation#2 durchführt, um den Anfangsrüstzustand der Folgeperiode zu berücksichtigen. Ist dies der Fall, so müsste jedoch auch mit der Einstellung JIT ein ähnliches Ergebnis erzielt werden. Wird aber JIT gewählt, so plant der RMO-Solver am Periodenbeginn eine Umrüstung (von Operation#2 auf Operation#3) ein und beendet die Periode mit dem Umrüsten auf Operation#1.

Diese Szenarios haben gezeigt, dass weder Rüst- noch Lagerkosten als Nebenbedingungen im Lösungsprozess des Solvers berücksichtigt werden. Diese beiden Kostenarten sind jedoch wesentliche Zielgrößen, die es bei der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung zu minimieren gilt. Der Rüstzustand am Beginn der Periode kann zwar modelliert werden, dies führt allerdings in den meisten Fällen zu suboptimalen Produktionsplänen. Auch in allen nachfolgenden Modellen trat dieses Problem auf, das nur umgangen werden kann, indem man für die Bedarfe Prioritäten vergibt. Vergibt man beispielsweise im obigen Modell für den Bedarf von P2 die Priorität eins, so wird der gesamte Bedarf in einem Los produziert bevor für das nächste Produkt gerüstet wird. Die Vergabe von Prioritäten für Bedarfe bedeutet aber, dass der Anwender die Reihenfolgeplanung manuell durchführen muss.

4.2 Modell1VP1EP⁵³

Anhand dieses Modells soll die Logik der Linienzuweisung einerseits mit dem Standardsolver von PSD und andererseits mit RMO überprüft werden. Es wird ein Vorprodukt in einer Stunde auf Linie#1 hergestellt. Im Anschluss kann es entweder auf Linie#2 in einer Stunde oder auf Linie#3 in drei Stunden zum tatsächlichen

⁵³ siehe Anhang A.II

Endprodukt weiterverarbeitet werden. Operation#1, die das Vorprodukt erstellt, und Operation#2, aus der das Endprodukt hervorgeht, sind durch ein Routing verbunden, das sicherstellt, dass keine Zwischenbestände aufgebaut werden. Der Bedarf von 84 ME fällt am Ende des einwöchigen Planungshorizontes an (entspricht 50% Auslastung auf Linie#1).⁵⁴ Die build strategy entspricht JIT.

Obwohl genügend freie Kapazitäten vorhanden sind, wird auf der ineffizienten Linie#3 produziert (Abb. 14).

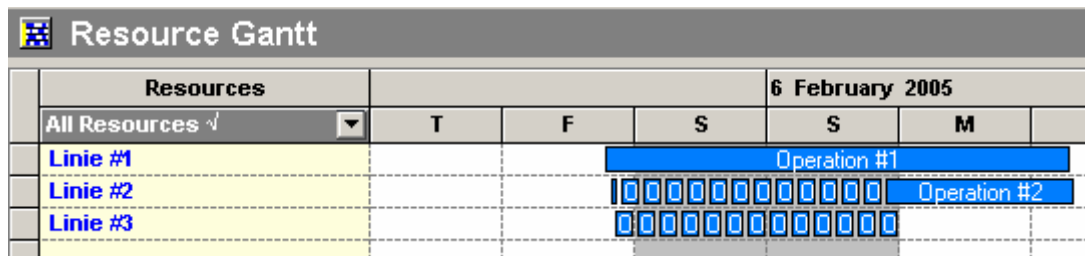


Abb. 14: Resource Gantt Modell1VP1EP ohne RMO

Erst am Ende des Planungshorizontes wird das Endprodukt durchgehend auf der effizienten Linie#2 hergestellt. Der Solver versucht hierbei alle zur Produktion zur Verfügung stehenden Linien auszulasten. Diese Vorgehensweise ist problematisch, weil mit ihr zusätzliche Produktionskosten einer ganzen Linie verbunden sind, ohne dass die Produktionszeiten der Endprodukte verkürzt werden.

Die produktionsfreien Zeiten zwischen den einzelnen Operationen verursachen normalerweise entweder Bereitschaftskosten für die Aufrechterhaltung des Rüstzustandes oder Abschalt- und Anlaufkosten. In PSD gibt es allerdings keine Möglichkeit diese Kosten zu berücksichtigen. Es kann nur versucht werden, die einzelnen Operationen manuell durch „copy und paste“ aneinanderzureihen und einen „repair“ solve zu starten. In Folge dessen können die unnötigen produktionsfreien Zeiten reduziert werden.

Modelliert man hingegen Linie#2 mit RMO, so wird der gesamte Bedarf des Endprodukts auf dieser Linie hergestellt (Abb. 15).⁵⁵ Der Solver berücksichtigt demnach, dass es bei ausreichender Kapazität ineffizient ist, eine weitere Linie für die Produktion einzuplanen. Dadurch können auch die Produktionsunterbrechungen vermieden werden.

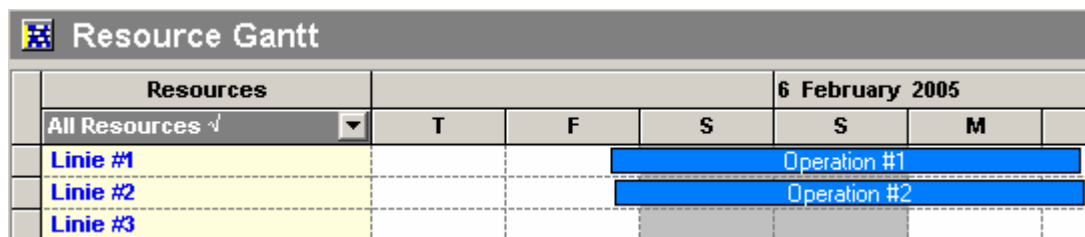


Abb. 15: Resource Gantt Modell1VP1EP mit RMO

⁵⁴ Schedule#1

⁵⁵ siehe 3.1, S.15; in diesem Modell kann aufgrund des Routings nur eine Linie mit RMO modelliert werden

In einer Abwandlung des Modells⁵⁶ wurde noch ein zweites Vorprodukt (VP#2), das auf einer zusätzlichen parallelen Linie (Linie#1.1) oder auf Linie#3 erzeugt werden kann, eingeführt und mit einem Produktionskoeffizienten von „zwei“ in das Endprodukt eingeht. Ohne RMO werden sowohl Bedarfe von VP#2 als auch vom Endprodukt auf Linie#3 eingeplant. Mit dem RMO-Solver wird die langsamere Produktionslinie wiederum nicht ausgelastet. Bei allen geprüften Szenarios dieses Modells haben sich keine Unterschiede der Linienzuweisung ergeben, wenn die build strategy PRE gewählt wurde.

Wie anhand dieses Modells demonstriert wird, liegt eine Stärke von RMO darin, zeitlich ineffiziente Linien nicht für die Produktion einzuplanen. Diese Eigenschaft ist vor allem dann günstig, wenn mit den vorhandenen Kapazitäten der Bedarfstermin eingehalten werden kann um somit keine unnötigen Produktionskosten zu verursachen.

Im Lauf der Untersuchung hat sich herausgestellt, dass die Produktionskosten im Gegensatz zu den Lager- und Rüstkosten zwar im Lösungsprozess berücksichtigt werden, dies geschieht jedoch auf eine anscheinend fehlerhafte Weise. So kann es vorkommen, dass der Solver ein Modell nicht lösen kann, wenn für parallele Linien unterschiedliche Produktionskosten definiert werden. Dieses Problem soll anhand eines einfachen Beispiels⁵⁷ veranschaulicht werden: Ein Modell umfasst zwei parallele Linien mit einer Produktionskapazität von je 50 ZE. Auf diesen Linien kann ein Produkt mit einem Produktionskoeffizienten von 1 ME/ZE hergestellt werden. Folglich ergibt sich eine maximale Produktionskapazität von 100 ME. Definiert man nun variable Produktionskosten im „operating cost“ - Feld einer der beiden Linien, so kann das Modell nicht gelöst werden.⁵⁸ Diese Lösungseigenschaft lässt den Schluss zu, dass der Solver offenbar die Eingabe der Produktionskosten bei der Lösung berücksichtigt und aufgrund dessen versucht die „teurere“ Linie nicht auszulasten. Der daraus resultierende Fehler ist jedoch der, dass die Produktionskosten verursachende Linie überhaupt nicht eingeplant wird und somit keine Lösung möglich ist. Daher kann es vorkommen, dass RMO einen Plan für unlösbar erklärt, obwohl dies theoretisch nicht der Fall ist. Aus diesem Grund wurde auf die Definition von Produktionskosten im dafür vorgesehenen Linienfeld verzichtet. Stattdessen wurden die Produktionskosten beim Ergebnisvergleich mit GLSP im Feld „setup costs“ der einzelnen Operationen definiert. Diese Kosten werden bei der Lösung zwar nicht berücksichtigt, jedoch erfolgt die Art ihrer Berechnung korrekt. Auf diese Weise wird je ME, die aus einer Operation hervorgeht, die vorher definierte GE berechnet.⁵⁹

⁵⁶ Schedule#2

⁵⁷ Schedule_bug#2 Anhang B.IV

⁵⁸ Die ausgegebene Fehlermeldung lautet: „insufficient resource capacity...“.

⁵⁹ Siehe auch 4.5.2

4.3 Modell2VP1EP⁶⁰

Nachdem reihenfolgeabhängige Rüstzeiten vom Solver nicht berücksichtigt werden, soll anhand dieses Modells das Lösungsverhalten mit bzw. ohne RMO bei reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten untersucht werden. Auf Linie#1 kann in einer Minute eine ME vom ersten Vorprodukt (VP#1) bzw. eine ME vom zweiten Vorprodukt (VP#2) hergestellt werden. Die Rüstzeit von VP#1 auf VP#2 beträgt eine Stunde, ein Umrüsten von VP#2 auf VP#1 dauert allerdings fünf Stunden. Nach der Produktion der Vorprodukte kann auf Linie#2 das Endprodukt (EP) gefertigt werden. Die Bearbeitungszeit hierfür beträgt fünf Minuten je ME. Die Operationslängen sind deswegen relativ gering gehalten, da der Solver sie sinnvoll zu Produktionslosen zusammenfassen soll. Es wird ein Bedarf von 100 ME für das Endprodukt bestimmt. Der Bedarf fällt am Ende des Planungshorizonts an. Der Planungszeitraum umfasst einen Tag und bietet somit ausreichend freie Linienkapazitäten.

Erwartungsgemäß sollte der Solver bei Erstellen des Produktionsplans zuerst mit der Einplanung von VP#1 beginnen und danach auf VP#2 umrüsten, da diese Reihenfolge geringere Rüstzeiten aufweist. Nachdem genügend Bestand der Vorprodukte aufgebaut ist, sollte mit der Fertigung des Endproduktes begonnen werden. Der theoretisch frühestmögliche Startzeitpunkt für die Produktion von EP, unter der Voraussetzung von minimalen Rüstzeiten, liegt bei 161 Minuten⁶¹, nämlich genau nachdem das eine ME von VP#2 produziert wurde. In einem ersten Versuch wurde das Modell mit dem PSD Standardsolver gelöst⁶². Schon bei diesem einfachen Modell zeigt sich, dass der Solver die Reihenfolgeplanung eher willkürlich trifft, weil das Los von VP#1 geteilt wird, was eine fünfstündige Umrüstung erfordert (Abb.16).

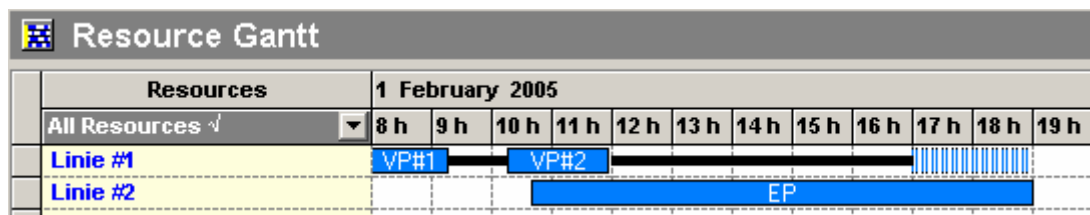


Abb. 16: Resource Gantt Modell2VP1EP, ohne RMO

Es wird zwar richtigerweise mit der Produktion von VP#1 begonnen, allerdings kommt es nach 76 ME zu einer Umrüstung auf VP#2. Das Los von VP#1 wird folglich geteilt: nach erneuter Umrüstung der Linie#1 auf VP#1 erfolgt die Produktion der restlichen 24 ME. Das zweite Los von VP#1 wird jedoch nicht kontinuierlich aufgelegt. Die einzelnen Operationen werden im Abstand von 4 Minuten eingeplant, so dass sich die Linienauslastung von Linie#1 über die gesamte Durchlaufzeit des Endprodukts erstreckt. Der Rüstzustand wird dabei aufrechterhalten und Linie#1 um mehr als sechs Stunden länger beansprucht als nötig wäre. Es ist festzuhalten, dass

⁶⁰ Siehe Anhang A.III

⁶¹ 100 ME von VP#1 + Umrüsten auf VP#2 + 1 ME von VP#2 = 161

⁶² Schedule#1

der frühestmögliche Fertigstellungszeitpunkt⁶³ zwar eingehalten wird, jedoch der gesamte Produktionsplan aufgrund des unnötigen Rüstvorgangs stark vom optimalen Plan abweicht. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Standardsolver bei ausreichender Kapazität vermehrt Umrüstungen vornimmt, um die Gesamtdurchlaufzeit so kurz als möglich zu halten. In einer weiteren Abwandlung⁶⁴ des Modells wurde der Planungszeitraum auf 661 Minuten eingeschränkt. Dies entspricht der theoretischen Minimalkapazität, mit welcher der gesamte Bedarf von EP gerade noch produziert werden kann. Hierfür konnte aber nach mehreren Stunden Rechenzeit kein Produktionsplan erstellt werden. Die scheinbar willkürliche Einplanung von Operationen bzw. die unnötige Losteilung sind Schwächen des Standardsolvers, die in nahezu allen untersuchten Modellen auftraten. Diese Schwächen dürften hauptsächlich in der auf Termintreue ausgerichteten heuristischen Vorgehensweise begründet sein.

In einem zweiten Schritt wurde obiges Modell mit RMO gelöst.⁶⁵ Dabei wird VP#1 wieder als erstes eingeplant, aber diesmal auch ohne Losteilung durchproduziert. Nach erfolgter Umrüstung wird der gesamte indirekte Bedarf des zweiten Vorprodukts erzeugt. Der unnötige Rüstvorgang wird folglich eingespart. Da aber mit der Produktion von EP erst mit mehr als einstündiger Verspätung begonnen wird, verzögert sich der Fertigstellungstermin auch dementsprechend. Schränkt man die Kapazität allerdings wieder auf das Minimum von 661 Minuten ein, wird mit RMO der rüstzeitoptimale Produktionsplan erstellt (Abb. 17).

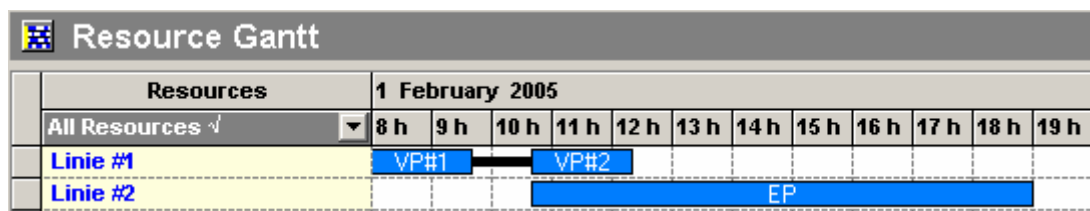


Abb. 17: Resource Gantt Modell2VP1EP, RMO mit eingeschränktem Planungshorizont

In einem neuen Szenario⁶⁶ wurden die reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten vertauscht, so dass eine Umrüstung von VP#1 auf VP#2 nun fünf Stunden Kapazität beansprucht. Als Lösung erhält man den exakt gleichen Produktionsplan, mit der Ausnahme, dass die Lose der Vorprodukte vertauscht sind.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass RMO reihenfolgeabhängige Rüstzeiten erkennt und diese ggf. minimiert. RMO ist, wie dieses Modell gezeigt hat, weiters in der Lage, Operationen auf einer Linie so zusammenzufassen, dass die Anzahl der Rüstvorgänge minimiert wird. Hierdurch können in der Praxis sowohl Rüst- als auch Produktionskosten reduziert werden. Für den Fall, dass die Höhe der Rüstkosten in

⁶³ Die minimale Durchlaufzeit beträgt 661 (161 + 100*5) Minuten, daher ist der frühestmögliche Fertigstellungszeitpunkt um 18:01 Uhr.

⁶⁴ Schedule#1*

⁶⁵ Schedule#1RMO

⁶⁶ Schedule#2RMO

Relation zur Länge der Rüstzeiten steht, kann trotz Nichtberücksichtigung von Rüstkosten, ein optimaler Produktionsplan erstellt werden.

4.4 Modell2VP2EP⁶⁷

In diesem Modell werden auf Linie#1 in einer Stunde je zwei Vorprodukte (VP#1, VP#2) hergestellt, die im Anschluss alternativ auf zwei parallelen Linien (Linie#2, Linie#3) zu Endprodukten (EP#1, EP#2) verarbeitet werden können. Für eine ME der Endprodukte ist jeweils eine ME der Vorprodukte erforderlich. Die Bearbeitungszeit je Endprodukt beträgt auf beiden Linien je eine Stunde. Der Bedarf fällt jeweils am Ende des einwöchigen Planungshorizonts an. Die Rüstzeiten betragen sowohl für die Vorprodukte als auch für die Endprodukte einheitlich fünf Stunden.

In einem ersten Szenario⁶⁸ wird ein Bedarf für die Endprodukte von je zehn ME festgelegt. Sind WIP-Bestände zugelassen, so müsste im Idealfall zuerst eines der beiden Vorprodukte auf Linie#1 durchproduziert werden, bevor für das zweite Vorprodukt gerüstet wird. Ist genügend Zwischenbestand des Vorproduktes vorhanden, kann mit der Produktion der Endprodukte begonnen werden. Der frühestmögliche Fertigstellungstermin liegt bei 26 Stunden nach Produktionsbeginn. Insgesamt wäre nur auf Linie#1 für die Herstellung beider Vorprodukte ein Rüstvorgang notwendig. Abbildung 18 zeigt, dass der erstellte Produktionsplan dieses Szenarios hinsichtlich der Durchlaufzeit und Rüstzeit keineswegs optimal ist.

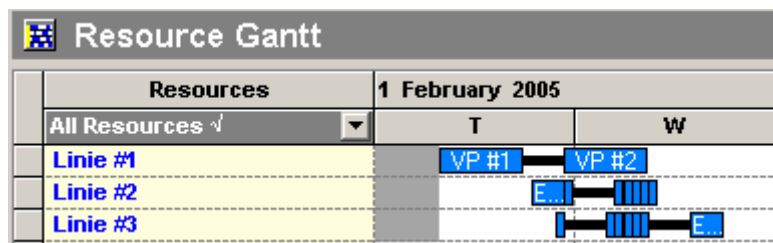


Abb. 18: Resource Gantt Modell2VP2EP, PRE, Planungshorizont = 1 Woche

Es wird hierbei erst mit der Produktion von EP#1 begonnen, nachdem der Bestand von VP#1 vollständig aufgebaut wurde. Darüber hinaus wird die Produktion der Endprodukte ungleichmäßig auf die parallelen Linien aufgeteilt und es werden drei Rüstvorgänge eingeplant. Somit ergibt sich eine zeitliche Abweichung vom optimalen Fertigstellungszeitpunkt von acht Stunden. Schränkt man in einem weiteren Szenario⁶⁹ den Planungshorizont und den Zeitpunkt des Bedarfsanfalls auf den frühestmöglichen Fertigstellungszeitpunkt ein, erhält man einen zeitoptimalen Plan (Abb. 19). Der Solver wird aufgrund der Kapazitätsreduktion zur Generierung der zeitlich optimalen Lösung „gezwungen“.

⁶⁷ siehe Anhang A.IV

⁶⁸ Schedule#3

⁶⁹ Schedule#2

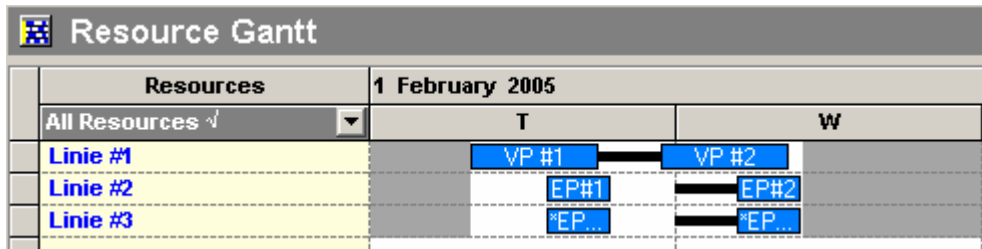


Abb. 19: Resource Gantt Modell2VP2EP, PRE, Planungshorizont = 26 Stunden

Unter Berücksichtigung von Rüstkosten ist das Ergebnis aber auch bei Einschränkung des Planungshorizonts nicht optimal, weil die Produktion der Endprodukte „symmetrisch“ auf Linie#2 bzw. Linie#3 aufgeteilt wird. Somit kommt es auf diesen Linien zu zwei unnötigen Umrüstungen, weil es theoretisch möglich wäre, jedes Endprodukt jeweils einer Linie zuzuweisen. Eine Erhöhung des Bedarfs auf 81 ME je Endprodukt, was bei einwöchigem Planungshorizont der Maximalkapazität⁷⁰ entspricht, resultiert bei längerer Rechenzeit ebenfalls in einem zeitlich optimalen Produktionsplan. Es kann daher festgehalten werden, dass der Standardsolver bei knapper Kapazität zu Erstellung qualitativ besserer Produktionspläne tendiert. Dies ist wohl auf die Programmierung mittels CP zurückzuführen.

Modelliert man die Produktionslinien hingegen mit RMO⁷¹, so werden auch in diesem Modell Umrüstungen eingespart und dadurch größere Lose gebildet. Der Solver fasst den gesamten Bedarf je Endprodukte zu einem Los zusammen. Es wird kein Zwischenbestand aufgebaut, weil mit der Produktion der Endprodukte frühestmöglich begonnen wird. Für die Fertigung der Endprodukte wird im Unterschied zur Lösung des Standardsolvers nur jeweils eine Linie eingeplant (Abb. 20). Auf diese Weise können zwei Umrüstungen eingespart werden, weil die Lose nicht auf beide Linien aufgeteilt werden.

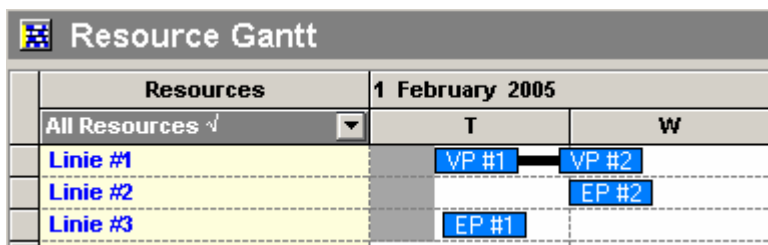


Abb. 20: Resource Gantt Modell2VP2EP mit RMO

Wählt man anstatt JIT die build strategy PRE, so werden sowohl mit als auch ohne RMO die Lose der Endprodukte geteilt und somit drei Umrüstungen eingeplant.

⁷⁰ $(168 - 5 - 1)/2 = 81$

⁷¹ Schedule#3RMO

RMO ist also nicht in der Lage die Umrüstungen auf Linie#2 bzw. Linie#3 auch bei der PRE-Lösung einzusparen.

In einem weiteren Szenario⁷² wird eine zusätzliche zu Linie#1 identischer Linie#1.1 eingeführt. Um die Mängel der Lösung bei niedriger Auslastung zu vermeiden, wird ein Bedarf von 50 ME je Endprodukt festgelegt. Löst man das Szenario mit JIT wird kein WIP-Bestand aufgebaut, sondern nach jedem hergestellten Vorprodukt sofort das entsprechende Endprodukt produziert (Abb. 21).

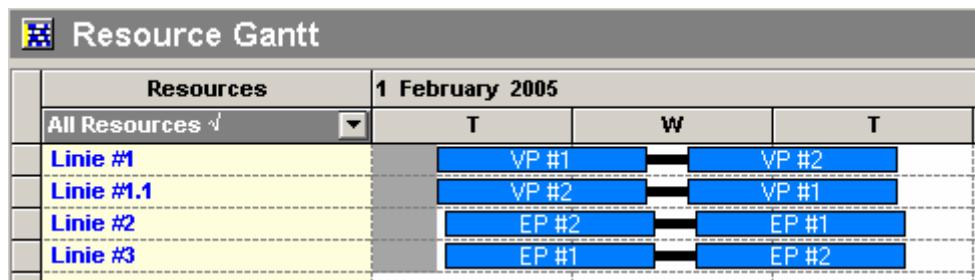


Abb. 21: Resource und Operation Gantt Modell2VP2EP, JIT

Dabei wird die Produktion von VP#1 auf die Linie#1 bzw. Linie#1.1 so aufgeteilt, dass beide Linien für VP#2 gerüstet werden müssen. Diese Vorgehensweise erfordert das Umrüsten der Linie#2 bzw. Linie#3 von EP#1 auf EP#2. Würden beide Vorprodukte zeitgleich hergestellt werden, könnte der gesamte Bedarf der Endprodukte in einem Los aufgelegt werden und es wäre kein einziger Rüstvorgang nötig. Jedoch änderte sowohl die Definition einer Mindestlosgröße von 50 als auch die Modellierung mit bzw. ohne Resource Set nichts an dem Umstand, dass der Solver die Lose immer auf alle zur Produktion zur Verfügung stehenden Linien aufteilt. Einzig wenn man in einem Resource Set Prioritäten für die Linienzuweisung vergibt, spart der Solver alle Rüstvorgänge ein (Abb. 22). So wurde in einer Abwandlung⁷³ des Modells bestimmt, dass auf Linie#1 VP#1 bevorzugt produziert werden soll.⁷⁴

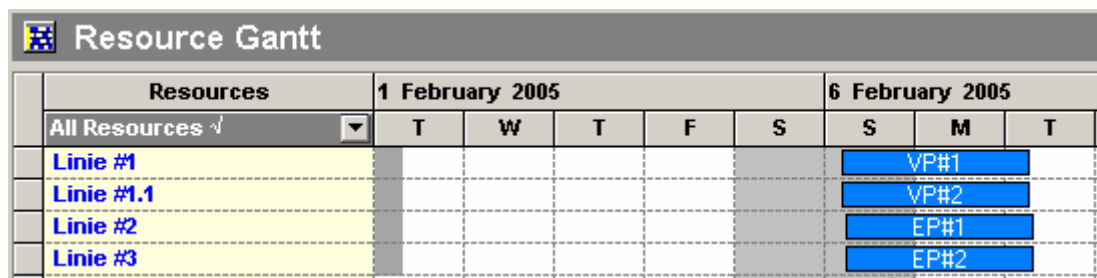


Abb. 22: Resource und Operation Gantt Modell2VP2EP, JIT mit Vergabe von Prioritäten

⁷² Schedule#1

⁷³ Schedule#4RMO

⁷⁴ VP#1 auf Linie#1: Priorität = 1; VP#2 auf Linie#1: Priorität = 2; VP#2 auf Linie#1.1: Priorität = 1; VP#1 auf Linie#1.1: Priorität = 2; EP#1 auf Linie#2: Priorität = 1; EP#2 auf Linie#2: Priorität = 2; EP#2 auf Linie#3: Priorität = 1; EP#1 auf Linie#3: Priorität = 2

Die hierbei gewonnen Erkenntnisse lassen den Schluss zu, dass die Vergabe von Prioritäten für die Linienzuweisung zu besseren Produktionsplänen führt, da die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten reduziert wird. Dieser Umstand ist nicht ideal, da die Reihenfolgeplanung bzw. die Linienzuweisung von der Software und nicht manuell durchgeführt werden sollte.

Es hat sich für die meisten geprüften Modelle erwiesen, dass mit der Einstellung JIT im Hinblick auf die Gesamtdurchlaufzeit bzw. auf die Lösbarkeit des Modells bessere Lösungen gefunden werden konnten. Um die Lösungsgüte von PRE und JIT miteinander zu vergleichen, wurde obiges Szenario mit PRE gelöst. Auf die manuelle Linienzuweisung wurde allerdings verzichtet. Mit JIT erhielt man bei Lösung des Modells mit bzw. ohne RMO zu Schedule#4RMO identische Ergebnisse (Abb. 23). Unter Verwendung des Standardsolvers erhält man mit PRE einen im Hinblick auf die Gesamtdurchlaufzeit äußerst ungünstigen Produktionsplan.⁷⁵

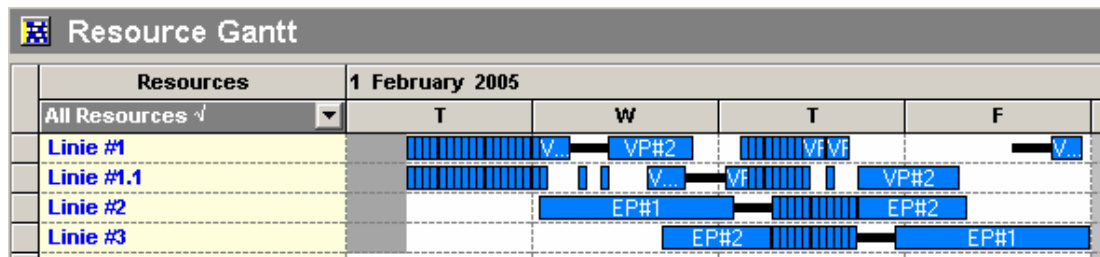


Abb. 23: Resource Gantt, PRE ohne RMO

Die Gesamtdurchlaufzeit ist um 32 Stunden höher als bei der JIT-Lösung und liegt 72% über dem theoretischen Minimum. Bei der Herstellung der Vorprodukte treten vor allem auf Linie#1.1 unnötige Unterbrechungen der Produktion auf. Dabei wird der Rüstzustand aufrechterhalten, was in der Praxis zu hohen Bereitschaftskosten führen kann. Sieht man von der ungünstigen Linienzuweisung ab, so wird auf Linie#1 das Los von VP#1 noch einmal zusätzlich geteilt und somit ein zusätzlicher Produktwechsel eingeplant. Wird die Kapazität wiederum eingeschränkt, so dass gerade noch eine zeitlich optimale Lösung möglich wäre, kann der Standardsolver das Modell nicht mehr lösen. Mit der Bedarfsregel PRE lässt sich demnach auch unter Kapazitätseinschränkung keine Ergebnisverbesserung erzielen.

Der Produktionsplan⁷⁶ ist bei der Modellierung mit RMO im Vergleich zur JIT-Lösung ebenfalls suboptimal, allerdings in einem wesentlich geringeren Ausmaß (Abb. 24).

⁷⁵ Schedule#5

⁷⁶ Schedule#5RMO

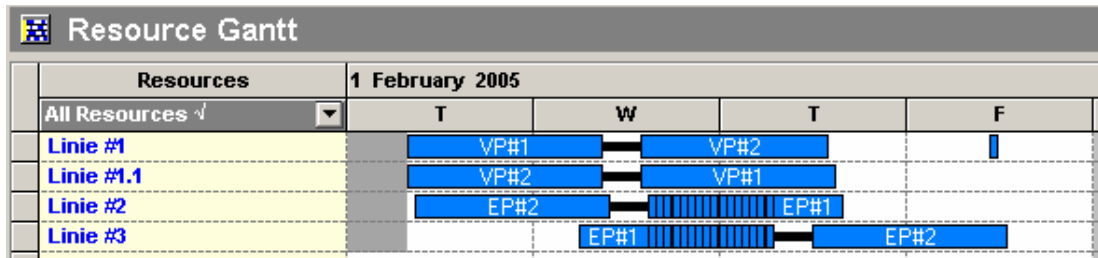


Abb. 24: Resource Gantt Modell2VP2EP, PRE mit RMO

Es tritt im Vergleich zur Lösung des Standardsolvers nur eine Produktionsunterbrechung auf Linie#1 auf. Das Los von VP#1 wird nicht mehr geteilt, weshalb der unnötige Rüstvorgang auf Linie#1 eingespart werden kann. Aus einem nicht nachvollziehbaren Grund wird EP#1 21 Stunden später als möglich eingeplant und dadurch ein Zwischenbestand an Vorprodukten aufgebaut. Die letzte zu produzierende ME von VP#2 wird ebenfalls um genau diese 21 Stunden zeitlich nach hinten verlegt. Deshalb liegt die tatsächliche Durchlaufzeit um 51% über der Minimaldurchlaufzeit.

4.5 Modell Kostenabrechnung⁷⁷

Da in Kapitel 5 ein Ergebnisvergleich zwischen GLSP- und PSD-Modellen erfolgt, der hauptsächlich auf Kostenebene basiert, ist es notwendig die Kostenabrechnung von PSD zu überprüfen. Diese war in früheren PSD-Versionen fehlerhaft.⁷⁸ So wurden beispielsweise die Lagerkosten falsch berechnet, oder fehlerhaft nach Excel exportiert. Deshalb wird im folgenden Abschnitt ein einfaches, leicht nachvollziehbares Modell formuliert, anhand welchem die Richtigkeit der Kostenabrechnung überprüft wird.

4.5.1 Lagerkostenabrechnung⁷⁹

Der Lagerkostensatz kann auf Minuten-, Stunden-, Schicht- oder Wochenbasis berechnet werden. Die kleinste Einheit für die Berechnung der Lagerkosten ist 100 Geldeinheiten (GE) je ME. Einstellige Lagerkostensätze mit mehreren Kommastellen müssen also in Excel mit dem Faktor $1 \cdot 10^{-x}$ umgerechnet werden. Im untersuchten Modell beträgt der Planungshorizont zwei Wochen. Die Lagerkosten werden nachfolgend auf Tagesbasis abgerechnet. Um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, werden Operationslängen von einem Tag angenommen. Da auch die Lagerkostenabrechnung von Vorprodukten untersucht werden soll, wird zunächst auf Linie#1 ein Vorprodukt (VP) hergestellt, das im Anschluss auf Linie#2 zum Endprodukt (EP) verarbeitet wird (Abb. 25). Der Lagerkostensatz für das Vorprodukt

⁷⁷ siehe Anhang A.V

⁷⁸ Vgl. Mauch (2002), S. 81

⁷⁹ Schedule#1

beträgt 1 GE je ME, für das Endprodukt beträgt er 2 GE je ME. Der Bedarf von 6 ME fällt nach zwei Wochen an.

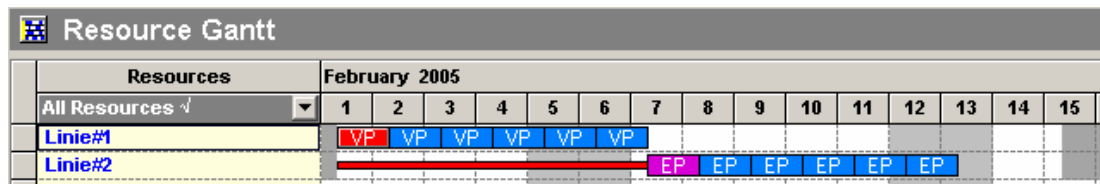


Abb. 25: Modell Lagerkostenabrechnung

Auf Linie#2 musste eine sechstägige Stillstandzeit eingeplant werden, da der Solver sonst die Operationen des Endprodukts unmittelbar nach der Produktion des ersten Vorprodukts einplant. Dies würde klarerweise zu keinen Lagerkosten für das Vorprodukt führen. An der farblichen Unterlegung der Operationen kann man erkennen, dass PSD das First in First out (FIFO) Verfahren anwendet, d.h. das als erstes produzierte Vorprodukt geht auch als erstes in das Endprodukt ein. Folglich ergibt sich für jedes Vorprodukt eine Lagerdauer von fünf Tagen, was insgesamt 30 GE entspricht. Das erste Endprodukt muss sieben Tage bis zum Bedarfsanfall gelagert werden. Dies ergibt eine Lagerdauer der Endprodukte von 27 (=7+6+5+4+3+2)Tagen d.h. die Summe der Lagerkosten beläuft sich auf 84 GE (2*27+30).

In den KPI werden erwartungsgemäß 8400 GE ausgewiesen. Exportiert man die KPI nach Excel, so werden die Kosten ebenfalls richtig ausgewiesen. Dies trifft auch für den Fall zu, wenn die Lagerkostensätze potenziert werden. Darüber hinaus wurde in einem Szenario die Annahme getroffen, dass zwei Einzelbedarfe anfallen. Der erste Bedarf von vier ME fällt nach zwei Wochen, der zweite Bedarf von zwei ME fällt nach drei Wochen an. Hierbei wird die Lagerung von zwei Endprodukten bis 22.2.05 durchgeführt und in den KPI richtig ausgewiesen (11200 GE). Des weiteren wird in einem Szenario⁸⁰ die Berechnung der Lagerkosten bei unterschiedlichen Operationslängen untersucht. Zu diesem Zweck wird ein zweites Vorprodukt eingeführt, das auf Linie#3 mit einer Operationslänge von 12 Stunden gefertigt wird und mit einem Produktionskoeffizienten von „2“ in das Endprodukt eingeht. Der Solver muss nun bei der Berechnung der gesamten Lagerkosten für das zweite Vorprodukt eine feinere Periodeneinteilung, basierend auf Halbtagen, vornehmen. So muss die erste ME 5,5 Tage und die zweite ME nur 5 Tage bis zur Weiterverarbeitung gelagert werden. Bei einem Lagerkostensatz von 1 GE betragen die Lagerkosten für das zweite Vorprodukt 63 (10,5*6) GE. Auch dieser Wert (6300) wird in den KPI richtig ausgewiesen.

4.5.2 Rüst- und Produktionskostenabrechnung

Die Abrechnung der Rüstkosten ist unabhängig von der für einen Rüstvorgang benötigten Zeit. Für jedes Umrüsten wird die im Changeover Editor festgesetzte

⁸⁰ Schedule#2

Kostensumme einmal verrechnet. Wird in Schedule#1⁸¹ das zweite Vorprodukt anstatt auf Linie#3 auf Linie#1 produziert, so können für den Rüstvorgang zwischen den beiden Vorprodukten Rüstkosten veranschlagt werden. Die kleinste verrechenbare Einheit beträgt im Gegensatz zur Lagerkostenabrechnung (kleinste Einheit = 100) eine GE und wird identisch in Excel ausgewiesen. Die Richtigkeit der Rüstkostenabrechnung ist damit problemlos an den KPI nachzuvollziehen.

Einen Fehler weist die Rüstkostenabrechnung für den in der Praxis eher selten auftretenden Fall von Rüstkosten ohne Rüstzeiten auf: Entstehen beim Umrüsten zwischen zwei Produkten keine zeitliche Verzögerung wohl aber Kosten, so werden diese Rüstkosten weder in den KPI noch in Excel ausgewiesen.

Ein weiteres Problem bei der Rüstkostenberechnung stellt die Modellierung mit Maschinenstillstandzeiten dar. Stillstandzeiten können im calendar editor eingegeben werden, um die Linienkapazitäten zu beschränken und so z.B. Zeiten für Instandhaltungen modellhaft abzubilden. In dieser Arbeit wurden Stillstandzeiten vor allem aus zwei Gründen verwendet: Einerseits um die Äquivalenz der Zeitstrukturen zwischen GLSP und RMO herzustellen und andererseits um parallele Linien mit unterschiedlichen Produktionskapazitäten zu modellieren.⁸² Die Verwendung von Stillstandzeiten kann, wie sich herausgestellt hat, kritisch sein. Bei hoher Auslastung tritt das Problem auf, dass Umrüstungen offenbar während der Stillstandzeiten durchgeführt werden. Dies ist daran zu erkennen, dass nach Ende der Stillstandzeit unmittelbar mit der Produktion eines anderen Produkts, für das davor nicht gerüstet war, begonnen wird. Die dafür notwendige Umrüstung wird aber weder in der Resource Gantt Ansicht angezeigt, noch in den KPI als Kostengröße ausgewiesen.⁸³ Somit werden „fiktive“ Umrüstungen durchgeführt und gleichzeitig unzulässige Produktionspläne erzeugt. Es ist anzunehmen, dass dieses Problem auf die scheinbaren Lösungsschwierigkeiten des Solvers bei hoher Auslastung zurückzuführen sind. Bei niedrigeren Bedarfsniveaus trat dieser Fehler jedenfalls nicht auf. Damit die Pläne trotzdem ihre theoretische Zulässigkeit erlangen, kann mithilfe der copy und paste Funktion die Losreihenfolge manuell so verändert werden, dass die Rüstzustände vor bzw. nach den Stillstandzeiten identisch sind. Anschließend muss ein repair solve gestartet werden. Diese Vorgehensweise ist bei einfachen Modellen unkompliziert, kann sich jedoch bei komplexen Modellen als umständlich erweisen.

Produktionskosten gehen über Linien und Operationen in die KPI ein. Ihre Abrechnung erfolgt so wie die Lagerkostenabrechnung entweder auf Minuten-, Stunden-, Schicht- oder Wochenbasis und muss in Excel um zwei Kommastellen reduziert werden. Es können einmalige Kosten für die Inanspruchnahme einer Linie (setup costs) oder laufende, von der Produktionszeit abhängige Kosten (operating costs) veranschlagt werden. Setup times werden selbst dann nur einmal verrechnet, wenn nach einer zeitlichen Unterbrechung⁸⁴ auf Linie wieder mit der Produktion begonnen wird. Dies deutet darauf hin, dass der Rüstzustand während der produktionsfreien Zeit aufrechterhalten bleibt.

⁸¹ siehe 4.5.1, S. 33

⁸² siehe 5.1.1

⁸³ siehe Anhang B.III Schedule_bug#1

⁸⁴ z.B. Stillstandzeit

4.6 Zusammenfassung der Zwischenergebnisse

Aus den in diesem Abschnitt gewonnen Erkenntnissen geht hervor, dass RMO nach wie vor zeitorientierte Ziele verfolgt. Obwohl die Minimierung der Rüstkosten explizit definiert werden kann, werden reihenfolgeabhängige Rüstkosten vom Solver nicht berücksichtigt. Hingegen ist RMO in der Lage reihenfolgeabhängige Rüstzeiten zu minimieren. Auch Lagerkosten haben keinen Einfluss auf die Lösung. Die Berücksichtigung von linienspezifischen Produktionskosten ist gegeben, deren Eingabe führt jedoch bei knappen Kapazitäten zu unlösbaren Szenarien. Die Abrechnung der Lager- und Produktionskosten erfolgt kontinuierlich und wird korrekt in den KPI ausgewiesen.

Im Vergleich zum Standardsolver von PSD vermeidet RMO die Einplanung zeitlich ineffizienter Linien und es spart generell Umrüstungen ein, was zu einer Verkürzung der Durchlaufzeit führt. Wird die Linienzuweisung nicht manuell vorgenommen, so teilt RMO die Produktionsmengen gleichmäßig auf die parallelen Linien auf, wodurch zusätzliche Produktwechsel verursacht werden.

Die Funktion „Last Operation Run“, mit deren Hilfe der Anfangszustand einer Linie modelliert werden kann, ist fehlerhaft und erfordert zumeist einen Rüstvorgang am Periodenbeginn.

Die build strategy „PRE“ lieferte in den meisten Fällen schlechtere Ergebnisse, die durch häufiges Umrüsten gekennzeichnet sind. Bei hoher Auslastung war der Großteil der Szenarios mit der Einstellung „PRE“ nicht lösbar.

Die Modellierung von Stillstandzeiten ist bei knapper Kapazität fehlerhaft, weil es hierbei zu Umrüstungen kommt, die nicht in den KPI erfasst werden.

5 Eignung von RMO zur simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

Im folgenden Abschnitt soll RMO auf die Eignung für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung geprüft werden. Hauptziel ist es, die Qualität der erzeugten Produktionspläne zu untersuchen. Die Prüfung erfolgt dabei für unterschiedliche Kriterien. Die qualitative Güte des Maschinenbelegungsplans ist durch die rüst-, produktions- bzw. lagerkostenminimale Losauflage gekennzeichnet. Darüber hinaus sollen die Bedarfe termingerecht befriedigt werden.

Als Referenzalgorithmus zur Performancemessung dient das GLSP, dessen Modellierung im OPL Studio Version 3.7 von ILOG erfolgt.⁸⁵ Es wird zunächst die allgemeine Formulierung des GLSP zum Vergleich von einstufigen Modellen herangezogen. Für den Vergleich von in der Praxis auftretenden mehrstufigen Problemen dient das GLSP *for Multiple production Stages* (GLSPMS).

5.1 Anpassung der modellierungstechnischen Basisannahmen von RMO und GLSP

Im folgenden Abschnitt werden die Unterschiede der Lösungsalgorithmen herausgearbeitet und gezeigt, dass RMO und GLSP Produktionspläne unter unterschiedlichen Zielsetzungen erstellen. Der Umstand, dass beide Algorithmen von unterschiedlichen Basisannahmen ausgehen, macht es erforderlich, die dem GLSP in seiner allgemeinen Variante zugrunde liegende mathematische Formulierung darzustellen.⁸⁶

Zielfunktion

$$\text{Min} \sum_{i,j \neq 0} h_j I_{jt} + \sum_{l,j,s} s_{lij} z_{lij} + \sum_{l,j,s} c_{ij}^p x_{ljs} + \sum_{l,j,s} c_{ij}^B \bar{x} \quad (5.1.1)$$

Nebenbedingungen

$$I_{jt} = I_{j,t-1} + \sum_{l,s \in S_t} x_{ljs} - d_{jt} \quad \forall t, j \neq 0 \quad (5.1.2)$$

$$\sum_{j,s \in S_t} (a_{lj} x_{ljs} + \bar{x}_{ljs}) = K_{lt} - \sum_{i,j,s \in S_t} s_{tij} z_{tij} \quad \forall l, t \quad (5.1.3)$$

$$a_{lj} x_{ljs} + \bar{x}_{ljs} \leq K_{lt} y_{ljs} \quad \forall l, j, s \quad (5.1.4)$$

$$x_{ljs} \geq m_{lj} (y_{ljs} - y_{lj,s-1}) \quad \forall l, j, s \quad (5.1.5)$$

$$\sum_j y_{ljs} = 1 \quad \forall l, s \quad (5.1.6)$$

⁸⁵ Für die Evaluierung stand ein Intel Pentium 4 Prozessor (2 GHz, 520 RAM) zur Verfügung

⁸⁶ Vgl. Meyr (1999), S. 78

$$z_{ljs} \geq y_{li,s-1} + y_{ljs} - 1 \quad \forall l, i, j, s \quad (5.1.7)$$

Indizes

$i, j = 0$	Nullzustand
$i, j = 1, \dots, J$	Produkte
$s = 1, \dots, S$	Mikroperioden
$t = 1, \dots, T$	Makroperioden
$l = 1, \dots, L$	Produktionslinien
S_t	Menge der Mikroperioden s in Makroperiode t

Daten

a_{lj}	Produktionskoeffizient zu Produkt j auf Linie l	$(a_{l0} = 1)$
K_{lt}	Kapazität von Linie l in Makroperiode t	
d_{jt}	Nachfrage nach Produkt j in Makroperiode t	$(j \neq 0)$
m_{lj}	Mindestlosgröße für Produkt j auf Linie l	$(j \neq 0)$
m_{l0}	Minimalzeit, die Linie l im Nullzustand sein muss	
h_j	Lagerkosten für die Lagerung von einer Einheit von Produkt j über eine Makroperiode	$(j \neq 0)$
c_{lj}^P	variable Produktionskosten für j auf Linie l	$(c_{l0}^P = 0)$
c_{lj}^B	variable Bereitschaftskosten für die Aufrechterhaltung des Rüstzustands von j auf Linie l	$(c_{l0}^B = 0)$
s_{lij}	Rüstkosten für Wechsel von Zustand i nach j auf Linie l (davon: Anschaltkosten s_{l0j} ; Abschaltkosten: s_{li0} ; Umrüstkosten: s_{lij} für $i, j \neq 0$; $s_{l00} = 0$)	
s_{tlj}	Rüstzeit bei Wechsel von Zustand i nach j auf Linie l	
I_{j0}	Lagerbestand von Produkt j zu Beginn der Planung	
Y_{lj0}	Anfangszustand: ist mit Wert 1 belegt, falls Linie l zu Beginn der Planung für j gerüstet ist (0 sonst).	

Variablen

$I_{jt} \geq 0$	Lagerbestand von Produkt j am Ende von Makroperiode t ($j \neq 0$)	
$x_{ljs} \geq 0$	Produktionsmenge von Produkt j in Mikroperiode s auf Linie l	$(j \neq 0)$
$x_{l0s} \geq 0$	Zeit in Mikroperiode s , in der Linie l im Nullzustand ist.	
$\bar{x}_{ljs} \geq 0$	Zeit in Mikroperiode s , in der Rüstzeit j auf Linie l aufrechterhalten, aber nicht produziert wird.	$(\bar{x}_{l0s} = 0)$
$y_{ljs} \in \{0; 1\}$	Zustandsindikator: nimmt Wert 1 an, falls Linie l in Mikroperiode s für j gerüstet ist (0 sonst).	
$z_{lij} \geq 0$	Umrüstindikator: nimmt Wert 1 an, falls Linie l vor Beginn von Mikroperiode s von i auf j umgerüstet wurde (0 sonst).	

Das Zeitraster wird von Makroperioden t , die sich in nicht überschneidende Mikroperioden s unterteilen, bestimmt. Je Makroperiode ist der Produktbedarf d_{jt}

aggregiert vorgegeben und dadurch eine Bewertung der Lagerbestände nur am Ende einer Makroperiode erfassbar und mit Kosten zu bewerten. Je Mikroperiode s und Linie l muss für genau ein Produkt j oder den Nullzustand gerüstet sein. Die Anzahl der Mikroperioden je Makroperiode muss aus modellierungstechnischen Gründen im Vorhinein bestimmt werden. Die Mikroperioden sind allerdings frei terminierbar d.h. ihre Länge ist variabel. Die Linienkapazitäten K_{lt} je Makroperioden können unterschiedlich sein.

In der Zielfunktion (5.1.1) werden die Lagerkosten, reihenfolgeabhängigen Rüstkosten, linienabhängigen Produktionskosten und die eventuell anfallenden Bereitschaftskosten minimiert.

Die Lagerbilanzgleichung (5.1.2) berechnet den Lagerbestand in Periode t aus dem Lagerbestand der Vorperiode zuzüglich dem Zugang aus der Produktion und abzüglich der Nachfrage in Periode t . Dabei wird der Fall $j = 0$ (neutraler Zustand) nicht betrachtet.

Die linienabhängige Makroperiodenkapazität abzüglich der Rüstzeiten muss voll ausgeschöpft werden. Dies kann erreicht werden durch Produktion, Aufrechterhaltung des Rüstzustands oder Verbleiben im Nullzustand (5.1.3).

Zustandsindikatoren für den Rüstzustand werden in 5.1.4 abgebildet und in 5.1.6 als eindeutig festgelegt.

Die Einführung von Mindestlosgrößen (5.1.5) kann die mehrmalige Auflage desselben Produktes innerhalb einer Makroperiode ermöglichen.

Die Nebenbedingungen (5.1.7) koppeln die Zustandsindikatoren y_{ljs} an die Umrüstindikatoren z_{ljs} , welche in einer optimalen Lösung nur die Werte 0 oder 1 annehmen.

Außerdem ist noch zu erwähnen, dass Produktionslose Makroperioden überdauern können, im Gegensatz dazu aber Rüstzeiten vollständig innerhalb einer Makroperiode liegen müssen.

5.1.1 Herstellung äquivalenter Zeitstrukturen

In Tabelle 1 ist die Zeitstruktur von GLSP beispielhaft für zwei Makroperioden und acht Mikroperioden dargestellt. Der Bedarf von zehn ME eines Produktes fällt jeweils am Ende der Makroperioden an. Die zur Produktion zur Verfügung stehende Kapazität beträgt 100 ZE je Markoperiode. Als Produktionskoeffizient wird eine ZE angenommen.

Makroperioden t	1				2			
Mikroperioden s	1	2	3	4	1	2	3	4
Linie#1	10				10			

Tab. 1: Periodeneinteilung in GLSP

Es ist zu erkennen, dass die gesamte Produktionsmenge der ersten Makroperiode in der ersten Mikroperiode, und die Produktionsmenge der zweiten Makroperiode in der sechsten Mikroperiode hergestellt werden. Über die Länge der übrigen Mikroperioden kann keine eindeutige Aussage getroffen werden. Hierbei treten sechs Mikroperioden auf, in denen keine Produktion stattfindet. Die freie Restkapazität von 90 ZE je Makroperiode wird dazu genutzt, den Rüstzustand für das Produkt auf Linie#1 aufrecht zu erhalten.⁸⁷ Hierfür fällt in diesem Beispiel je ZE eine GE an Bereitschaftskosten an. Bei einer geringen Anzahl an Variablen ist es problemlos möglich, die Zahl der Mikroperioden zu verringern, um die Ergebnisse übersichtlicher zu machen. Bei komplexeren Problemen mit mehreren Linien, Produkten und Makroperioden kann es jedoch durchaus nötig sein, mehrere Mikroperioden vorzugeben, um den Lösungsspielraum zu vergrößern und so das Ergebnis zu verbessern.

Im Gegensatz zu GLSP muss bei RMO die zur Produktion zur Verfügung stehende Kapazität nicht explizit eingestellt werden. Die Gesamtkapazität ergibt sich aus dem Zeitpunkt des Bedarfsanfalls und der Operationslänge, die erforderlich ist, um eine ME eines Produktes herzustellen. Fällt der Bedarf beispielsweise genau nach einer Woche an und dauert es eine Stunde eine ME eines Produktes herzustellen, so ergibt sich eine Gesamtkapazität von 168 Stunden.⁸⁸

Um die Szenarios mit GLSP zu vergleichen, ist es erforderlich die Äquivalenz der Zeitstrukturen herzustellen. Beträgt die Gesamtkapazität einer Makroperiode bei einem Produktionskoeffizienten von $a_{ij} = 1$ beispielsweise 100 ZE, so gibt es in PSD zwei Möglichkeiten, um die Vergleichbarkeit mit GLSP herzustellen. Eine Modellierungsvariante besteht darin, die Wochenkapazität durch eine 68-stündige Maschinenstillstandzeit zu reduzieren, um äquivalente Periodenlängen zu erhalten. (Abb. 26).

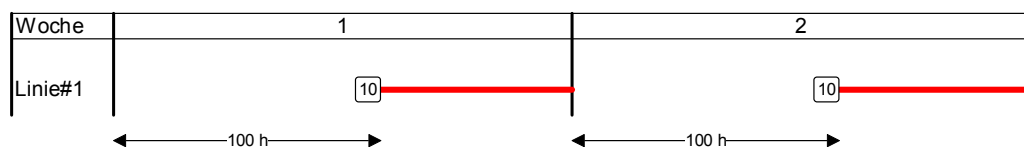


Abb. 26: Periodeneinteilung mit PSD auf Wochenbasis (JIT)

Die roten Balken kennzeichnen hierbei die Stillstandzeiten, welche am Ende der Woche auftreten. Die Wochen in PSD korrespondieren dementsprechend mit den Makroperioden in GLSP.

⁸⁷ Die Aufrechterhaltung des Rüstzustands ist in diesem Beispiel „zufälligerweise“ nicht gleich verteilt.

⁸⁸ Es sei darauf hingewiesen, dass in PSD aus Demonstrationsgründen von einstündigen Operationslängen ausgegangen wird. Es ist aber auch durchaus möglich die Äquivalenz der Zeitstrukturen mit geringeren (z.B. Sekunde, Minute) oder größeren (z.B. Woche) Operationslängen herzustellen.

Diese Vorgehensweise erleichtert zwar die Vergleichbarkeit von GLSP und RMO, birgt allerdings ein Problem in sich: während bei GLSP der Übergang zwischen zwei Makroperioden fließend erfolgt, sind in PSD die Perioden durch Maschinenstillstandzeiten voneinander getrennt. Das bedeutet, dass u.U. zusätzliche Kosten für die Abschalt- bzw. Anlaufphase der Linie entstehen können. Um auch hier gleiche Ausgangsbedingungen zu schaffen, kann dieses Problem dadurch umgangen werden, indem von der Wocheneinteilung in PSD vollkommen abgewichen wird und der Zeitpunkt des Bedarfsanfalls auf 100 Stunden nach Beginn des Planungshorizonts eingestellt wird (Abb. 27). Dies entspricht genau der Periodenkapazität gemäß GLSP. Äquivalent wäre es natürlich möglich in GLSP die Periodenkapazität auf 168 ZE zu setzen.

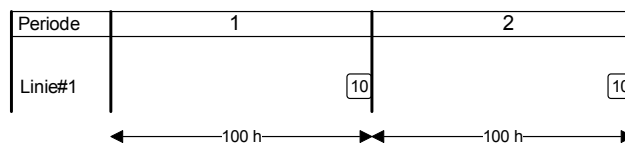


Abb. 27: Periodeneinteilung in PSD ohne Stillstandzeiten (JIT)

Die Lose werden dabei am Ende der Periode eingeplant, weil als build strategy JIT eingestellt werden muss. Dies ist deswegen erforderlich, um die Periodenäquivalenz nicht zu verletzen. Würde nämlich pre build als Art der Terminierung eingestellt werden, so gäbe es im obigen Beispiel in der zweiten Periode⁸⁹ keine Produktionszeit, weil die Produktionsmenge zur Deckung des Bedarfs der zweiten Periode in die erste Periode vorgezogen wird. Somit wird ab Beginn des Planungshorizonts ein Bestand von 20 ME aufgebaut (Abb. 28). Im Vergleich zu GLSP müssten in diesem Fall zehn ME über eine volle Makroperiode gelagert werden, wofür Kosten für die Lagerung verrechnet werden müssten. Bei niedrigen Bedarfsniveaus können daher erhebliche Ergebnisunterschiede auftreten. Darüber hinaus lieferte die Bedarfsregel PRE in fast allen getesteten Szenarios schlechtere Lösungen als die build strategy JIT.⁹⁰ In allen nachfolgenden Modellen wird deshalb die JIT-Einstellung gewählt.

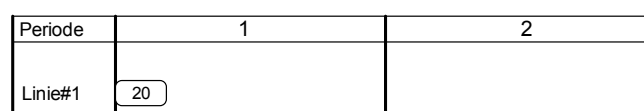


Abb. 28 Periodeneinteilung in PSD mit der build strategy PRE

⁸⁹ „Periode“ wird hierbei als äquivalenter Begriff zu „Makroperiode“ verwendet, weil es in PSD keine Unterscheidung zwischen Makro- und Mikroperioden gibt.

⁹⁰ Siehe Kapitel 4.4

Da RMO im Gegensatz zum Standardsolver von PSD zumeist keine Produktionsunterbrechungen einplant⁹¹, entstehen bei voller Auslastung auch keine Bereitschaftskosten für das Aufrechterhalten des Rüstzustandes während der produktionsfreien Zeit. Die Herstellung der Periodenäquivalenz durch die Einplanung von Stillstandzeiten macht deshalb Sinn, weil die variablen Produktionskosten und die Lagerkosten für unterschiedliche Zeitintervalle abgerechnet werden.

Das Einführen von Mindestlosgrößen kann damit gerechtfertigt werden, dass der Fall auftritt, wenn mehrere Lose eines Produkts in derselben Periode aufgelegt werden sollen.⁹² In RMO können zwar Mindestlosgrößen eingegeben werden, jedoch werden diese nicht berücksichtigt. Es kann daher vorkommen, dass trotz Einführen einer Mindestlosgröße für ein Produkt, dieses nicht produziert wird. Daher wurde in den untersuchten Modellen auf die Eingabe von Mindestlosgrößen in RMO verzichtet.

5.1.2 Herstellung äquivalenter Kostenabrechnung

Der markanteste Unterschied in der Zielsetzung der beiden Solver liegt in der Berücksichtigung von Kosten bei der Erzeugung von Produktionsplänen. Während das GLSP optimale Lösungen unter der Prämisse der Minimierung von Rüst-, Lager-, Bereitschafts- und Produktionskosten sucht, haben in RMO Kosten keinen Einfluss auf das Lösungsverhalten. Auch die Kostenberechnung erfolgt unter verschiedenen Voraussetzungen. Da die Kosten eine wichtige Kennzahl zur Beurteilung der Qualität von Produktionsplänen darstellen, müssen auch in dieser Hinsicht äquivalente Ausgangsbedingungen hergestellt werden, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Hinsichtlich der Rüstkosten müssen keine Anpassungsmaßnahmen getroffen werden, weil diese sowohl mit GLSP als auch mit PSD identisch je Rüstvorgang berechnet werden. Auch die variablen Produktionskosten können problemlos miteinander verglichen werden. Im GLSP werden diese je ME, in PSD je Operation berechnet.

Anderes gilt für die Berechnung der Lagerkosten, weil diese für jede gelagerte ZE abgerechnet werden. Im Unterschied zum GLSP, wo die Lagerkosten nur für Makroperioden berechnet werden können, unabhängig davon ob das entsprechende Produkt am Beginn oder am Ende der Vorperiode hergestellt wurde, basiert die Lagerkostenabrechnung in PSD auf einer feineren Zeitstruktur (siehe 4.5). Jedes Produkt verursacht nach Ende der Herstellung bis zum Zeitpunkt des Bedarfsanfalls oder der Weiterverarbeitung Lagerkosten. Daher verursachen alle ME (mit Ausnahme jener, die bedarfssynchron produziert werden) noch in der Periode ihrer Produktion Lagerkosten. Da es bislang noch nicht möglich ist, Lagerkosten in GLSP auf Mikroperiodenbasis zu bestimmen, müssen die Anpassungsmaßnahmen in PSD getroffen werden. Erfolgt die Periodeneinteilung

⁹¹ Siehe 4.2

⁹² Verletzung der Dreiecksgleichung: Ein Wechsel von j_2 auf j_1 ist teurer als ein Wechsel von j_2 auf j_3 und von j_3 auf j_1 . ($S_{21} > S_{23} + S_{31}$)

auf Wochenbasis, so ist es sinnvoll die Lagerkosten für die durchschnittliche wöchentliche Einlagerung zu berechnen. In diesem Fall würden allerdings bei einer ME, die über eine volle Periode (Woche) gelagert werden muss, nur äquivalente Kosten anfallen, wenn der Fertigstellungszeitpunkt genau auf den Wochenbeginn fällt. In Abbildung 29 werden die Unterschiede bei der Lagerkostenabrechnung zwischen PSD (a) und GLSP (b) modellhaft abgebildet. Der Bedarf fällt dabei für beide Produkte (P1, P2) am Ende der zweiten Periode ($t = 2$) an. Bei einem Lagerkostensatz von 2 GE/Periode⁹³ treten bei der produzierten ME von P1 keine Unterschiede bei der Kostenabrechnung auf. Für jeden anderen Fertigstellungszeitpunkt ergeben sich jedoch unterschiedliche Kosten. Dies wird anhand von P2 verdeutlicht: Während in GLSP nur für jede volle gelagerte Makroperiode Lagerkosten entstehen, erfolgt in PSD die Abrechnung ab Fertigstellungszeitpunkt.

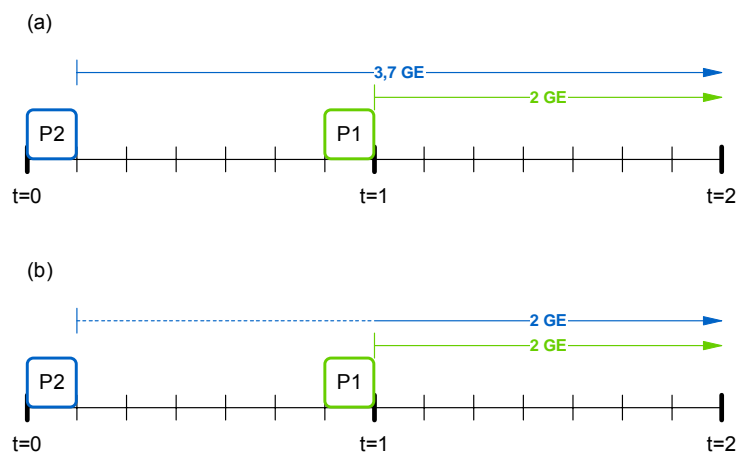


Abb. 29: Vergleich der Lagerkostenberechnung in PSD (a) und GLSP (b)

Demgemäß muss P2 zusätzlich zur zweiten Periode noch 85% der ersten Periode gelagert werden, weshalb in PSD für P2 Lagerkosten in Höhe von ca. 3,7 GE ($0,85 \cdot 2 + 2$) entstehen. Die Summe der Lagerkosten ist in diesem Beispiel in PSD daher um 43% höher als in GLSP. Klarerweise vervielfacht sich dieser Abstand bei erhöhtem Bedarf. Eine weitere Erschwernis beim Vergleich mit GLSP war der Umstand, dass durch die Einführung von Maschinenstillstandzeiten zwar die Kapazitäten bzw. Periodenlängen angeglichen werden konnten, die Periodenabrechnung der Lagerkosten jedoch die Stillstandzeiten inkludierte.

Aus oben genannten Gründen war es für die nachfolgende Betrachtung notwendig, äquivalente Annahmen über die Lagerkostenberechnung zu treffen. Deshalb wurden die Periodenbestände in PSD nur mit Kosten bewertet, wenn sie über eine volle Periode gelagert werden mussten. Die Bewertung der Bestände musste manuell in Excel durchgeführt werden. Nur auf diese Weise konnte ein transparenter Performancevergleich mit GLSP gewährleistet werden.

⁹³ Entspricht einer Woche in PSD

Die linienabhängigen Produktionskosten können problemlos miteinander verglichen werden, wenn die Eingabe der Produktionskosten je Operation erfolgt. Dies hat allerdings zur Konsequenz, dass die Modellierung mit Resource Sets unmöglich wird, da in diesem Fall mehrere heterogene Linien in einer Operation zusammengefasst werden und keine linienspezifische Zuordnung von Kosten erfolgen kann. Die direkte Zuordnung von Kosten zu den Linien ist in PSD wegen der in Kapitel 4 angeführten Probleme nicht möglich. Der Solver berücksichtigt zwar die linienspezifischen Produktionskosten als Nebenbedingung, jedoch resultiert dies bei knapper Kapazität immer in unlösbaren Plänen. Außerdem wären auch die Produktionskosten wiederum von der zeitlichen Beanspruchung der Linie abhängig und es würde daher eine ähnliche Problematik wie bei dem Vergleich der Lagerkosten entstehen.

Da es in PSD keine Möglichkeit gibt, die Aufrechterhaltung des Rüstzustandes in der produktionsfreien Zeit mit Kosten zu behaften, werden in GLSP sämtliche Bereitschaftskosten auf $c_{ij}^B = 0$ gesetzt. Diese modellhafte Vereinfachung ist unproblematisch, weil bei hoher Auslastung die Bereitschaftskosten vernachlässigbar sind. Das Aufrechterhalten des Rüstzustandes bei niedriger Auslastung über mehrere Perioden hinweg ist eher praxisfremd. Die Problematik, die bei der Vernachlässigung von Bereitschaftskosten auftreten kann, wird aber in Abschnitt 5.2.2 trotzdem aufgegriffen.

5.2 Einstufige Modelle

5.2.1 Einlinienprobleme

Anhand von einstufigen Modellen wird im folgenden Abschnitt die Performance von RMO im Vergleich zu GLSP geprüft. Ein kleines Beispiel, das einen geringen Grad an Komplexität aufweist, wird sukzessive erweitert. Die vorgenommenen Modell-erweiterungen beziehen sich auf die Anzahl der Linien, Produkte, Perioden sowie auf die Höhe der Bedarfe bzw. verfügbare Produktionskapazitäten. Laufzeitvergleiche der Solver sind bei den einfachen Modellen hinfällig, weil sich die Lösungsdauer hierbei im Zehntelsekundenbereich bewegt. Alle erstellten PSD-Produktionspläne und deren äquivalente Inputdaten für ILOG befinden sich auf der beigelegten CD-ROM.

Ausgangsbasis für die Untersuchung bildet wie bereits in Kapitel 4 ein einfaches Mehrproduktproblem.⁹⁴ Zunächst soll untersucht werden, wie RMO auf knappe Kapazitäten in einer Periode reagiert. In früheren PSD-Versionen hat sich gezeigt, dass der Aufbau von Lagerbeständen in der Vorperiode nicht zulässig war und zumeist keine gültigen Produktionspläne aufgestellt werden konnten. Auf einer Linie können drei unterschiedliche Produktarten (P1, P2, P3) hergestellt werden. Im Ausgangsszenario⁹⁵ sind zwei Perioden mit jeweils vier Mikroperioden vorgesehen. Die Bedarfe fallen jeweils am Periodenende an. Die Linie ist am Beginn des

⁹⁴ siehe Anhang B.I

⁹⁵ Glsp113j2t_#1/Schedule#1

Planungshorizonts für P1 gerüstet. Die genauen Daten sind aus Tabelle 2 abzulesen. Der Lagerkostensatz beträgt 2 GE, die Rüstkosten je Umrüstung 10 GE. Die Rüstzeiten werden im Ausgangsszenario einheitlich mit einer ZE angegeben. Der Umstand, dass in die Kapazität in der zweiten Periode (t=2) nicht ausreicht, um die gesamte Nachfrage zu befriedigen, erfordert das Aufbauen von Lagerbeständen in der erste Periode (t = 1).

Szenarios	Schedule#1		Schedule#2		Schedule#3	
	1	2	1	2	1	2
t						
K	168	168	168	168	168	168
d/P1	30	60	30	70	30	81
d/P2	30	60	30	70	30	81
d/P3	30	60	30	70	30	80
Restkap.	78	-12	78	-42	78	-74

Tab. 2: Basisdaten der Szenarien des Modells Glsp1I3j2t (Schedule#x = Glsp1I3j2t_x)

Schon bei diesem sehr einfachen Beispiel wird der Unterschied zwischen einem optimierenden und einem heuristisch vorgehenden Solver deutlich. GLSP erreicht die optimale Lösung bei einem Zielfunktionswert von 68 GE. Die Kosten setzten sich hierbei zusammen aus 28 GE für die Lagerung und 40 GE für die Umrüstungen. Der Produktionskostensatz wurde auf $c_{ij}^P = 0$ gesetzt, weil keine linienabhängigen Produktionskosten auftreten.

Die Gesamtkosten gemäß der RMO-Lösung belaufen sich auf 80 GE und liegen damit um ca. 18% über der Optimallösung. Sie setzten sich aus 30 GE Lagerkosten und 50 GE Rüstkosten zusammen. Anstatt von vier Umrüstungen plant RMO fünf Rüstvorgänge ein. Es ist darauf hinzuweisen, dass mit der build strategy PRE für keines der untersuchten Szenarios eine Lösung gefunden werden konnte. Dies bestätigt die Ergebnisse aus Kapitel 4, wonach JIT-Lösungen prinzipiell eine bessere Lösungsgüte aufweisen. Die Darstellung des Produktionsplans gibt Aufschluss darüber, wie die Kostenabweichung entsteht (Abb. 30).

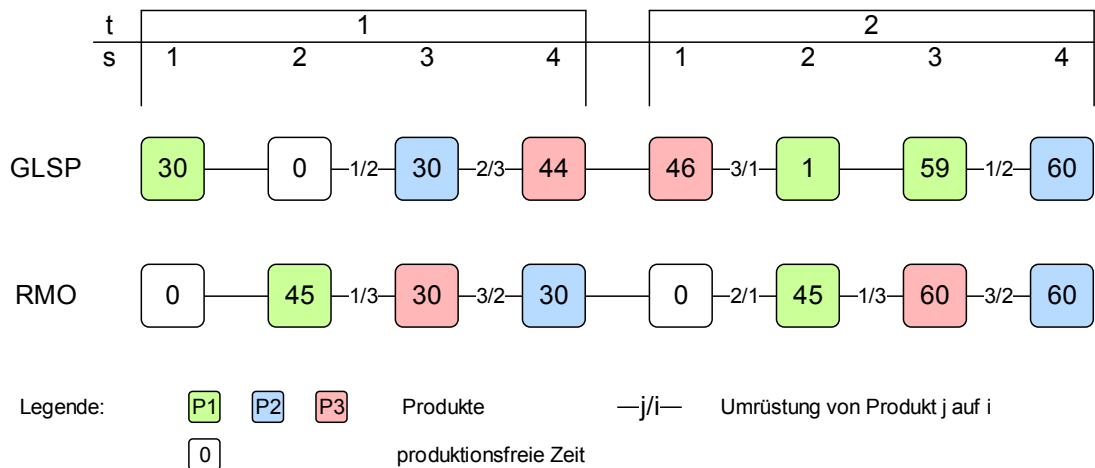


Abb. 30: Produktionspläne des Modells Glsp113j2t des Szenarios Glsp113j2t / Schedule#1

Mit RMO werden im Vergleich zur GLSP-Lösung 15 ME von P1 in Periode eins mehr produziert, weshalb zusätzliche Lagerkosten von 30 GE entstehen. GLSP beginnt in der zweiten Periode mit der Einplanung jenes Produkts, für welches am Ende von Makroperiode $t = 1$ als letztes gerüstet war (P3). RMO plant einen unnötigen Rüstvorgang nach Ende der ersten Periode ein. Anstatt in der zweiten Periode als erstes jenes Produkt zu produzieren, für welches am Ende der Vorperiode gerüstet war (P2), wird auf ein anderes umgerüstet (P1). Dabei ist zu erkennen, dass in der zweiten Periode exakt dieselbe Produktreihenfolge (P1-P3-P2) wie in der ersten Periode eingeplant wird. Es scheint daher, dass der Solver nach einem Bedarfszeitpunkt die Einplanung der Operationen von neuem beginnt, ohne die Reihenfolge vor dem letzten Bedarfszeitpunkt zu berücksichtigen. Dies geschieht, obwohl jene Operation, die P1 als Output hervorbringt, nicht als Rüstzustand am Beginn der ersten Periode definiert wurde. Eine Modellierung des Rüstzustandes am Beginn der ersten Periode für ein anderes Produkt außer P1 führt zu einem zusätzlichen Rüstvorgang. Hierbei wird am Beginn der Periode immer für P1 gerüstet bevor mit der Produktion begonnen werden kann (siehe 4). Auf die Festlegung des Rüstzustandes am Beginn einer Periode wird daher auch in diesem Fall verzichtet. Soweit möglich erfolgt dies auch in GLSP, um wiederum gleiche Ausgangsbedingungen zu schaffen.

Anhand dieses einfachen Modells kann auch sehr leicht der Einfluss von Lagerkosten auf die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung demonstriert werden. Verdoppelt man beispielsweise den Lagerkostensatz jenes Produkts, für welches in der ersten Periode vorausproduziert wird, so müsste idealerweise der Kapazitätsabgleich der zweiten Periode für ein anderes Produkt erfolgen. Deshalb wurde in GLSP der Lagerkostensatz für P3, in RMO für P1 verdoppelt. Erwartungsgemäß wird mit GLSP der identische Zielfunktionswert (68 GE) wie im Basisszenario ausgegeben. Anstatt der 14 ME von P3 wird nun dieselbe Menge von P1 vorausproduziert. Da RMO die Lagerkosten bei der Erstellung des Produktionsplans nicht berücksichtigt, belaufen sich die Gesamtkosten auf 110 GE.

In einem weiteren Szenario⁹⁶ wurde der Bedarf der zweiten Periode zunächst auf 70 ME je Produkt erhöht. RMO plant wiederum eine ME in der ersten Periode mehr ein als GLSP. Die Produktreihenfolge (P1-P3-P2) wird in beiden Perioden strikt eingehalten, weswegen, wie bereits im Ausgangsszenario, eine unnötige Umrüstung eingeplant werden muss. Die Gesamtkosten weichen demzufolge ca. 10% von der GLSP-Lösung ab.

Letztendlich wurde der Bedarf der zweiten Periode auf 81 ME für P1 und P2 und auf 80 ME für P3 erhöht.⁹⁷ Dies entspricht dem Maximalbedarf, der bei voller Linienauslastung gerade noch gedeckt werden kann. Die knappe Kapazität verhindert die Einplanung eines zusätzlichen Rüstvorgangs. RMO konnte dieses Szenario optimal lösen und lieferte dasselbe Ergebnis wie GLSP mit der Ausnahme, dass anstatt P1 das Produkt P3 vorausproduziert wurde. Es musste dabei von der ursprünglichen Rüstreihenfolge, welche in der zweiten Periode erneut mit P1 begann, abgewichen werden. Das letzte Los der ersten Periode musste über die Periodengrenze hinweg eingeplant werden. Die Vorausproduktion erfolgte mit RMO am Periodenende, was bei einer auf Mikroperiodenebene basierenden Lagerkostenabrechnung zu geringeren Kosten führen würde.

In einer Abwandlung des Modells⁹⁸ wurde ein zusätzliches Produkt eingeführt. Es soll untersucht werden, ob RMO die optimale Rüstreihenfolge bei variierenden Rüstzeiten/ -kosten findet. Lagerkosten bleiben in diesem Modell unberücksichtigt, weshalb es ausreicht, die Markoperiodenanzahl auf $t = 1$ mit $s = 5$ zu reduzieren. Die Rüstkosten betragen im Basisszenario einheitlich 50 GE, die Rüstzeiten 1 ZE. Es wird von einem einheitlichen Bedarf von 10 ME für alle vier Produkte ausgegangen. Die verfügbare Produktionskapazität beträgt 100 ZE.

Unerwarteterweise weichen die Ergebnisse von RMO bereits im einfachen Ausgangsszenario⁹⁹ von der Optimallösung ab. Es wird am Ende des Planungshorizonts das Los von P4 geteilt (Abb. 31) und somit ein unnötiger Rüstvorgang durchgeführt. Dieses Modell wurde mit einer Reihe verschiedener Bedarfsniveaus mit RMO gelöst. Der Solver wich allerdings nur bei einem Bedarf von 24 ME je Produkt vom in Abbildung 24 dargestellten ineffizienten Produktionsplan ab. Unter Umständen kann dieser Fehler auf die geringe Linienauslastung und die deswegen auftretenden Überkapazitäten zurückzuführen sein. Dies würde implizieren, dass RMO bei ausreichend vorhandener Kapazität schlechtere Produktionspläne erzeugt. Dieses Ergebnis ist an dieser Stelle deswegen überraschend, weil der Performancevergleich mit dem Standardsolver (siehe 4) Gegenteiliges zum Resultat hat. RMO sollte in der Lage sein, unnötige Umrüstungen einzusparen. Wird der Bedarf in diesem Szenario auf 24 ME je Produkt erhöht, so dass eine ZE Restkapazität übrig bleibt, generieren beide Solver die Optimallösung. Dies kann durch die Eigenschaft von CP, das „gute“ Lösungen leichter findet, wenn der Lösungsraum eingeschränkt wird, begründet werden

⁹⁶ Glsp113j2t_#2/Schedule#2

⁹⁷ Glsp113j2t_#3/Schedule#3

⁹⁸ siehe Anhang B.II

⁹⁹ Glsp114j1t_#1/Schedule#3

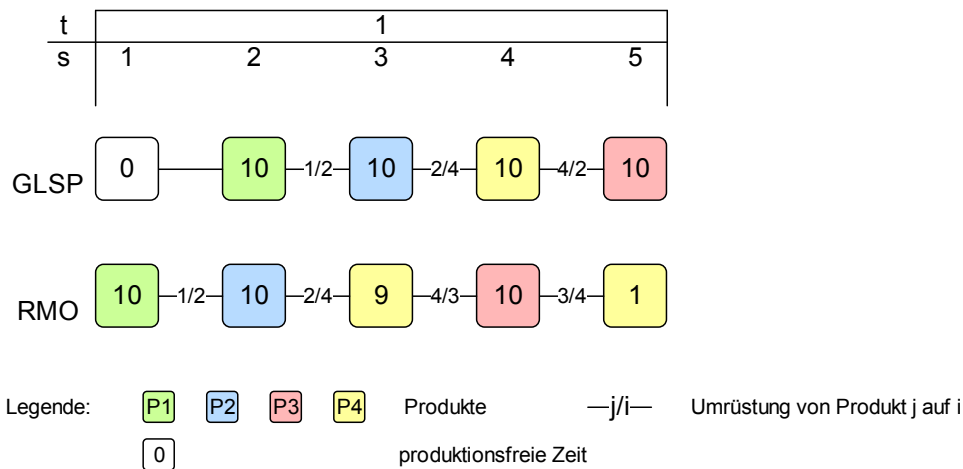


Abb. 31: Produktionspläne Modell 114j1t des Szenarios Glsp114j1t_#2 / Schedule#5

Im Kernszenario¹⁰⁰ dieses Modells wurde eine Rüstzeitenmatrix aufgestellt, die nur eine Rüstreihenfolge zulässt, welche zur Optimallösung führt. Die Rüstzeiten- und kosten wurden so verändert, dass jede andere Kombination zu überhöhten Gesamtkosten führt (Tab. 3).

S _{tij}	P1	P2	P3	P4
P1	0	5	1	5
P2	5	0	5	5
P3	5	1	0	5
P4	1	5	5	0

S _{ij}	P1	P2	P3	P4
P1	0	100	50	100
P2	100	0	100	100
P3	100	50	0	100
P4	50	100	100	0

Tab. 3: Rüstzeiten- und Rüstkostenmatrix Modell 114j1t des Szenarios Glsp114j1t_#2 / Schedule#5

Die zeit- und kostenoptimale Rüstreihenfolge lautet P4, P1, P3, P2. Als Ergebnis wird zwar eine vom Ausgangsszenario abweichende Lösung ausgegeben, jedoch ist diese nicht optimal. Es wurde eine Reihenfolge gewählt, bei der im Idealfall nicht mit P1 begonnen werden kann. Die Auswahl dieser Reihenfolge erfolgte deshalb, weil zu befürchten war, dass RMO das im Model Workspace an oberster Stelle stehende Produkt zuerst eingeplant hat. Dieser Verdacht hat sich zwar nicht bewahrheitet, jedoch ist das Ergebnis dieses Szenarios weit von der Optimallösung entfernt. RMO beginnt mit der Einplanung von P2 und rüstet nach der Produktion des gesamten Bedarfs auf das Produkt P4 um. Das Los von P4 wird wiederum geteilt, wodurch ein zusätzlicher Rüstvorgang erforderlich wird (Abb. 32). Die rot markierten Striche kennzeichnen die wegen der zeitlichen Länge „verbotenen“ Umrüstungen. Die Gesamtkosten¹⁰¹ betragen daher bei der RMO-Lösung 300 GE und liegen damit um das Doppelte über der GLSP-Lösung.

¹⁰⁰ Glsp114j1t_#2/Schedule#5

¹⁰¹ die Gesamtkosten entsprechen der Summe der Rüstkosten

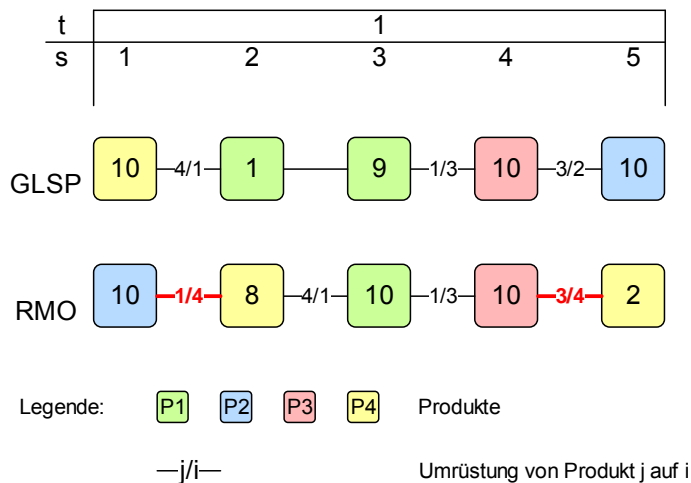
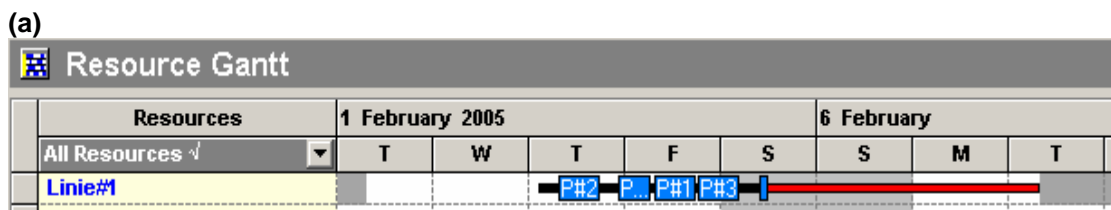


Abb. 32: Produktionspläne Modell 114j1t des Szenarios Glsp114j1t_#2 / Schedule#5

An der RMO-Lösung ist zu bemängeln, dass nicht nur die Rüstkosten überhöht sind, sondern auch die Gesamtdurchlaufzeit, bedingt durch die ineffiziente Reihenfolgeplanung, um zehn Stunden von der minimalen Durchlaufzeit gemäß GLSP abweicht.

Selbst wenn der Rüstzustand am Beginn der Periode auf P4 gestellt wird, kann RMO die optimale Rüstreihenfolge nicht finden. Die dabei ausgegebene Lösung ist sogar schlechter als jene ohne Definition des Rüstzustands, weil am Beginn der Produktion von P4 auf P2 umgerüstet wird, wodurch die Gesamtkosten auf 400 GE ansteigen (Abb. 33(a)). Interessanterweise benötigt RMO für den Lösungsvorgang länger als GLSP. Während GLSP auf der OPL-Umsetzung 0,2 Sekunden benötigt, dauert es mit RMO zwei Sekunden.

Wird der Bedarf je Produkt jedoch auf 24 ME erhöht, so dass von 99% Linienauslastung auszugehen ist, liefert auch RMO die Optimallösung (Abb. 33(b)).¹⁰² Der Lösungsraum ist nun soweit eingeschränkt, dass nur mehr die rüstkostenminimale Reihenfolge zulässig ist, weil andernfalls kein zulässiger Produktionsplan mehr möglich wäre. Bei Erreichen der maximalen Linienauslastung, d.h., wenn für ein beliebiges Produkt der Bedarf um eine ME erhöht wird, kann RMO keine Lösung mehr finden.



¹⁰² Glsp114j1t_#3/Schedule#6

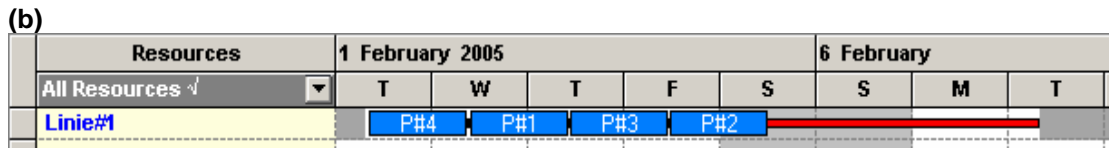


Abb. 33: Resource Gantt Ansicht in RMO, Modell Glsp114j1t: Rüstkostenminimale Reihenfolgeplanung: $d_j = 10$ ME (a), $d_j = 24$ ME (b).

5.2.2 Mehrlinienprobleme

Aufgrund der Modellerweiterung durch eine weitere nicht identische Produktionslinie können nun außer der Linienzuweisung von Losen auch die Ergebnisse bei linienspezifischen Produktionskosten miteinander verglichen werden. Das Basismodell umfasst zwei Linien (Linie#1, Linie#2), auf denen in drei Perioden jeweils vier Produkte hergestellt werden können.

In einem ersten Modell sollen die Solver einen Kapazitätsabgleich durchführen. Das Ausgangsmodell¹⁰³ dient in weiterer Folge noch einem weiteren Zweck: es soll überprüft werden, ob die Annahme, dass RMO bei steigender Auslastung eine bessere Lösungseigenschaft aufweist, zu verifizieren ist. Aus diesem Grund wird in mehreren Szenarios von unterschiedlich hohen Bedarfsniveaus ausgegangen.

In der ersten Periode ist von einer niedrigen Auslastung auszugehen, in den nachfolgenden beiden Perioden übersteigt die Nachfrage die vorhandene Produktionskapazität (Tab 4). In der zweiten Periode ist der Kapazitätsengpass noch relativ gering, in der dritten Periode allerdings bereits beträchtlich. Es muss daher bereits in der ersten Periode genügend Bestand aufgebaut werden, um die Nachfrage der nachfolgenden Perioden befriedigen zu können. Darüber hinaus ist die Lagerung von P2 (2 GE) um eine GE teurer als die Lagerung der übrigen Produkte. Damit soll erreicht werden, dass P2 möglichst bedarfssynchron produziert wird. Die Rüstkosten betragen unabhängig von der Reihenfolge 10 GE, die Rüstzeiten eine ZE. Auf Linie#2 kostet die Produktion 2 GE/ME, auf Linie#1 nur eine GE/ME.

t	1	2	3
K/Linie#1	35	40	20
K/Linie#2	35	40	20
d/P1	10	31	19
d/P2	10	31	19
d/P3	10	10	10
d/P4	10	10	10
Restkap.	30	-2	-18

Tab. 4: Basisdaten Modell 214j3t des Szenarios Glsp114j1t_#1 / Schedule#4

¹⁰³ siehe Anhang B.III

Die Anforderung, die in diesem Modell an die Solver gestellt wird, ist, eine Losgrößen- und Reihenfolgeentscheidung unter Kapazitätsengpässen, unterschiedlichen Lagerkostensätzen und linienspezifische Produktionskosten zu treffen. Das gewählte Bedarfsniveau entspricht in RMO der Maximalkapazität, d.h. eine Erhöhung des Bedarfs in einer der Perioden führt in RMO zu einem unlösbaren Produktionsplan. Theoretisch ist es jedoch möglich, den Bedarf der im Ausgangsszenario¹⁰⁴ ca. 95% der verfügbaren Produktionskapazität entspricht, zu erhöhen und trotzdem eine gültige Lösung zu erhalten. Dies konnte anhand eines GLSP-Datensatzes überprüft werden. Hierbei treten zum ersten Mal beträchtliche Laufzeitunterschiede bis zur Ausgabe der Lösung auf, wodurch der heuristisch vorgehende Solver Vorteile gegenüber dem Optimierenden aufweist. Während RMO in wenigen Sekunden einen gültigen Produktionsplan aufstellt, benötigt die ILOG-Software bereits 612 Sekunden bis zur Ausgabe der Lösung. Die Lösbarkeit in sinnvollen Zeitintervallen variiert je nach Datensatz bzw. Anzahl der Variablen (Anzahl der Linien, Produkte, Makroperioden). Erweitert man den Datensatz beispielsweise um eine Makroperiode, so verlängert sich die Lösungszeit um mehr als 200 Sekunden.

Auch dieses Szenario war mit der Terminierungsvariante PRE unlösbar, weswegen die Lose in RMO bedingt durch die JIT-Lösung zeitlich nahe am Periodenende aufgelegt werden (Abb. 34). Durch die vereinfachende Darstellungsvariante soll nicht der Eindruck erweckt werden, dass die gesamte Durchlaufzeit aufgrund der JIT-Produktion in RMO kürzer ist. Bedingt durch zwei zusätzliche Umrüstungen in der dritten Periode ist hier die Durchlaufzeit sogar länger. Die in GLSP auftretenden Stillstandzeiten (z.B. in $t = 1$) können durch ein Herabsetzen der Mikroperiodenanzahl verringert werden. Demzufolge würden die Lose zeitlich näher aneinanderrücken. Für die zeitlich genaue Lagerkostenabrechnung von RMO kann dies durchaus von Vorteil sein. Die Lagerkosten sind mit 44 GE in beiden Plänen identisch. Lagerungen treten in gleichem Ausmaß jeweils in der ersten und zweiten Periode auf. Richtigerweise wird von Produkt P2, das höhere Lagerkosten verursacht, kein Bestand aufgebaut, sondern bedarfssynchron produziert.

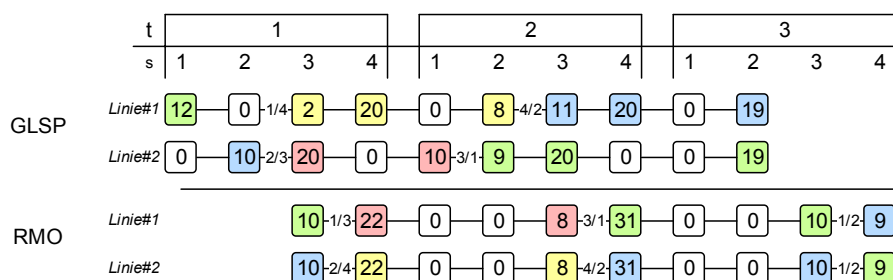


Abb. 34: Produktionspläne Modell 214j3t des Szenarios Glsp114j1t_#1 / Schedule#4

Weiters ist zu erkennen, dass RMO die Produktionsmengen völlig symmetrisch auf beide Linien aufteilt. Dies birgt in diesem Szenario allerdings zwei Probleme in sich,

¹⁰⁴ Glsp214j3t_#1/Schedule#1

die schließlich für die höheren Gesamtkosten verantwortlich sind: zum einen verursacht die symmetrische Linienzuweisung höhere Produktionskosten, weil es teurer ist auf Linie#2 zu produzieren. Die GLSP-Lösung zeigt, dass es möglich ist, auf Linie#2 Kosten sparender zu produzieren, da auf ihr 2 ME weniger eingeplant werden. Dies hat zur Folge, dass die Produktionskosten mit 176 GE in GLSP um 2 GE geringer ausfallen. Zum zweiten hat RMO Schwierigkeiten ein Los auf einer Linie durchzuproduzieren, ohne es zu teilen (siehe 4). Dieses Problem trat in allen Vergleichsmodellen trotz manueller Linienzuweisung auf. So werden in diesem Szenario in der dritten Periode die Lose von P1 und P2 geteilt, wodurch im Vergleich zu GLSP zwei zusätzliche Umrüstungen auftreten. Das Resultat zeigt sich in den um 20 GE höheren Rüstkosten, die nicht durch niedrigere Lagerkosten bzw. Produktionskosten kompensiert werden.

Die Lösungen differieren hinsichtlich der Gesamtkosten in einem weit weniger großen Ausmaß als dies aufgrund der vorangegangenen Ergebnisse zu erwarten war. Auch RMO bietet in diesem Szenario einen durchaus akzeptablen Produktionsplan, der hinsichtlich der Gesamtkosten nahe an der Optimallösung von GLSP liegt. Die Gesamtkosten der RMO-Lösung liegen nur um 6,25 % über jenen der GLSP-Ergebnisse.

Es stellt sich daher die Frage, warum der RMO-Solver in diesem Szenario einen relativ guten Produktionsplan aufgestellt hat. Der Umstand, dass P2 bedarfssynchron produziert wird und daher zu dieser geringen Kostenabweichung beiträgt, tritt freilich eher zufällig auf. Erhöht man beispielsweise die Lagerkosten von P1 bei gleichzeitiger Verringerung jener von P2, belässt RMO den Produktionsplan unverändert. Gleiches gilt für die Veränderung der Rüstkosten bzw. für das Vertauschen der linienspezifischen Produktionskosten.

Die Begründung für die guten Ergebnisse dieses Testlaufs ist tatsächlich in der hohen Auslastung zu finden, die in diesem Beispiel ungefähr bei 95% liegt. Um diese Annahme zu verifizieren wurde in einem neuen Szenario¹⁰⁵ das Bedarfsniveau soweit abgesenkt, dass der Anteil des Gesamtbedarfs an der Maximalkapazität ca. 13% beträgt. Der Bedarf wurde auf 2 ME je Produkt in allen drei Perioden gesetzt. Alle übrigen Daten wurden unverändert gelassen. Das durchaus realistische Verhältnis von Rüst- zu Lagerkosten¹⁰⁶ begünstigt noch immer eine Vorausproduktion, obwohl die Kapazitäten in jeder Periode ausreichen um bedarfssynchron produzieren zu können. Dieses Beispiel veranschaulicht sehr deutlich, wie wichtig es ist, Losgrößen- und Reihenfolgeentscheidungen simultan zu treffen und welche Einsparungspotentiale dadurch verwirklicht werden können (Abb. 35).

¹⁰⁵ Glsp2l4j3t_#2/Schedule#2

¹⁰⁶ 10:1 für P1, P2 und P3, sowie 5:1 für P2

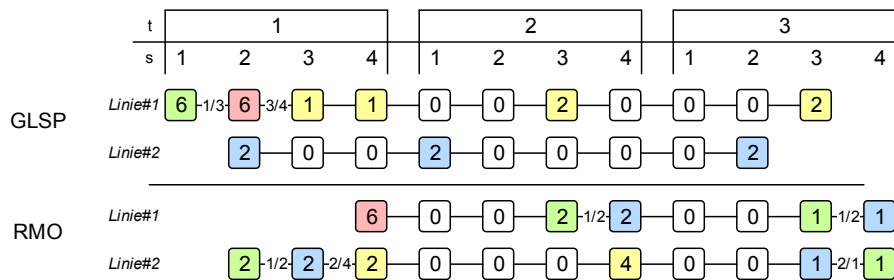


Abb. 35: Produktionspläne Modell 214j3t des Szenarios Glsp114j1t_#3 / Schedule#6

Die GLSP-Lösung zeigt, wie sowohl Lager- und Rüstkosten als auch die linienabhängigen Produktionskosten optimiert werden können: Am Beginn des Planungshorizonts wird der gesamte Bedarf von P1 und P3 produziert. Dies verursacht im Vergleich zur RMO-Lösung zwar höhere Lagerkosten, weil 4 ME mehr gelagert werden müssen, jedoch kommt es in weiterer Folge zu einem Einsparen von teuren Umrüstungen. Die Kosten für die Lagerung im Ausmaß von 4 GE sind geringer als die Kosten, die für eine wiederholte Losauflage von P1 und P3 und die dafür erforderlichen Umrüstungen anfallen würden. P4 kann daher bedarfssynchron produziert werden, wofür der Rüstzustand auf Linie#1 über die Periodengrenzen hinweg aufrechterhalten werden muss. Wäre es beispielsweise teurer den Rüstzustand aufrechtzuerhalten, so kann dies direkte Auswirkungen auf die Lagerkosten bzw. den Produktionsplan haben. Erhöht man in diesem Szenario die Bereitschaftskosten auf Linie#1 von 0 auf 2 GE, so wird in der dritten Periode nicht mehr produziert, weil ansonsten zusätzliche Aufrechterhaltungskosten von 10 GE entstehen würden. Dem gegenüber stehen aber nur Lagerkosten in der Höhe von 2 GE von der zweiten auf die dritte Periode. Unter diesen Umständen ist es günstiger, den Bedarf von P4 aus der dritten Periode mit Jenem aus t=2 zu einem Los zusammenzufassen. Es ist gerade bei niedriger Auslastung wünschenswert, Bereitschaftskosten in die Betrachtung mit einzubeziehen. Darüber hinaus wäre es aufgrund der freien Kapazitäten möglich, Linie#2 nicht zu beanspruchen, weil diese höhere Produktionskosten verursacht. Somit könnte das gesamte Los von P2 auf Linie#1 eingeplant werden, wodurch es möglich wäre, Produktionskosten in Höhe von 6 GE einzusparen. Dieses Einsparungspotential wird allerdings durch die Rüstkosten, die durch das zusätzliche Los auf Linie#1 entstehen, wieder zunichte gemacht. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass GLSP auch in der Lage ist, den Trade-off zwischen linienabhängigen Produktionskosten und Rüstkosten herzustellen.

Das ungünstige Rüstverhalten, sowie die überhöhte Beanspruchung der teureren Linie#2 führen dazu, dass die Gesamtkosten um 200% über den Minimalkosten gemäß GLSP liegen. Dabei kann RMO die gegenläufigen Zielgrößen der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung nicht annähernd optimieren. So wird zwar in t=1 bzw. t=2 für P3 bzw. P4 Lagerbestand aufgebaut, was angesichts der hohen Rüstkosten sinnvoll ist, jedoch können die Bestände nicht genutzt werden um Umrüstungen einzusparen. Es ist verwunderlich, warum der RMO-Solver überhaupt

Bestände aufbaut, obwohl ausreichend freie Kapazitäten vorhanden sind und Lager- bzw. Rüstkosten offenbar keine Nebenbedingungen der Heuristik sind. Es entsteht hierbei der Eindruck, dass zulässige Lösungen zu schnell akzeptiert werden und die Lösungssuche bereits frühzeitig beendet wird.

In den bisher erstellten Szenarios hat sich gezeigt, dass RMO bei niedriger Linienauslastung, d.h. bei ausreichend freier Produktionskapazität, offenbar schlechtere Lösungen erstellt. Eine Motivation des oben beschriebenen Modells war es, diese Eigenschaft des Solvers genauer zu untersuchen. Deshalb wurde das Modell für mehrere unterschiedliche Bedarfsniveaus gelöst, wobei die GLSP-Lösungen wiederum die Vergleichsgröße darstellen. Alternativ wäre es auch möglich, den Planungszeitraum, ausgehend von einem fixen Bedarfsniveau, sukzessive einzuschränken.

Die Obergrenze des Bedarfsniveaus bildet jenes des Ausgangsszenarios, in welchem der Anteil des Bedarfs an der verfügbaren Kapazität 95% entspricht. Als Untergrenze wurde ein Bedarf von 2 ME je Produkt in jeder der drei Perioden festgelegt. Dies entspricht einem Bedarfsniveau von ca. 13%, welches in mehreren Szenarios schrittweise erhöht wurde. Es ist dabei festzuhalten, dass in allen getesteten Szenarios sämtliche Kosten der RMO-Ergebnisse über Jenen von GLSP lagen. Dies ist deswegen nicht überraschend, da GLSP alle Modelle optimal lösen konnte. Für einige niedrige Bedarfsniveaus betragen die Kostenabweichungen mehr als 250%. Abbildung 36 zeigt den Verlauf der Gesamtkosten von RMO und GLSP bei steigender Auslastung. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die beiden Kostenverläufe bei zunehmendem Bedarf einander annähern. Die Kostenkurve in GLSP weist einen annähernd linearen Verlauf auf, die Kostenzuwächse in RMO verhalten sich hingegen degressiv.¹⁰⁷ Hauptverantwortlich dafür sind einerseits die Produktionskosten und andererseits die Rüstkosten. Da RMO die Linien unabhängig von den Produktionskosten gleichmäßig beansprucht, ergeben sich bei niedriger Auslastung klarerweise größere Unterschiede, weil bei einem dementsprechend hohen Bedarfsniveau auch GLSP nichts anderes übrig bleibt, als auch die teurere Linie einzuplanen. Was die Rüstkosten betrifft, so wurde festgestellt, dass RMO bei ausreichend freier Kapazität zumeist zu häufigen Umrüstungen neigt. Bei knapper Kapazität wird der Solver „gezwungen“ unnötige Umrüstungen einzusparen um gültige Produktionspläne zu erstellen.

¹⁰⁷ Die Kosten in GLSP verlaufen deshalb nicht exakt linear, weil die Bedarfe in den einzelnen Szenarios nicht proportional erhöht wurden.

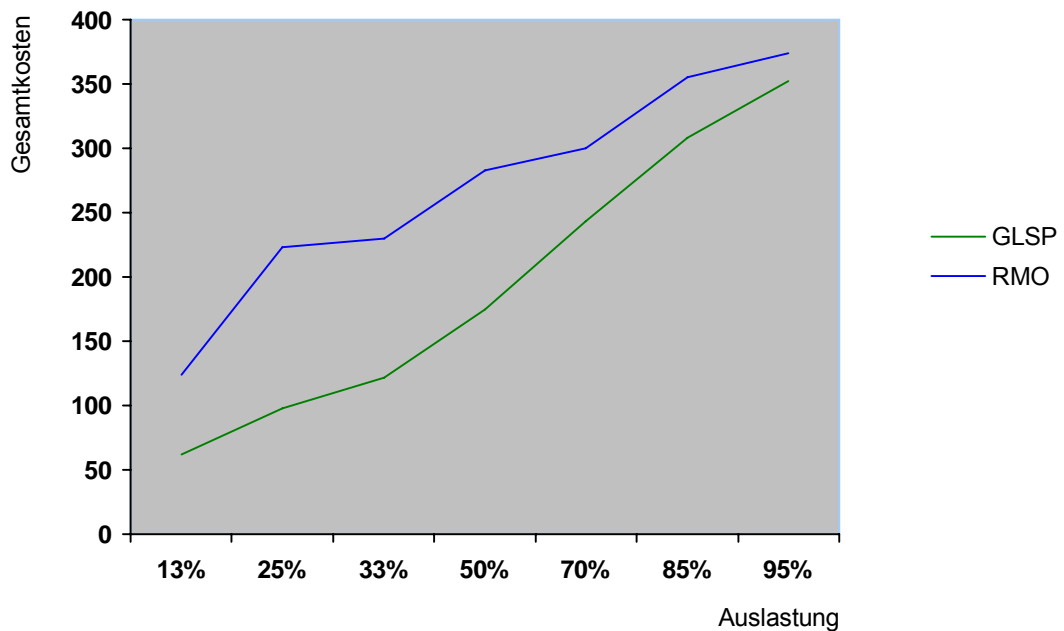


Abb. 36: Auslastungsvergleich von RMO und GLSP

Eine weitere äußerst ungünstige Eigenschaft von RMO soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben: der Umstand, dass ab einer Linienauslastung von ca. 90% sehr häufig keine gültige Lösung mehr gefunden wird, kann sich durchaus negativ auf die gesamte Produktionsplanung auswirken. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn Produktionsaufträge aufgrund der „scheinbar“ nicht vorhandenen Kapazitäten abgelehnt werden müssen. Hierbei darf man sich auch nicht von den logischerweise zu hohen Beträgen der KPI täuschen lassen, weil diese Kennzahlen die Auslastung der u.U. ungünstigen Produktionspläne anzeigen.

Zum Abschluss der Einlinienprobleme wird der Komplexitätsgrad des Basismodells noch einmal erhöht, wobei von unterschiedlichen Linienkapazitäten ausgegangen wird.¹⁰⁸ Linie#1 verfügt über eine Periodenkapazität von 50 ZE, wogegen Linien#2 nur halb solange für die Produktion zur Verfügung steht. In PSD ist dieses Beispiel modellierungstechnisch insofern kritisch, als dass im Calendar Editor für jede Linie die Kapazität mittels Stillstandzeiten eingeschränkt werden muss. Dies verursacht das in Kapitel 4 dargestellte Problem, wonach bei knappen Periodenkapazitäten Umrüstungen während der Stillstandzeiten eingeplant werden. Falls dieser Fehler auftrat, wurden die anhand dieses Modells erstellten Produktionspläne manuell, mittels eines repair solve, korrigiert.¹⁰⁹ Aufgrund der oben dargestellten Probleme bei niedriger Auslastung ist von einem hohen Bedarfsniveau auszugehen. Die

¹⁰⁸ Glsp2l6j4t/Schedule2l6j4t

¹⁰⁹ Es ist darauf hinzuweisen, dass die Produktionspläne in RMO durch die manuellen Korrekturen gegenüber den ursprünglichen Lösungen verbessert wurden. Diese Korrekturen waren jedoch notwendig, da die ungültigen Pläne nicht als Vergleichsbasis herangezogen werden können.

Periodenbedarfe sind in Tabelle 5 ersichtlich. Der Kapazitätsengpass in $t = 4$ erfordert wiederum eine Vorausproduktion in einer der vorhergehenden Perioden.

t	1	2	3	4
K/Linie#1	50	50	50	50
K/Linie#2	25	25	25	25
d/P1	5	10	5	25
d/P2	5	10	5	25
d/P3	5	10	5	25
d/P4	5	10	5	25
d/P5	5	10	5	25
d/P6	5	10	5	25
Restkapazität	45	15	45	-75

Tab. 5 Basisdaten Modell 2l6j4t des Szenarios Glsp2l4j3t_#1 / Schedule#1

Auf den beiden Linien können nun insgesamt sechs Produkte hergestellt werden, welche sich in zwei Produktgruppen unterteilen lassen. Die erste Produktgruppe besteht aus den Produkten P1, P2 und P3, die zweite Gruppe setzt sich aus den übrigen drei Produkten zusammen. Auf Linie#2 nehmen Umrüstungen innerhalb dieser Produktgruppen 1 ZE in Anspruch und kosten 10 GE, „große“ Produktwechsel zwischen den Gruppen dauern doppelt solange und kosten 50 GE. Rüstvorgänge auf Linie#2 kosten 20 GE innerhalb einer Produktgruppe und 100 GE zwischen Produkten verschiedener Gruppen. Die Produktionskoeffizienten betragen $a_{1j} = 1$ für Linie#1 und $a_{2j} = 2$ für Linie#2. Des Weiteren ist es billiger, die Produkte der ersten Gruppe zu lagern (2 GE), gegenüber jenen der Zweiten (4 GE).

Die Anforderung an die Solver in diesem Modell ist es, eine Simultanplanung bei nicht identischen parallelen Linien mit unterschiedlichen Produktionskapazitäten und Produktionskosten durchzuführen. Außerdem treten reihenfolgeabhängige Rüstkosten bzw. -zeiten auf sowie ein Kapazitätsengpass in der letzten Periode, der eine Vorausproduktion erforderlich macht. Das Planungsproblem wird dadurch erschwert, dass zusätzlich noch von unterschiedlichen Lagerkostensätzen auszugehen ist.

Beim Aufstellen der Produktionspläne hat sich herausgestellt, dass es mit RMO äußerst schwierig ist, eine gültige Lösung zu finden. Es konnte erst nach mehrmaligen Abbruch und Neustart des Lösungsversuchs ein Ergebnis erzielt werden. Lösungsversuche, die jeweils nach 90 Minuten Laufzeit keinen Plan erzeugten, wurden abgebrochen. Aufgrund der Erfahrungswerte aus den getesteten Szenarios konnte nicht damit gerechnet werden, dass sich die Laufzeit des Solvers in diesem Szenario erheblich verlängert. Diese 90 Minuten dienen deswegen als Richtwert für den Abbruch, weil der ILOG-Solver knapp 87 Minuten bis zur Ausgabe einer vollständigen Lösung benötigte und von der RMO-Heuristik erwartet wurde, dass diese schneller zu einer Lösung kommt. Die von RMO ausgegebene Lösung konnte nur mithilfe manueller Linienzuweisung d.h. mit Vergabe von Linienprioritäten erstellt werden. Die faktische Zulässigkeit dieses Plans musste

ebenfalls manuell, mittels mehrerer repair solves, hergestellt werden, weil die Rüstzustände am Periodenanfang nicht mit jenen am Ende der Vorperiode übereinstimmen. In GLSPMS ist Linie#1 für Produkt P1, und Linie#2 für P2 gerüstet. Dadurch wird verhindert, dass die Produktgruppen jeweils vollständig einer Linie zugewiesen werden um so „teure“ Produktwechsel zu vermeiden. Aus den bereits dargestellten Gründen war die Definition des Rüstzustandes am Periodenbeginn in RMO nicht möglich, um einen gültigen Produktionsplan zu erhalten. Damit in diesem Modell die Vergleichbarkeit hergestellt werden kann, muss daher angenommen werden, dass am Periodenanfang gegebenenfalls eine fiktive Umrüstung stattfindet.

Ein wesentlicher Unterschied zu den bisherigen Ergebnissen der mit RMO erstellten Produktionspläne ergibt sich daraus, dass der Solver die Lose nicht mehr symmetrisch auf beide Linien aufteilt (Abb. 37). Diese Vorgehensweise wird aufgrund der unterschiedlichen Linienkapazitäten erschwert. Das Teilen der Lose erfordert zusätzliche Umrüstungen auf beiden Linien, für die Rüstzeiten eingeplant werden müssen. Die vorhandenen Kapazitäten sind jedoch knapp und lassen nur wenig unnötige Umrüstungen zu. Würden die Lose daher nach wie vor geteilt werden, käme kein gültiger Produktionsplan zustande. Es wird vermutet, dass dies auch der Grund ist, warum RMO für dieses Szenario kaum ein gültiges Ergebnis erzielen konnte.

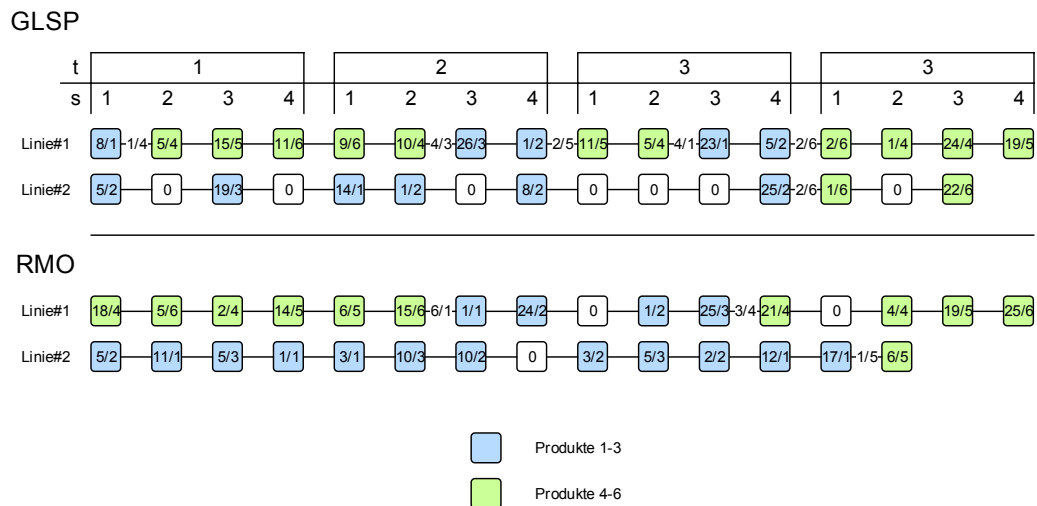


Abb. 37: Produktionspläne Modell2L6j4t mit Angabe von Produktionsmenge / Produktnummer des Szenarios Glsp2I4j3t_#1 / Schedule#1

Bei dem von RMO erstellten Produktionsplan fällt auf, dass gegenüber GLSP weniger Produktwechsel zwischen den Produktgruppen auftreten. Insgesamt wird jedoch öfters umgerüstet. Geht man davon aus, dass in RMO auf Linie#1 am Periodenbeginn der Rüstzustand geändert werden soll, so müssen 490 GE Rüstkosten veranschlagt werden. Dies ist derselbe Betrag, der auch in GLSP für Umrüstungen notwendig ist (Tab. 6). Die Lagerkosten der RMO-Lösung sind um ca. 15% höher und dafür verantwortlich, dass auch die Gesamtkosten über jenen der

GLSP-Lösung liegen. RMO lagert zwar um 8 ME weniger ein, jedoch hauptsächlich Produkte der zweiten Gruppe, die höhere Lagerkosten verursachen. Linie#3 wird von RMO um 5 ME weniger stark ausgelastet, wodurch sich die Produktionskosten verringern. Die Gesamtkosten der RMO-Lösung weichen nur um ca. 4 % vom Zielfunktionswert der GLSP-Lösung ab. Mit dem in diesem Szenario definierten Bedarfsniveau ist die Kapazitätsgrenze in RMO erreicht. Mit GLSP können auch die verbleibenden 7 ZE Restkapazität auf Linie#1 noch verplant werden.

Kosten	GLSP	RMO
Rüst	490	490
Lager	366	420
Produktion	365	360
Summe	1221	1270

Tab. 6: Kostenvergleich Modell216j4t des Szenarios Glsp214j3t_#1 / Schedule#1

Die Ergebnisse dieses Modells haben gezeigt, dass RMO durchaus in der Lage ist, gute Pläne zu erstellen, sofern keine Kapazität für unnötige Umrüstungen vorhanden ist. Es ist allerdings hinzuzufügen, dass sich die Lösungssuche in den getesteten Szenarios dieses Modells als sehr zeitaufwändig erwiesen hat, weil die Lösungsversuche zu oft in unlösbaren Plänen resultierten. Darüber hinaus musste die Reihenfolgeplanung zum Teil mithilfe mehrerer repair solves manuell durchgeführt werden, da der Solver andernfalls die Umrüstungen während der Stillstandzeiten einplant.

5.3 Mehrstufige Modelle

Um eine vollständige Aussage über die Lösungsqualität des RMO-Solvers zu treffen, ist es notwendig, auch mehrstufige Produktionsprozesse in Betracht zu ziehen. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt mehrere mehrstufige Probleme behandelt, die sowohl mit RMO als auch mit GLSP gelöst werden. Um die Vergleichbarkeit herzustellen, wird die allgemeine Variante des GLSP durch die mehrstufige Formulierung GLSPMS erweitert und wie in Abschnitt 5.2 mit ILOG gelöst.

Da die mehrstufige Formulierung des GLSP auf unterschiedlichen Annahmen als die allgemeine Variante beruht, wird das Grundmodell nachfolgend kurz vorgestellt.¹¹⁰

Zielfunktion

$$\text{Min} \sum_{i,j \neq 0} h_j I_{jt} + \sum_{l,j,s} s_{lij} z_{lijs} + \sum_{l,j,s} c_{ij}^P x_{ijs} + \sum_{l,j,s} c_{ij}^B \bar{x} \quad (5.3.1)$$

¹¹⁰ Vgl. Meyr (2004), S.10ff

Nebenbedingungen

$$I_{j,s-1} + \sum_l x_{ljs} - \sum_{l,i \in \mathcal{N}_j} p_{ji} x_{lis} - d_{js} = I_{js} \quad \forall j \neq 0, s \quad (5.3.2)$$

$$I_{js} \leq I_j^{\max} \quad \forall j \neq 0, s \quad (5.3.3)$$

$$w_s = \bar{w}_s \quad \forall s \in \Phi^i \quad (5.3.4)$$

$$\bar{x}_{ls} + \sum_j (a_{lj} x_{ljs} + \sum_i st_{lij} z_{lij,s+1}) = w_{s+1} - w_s \quad \forall l, s < \mathcal{S} \quad (5.3.5)$$

$$\sum_{j \neq 0} x_{ljs} = 0 \quad \forall l, s \in \Phi_l^o \quad (5.3.6)$$

$$a_{lj} x_{ljs} \leq \bar{w}_s y_{ljs} \quad \forall l, j, s \quad (5.3.7)$$

$$x_{ljs} \geq m_j \sum_{i:i \neq j} z_{lijs} \quad \forall l, j, s \quad (5.3.8)$$

$$M(1 - \sum_{i,j:i \neq j} z_{lijs}) \geq \sum_j x_{ljs-1} \quad \forall l, s \geq 2 \quad (5.3.9)$$

$$\sum_l y_{ljs} = 1 \quad \forall l, s \quad (5.3.10)$$

$$y_{ljs} = 0 \quad \forall l, s, j \in \mathfrak{S}_l \quad (5.3.11)$$

$$y_{li,s-1} + y_{ljs} - 1 \leq z_{lijs} \quad \forall l, i, j, s \geq 2 \quad (5.3.12)$$

$$\sum_{i,j} z_{lijs} = 1 \quad \forall l, s \geq 2 \quad (5.3.13)$$

Die aus 5.1 zu ergänzenden bzw. substituierenden Indices, Daten und Variablen lauten:

Indexmengen

\mathcal{N}_j	Menge aller direkten Nachfolger von Produkt j
\mathfrak{S}_l	Menge aller Produkte, die auf Linie l verboten sind
Φ	Menge aller Mikroperioden
$\Phi^i \subset \Phi$	Menge aller fixierten Mikroperioden
$\Phi_l^o \subset \Phi$	Menge aller Mikroperioden, die auf Linie l verboten sind
$\Phi^t \subset \Phi$	Menge aller Mikroperioden, die gleichzeitig die letzte Mikroperiode einer Makroperiode darstellen

Daten

d_{js}	externe Nachfrage von Produkt j in Mikroperiode s
\bar{w}_s	Startzeitpunkt einer fixierten Mikroperiode $s \in \Phi^i$

p_{ji}	Menge von Produkt j, die zur Herstellung von einer ME von Produkt i benötigt wird
I_j^{\max}	Maximalbestand von Produkt j
M	sehr große Zahl

Variablen

$w_s \geq 0$	Startzeitpunkt von Mikroperiode s
--------------	-----------------------------------

Die Zielfunktion (5.3.1) unterscheidet sich nicht von der des allgemeinen GLSP. Auch im nachfolgenden Ergebnisvergleich wird aus den bereits genannten Gründen die Optimierung der Bereitschaftskosten vernachlässigt.

Die Lagerbilanzgleichung (5.3.2) stellt sicher, dass die interne Nachfrage, die sich aus dem Direktbedarfskoeffizienten p_{ji} ergibt und die externe Nachfrage d_{js} ohne Nachlieferungen gesichert sind. Die Gleichung 5.3.9 ist für die Liniensynchronisation verantwortlich und verhindert, dass inkorrekterweise zuviel produziert wird, wenn eine Vorgängerlinie eine langsamere Produktionsgeschwindigkeit aufweist als eine ihrer Nachfolgerlinie. Diese Restriktion verhindert weiterhin, dass in Perioden, in denen eine Umrüstung stattfindet, produziert wird. Ergänzt man die Gleichung 5.3.9 durch Restriktion,

$$M \left(1 - \sum_{ii \neq j} z_{ljis}\right) \geq x_{kz, s-1} \quad \forall s \geq 2 \quad (5.3.14)$$

so wird das Produktionsverbot für jene Linien, die nicht direkt von einer Vorgänger-Nachfolgerbeziehung betroffen sind, aufgehoben. Somit sind indirekte Vorprodukte nicht mehr an die Produktionszeiten einer „langsameren“ Vorgängerlinie k gebunden.

5.3.4 definiert die Kapazität über die Startzeitpunkte der fixierten Mikroperioden. Die Restriktionen 5.3.5 und 5.3.6 stellen sicher, dass die Kapazität eingehalten wird. Mittels 5.3.5 wird ein gemeinsames Zeitraster für alle Linien definiert d.h. die Länge $w_{s+1} - w_s$ einer freien Periode s ist für alle Linien gleich. In dieser Periode kann wiederum sowohl produziert, gerüstet als auch der Rüstzustand aufrechterhalten werden. Das Ende des Planungshorizonts bildet eine zur Produktion verbotenen Mikroperiode.

Für die nachfolgenden Probleme wird das Grundmodell des GLSPMS als Referenzmodell zu RMO herangezogen.¹¹¹ Der auffälligste Unterschied zum GLSP ist somit der formelle Verzicht auf Makroperioden. Die Gesamtkapazität wird daher

¹¹¹ Auf die von Meyr 2004 vorgeschlagenen Verbesserungen (z.B. Mengen- und Rüstzeitsplitting) wird nicht eingegangen.

über die Startzeitpunkte der fixierten Mikroperioden bestimmt. Der Zeitpunkt des Bedarfsanfalls ist am Ende der letzten Mikroperiode vor einer fixierten Mikroperiode. Die Zeitspanne zwischen zwei fixierten Mikroperioden stellt implizit eine Makroperiode dar. Diese Modelleigenschaft kommt der Modellierung in PSD sehr nahe. Im GLSPMS müssen die Periodenlängen hinreichend groß sein um zulässige Lösungen zu erhalten. Dasselbe gilt allerdings auch für den RMO-Solver, der, wie bereits ansatzweise gezeigt wurde, bei knappen Kapazitäten sehr oft keine Pläne erstellen kann, obwohl dies theoretisch möglich wäre.

Ein Problem in RMO stellt die Modellierung dar, wenn keine WIP-Bestände erlaubt sind. In diesem Fall müssen die Operationen mittels Routings verbunden werden. Diese Art der Modellierung hat sich teilweise als sehr umständlich erwiesen, weil die Linienkoordination manuell durchgeführt werden muss. So mussten für Linien mit unterschiedlichen Produktionsgeschwindigkeiten logische Losgrößen bestimmt werden. Dies hat allerdings zur Folge, dass WIP-Bestände zugelassen werden müssen, da andernfalls kein gültiger Produktionsplan erstellt werden konnte. Abbildung 38 verdeutlicht dieses Problem für einen zweistufigen konvergierenden Produktionsprozess mit drei Linien. Auf Linie#1 kann in zwei Minuten eine ME eines Vorprodukts VP#1 hergestellt werden, während das zweite Vorprodukt VP#2 in nur einer Minute auf Linie#2 gefertigt werden kann. Beide Vorprodukte gehen in das Endprodukt EP ein. Die Operationen der Vorprodukte und jene des Endprodukts sind mit einem Routing verbunden, so dass kein Endprodukt erzeugt werden kann, bevor nicht das korrespondierende Vorprodukt hergestellt wurde. Somit kann mit der Produktion von EP frühestens nach zwei Minuten begonnen werden. Die nächsten ME der Vorprodukte dürfen daher erst nach drei Minuten produziert werden. Wenn keine Zwischenbestände von VP#2 erlaubt sind, muss der Rüstzustand auf Linie#2 entweder erhalten bleiben, oder die Linie muss abgeschaltet werden.

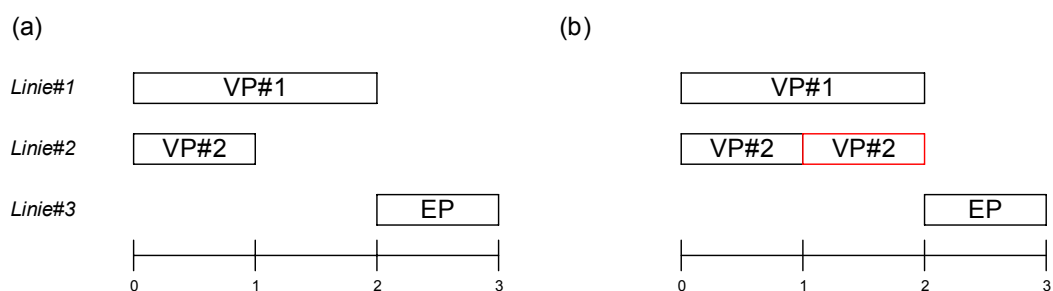


Abb. 38: Linienkoordination in RMO bei Modellierung mittels Routings und unterschiedlichen Produktionsgeschwindigkeiten

Unglücklicherweise hat sich herausgestellt, dass diese Modellierungsvariante (a) mit RMO nicht lösbar ist.¹¹² Um dieses Problem zu umgehen, müssen logische Losgrößen definiert werden d.h., dass die Operation, aus der VP#2 hervorgeht, verändert werden muss. Anstatt einer ME je ZE müssen zwei ME in zwei ZE hergestellt werden (b). Die hat aber zur Konsequenz, dass mit jedem produzierten

¹¹² Die ausgegebene Fehlermeldung lautet: „precedence constraints error“

EP ein Zwischenbestand von einer ME VP#2 aufgebaut wird. Daher müssen für Linien mit unterschiedlichen Produktionsgeschwindigkeiten beschränkt WIP-Bestände zugelassen werden.

Bezüglich der Lagerkostenberechnung musste beim Vergleich mit GLSPMS wie bereits beim Vergleich mit der allgemeinen Formulierung erneut die Annahme getroffen werden, dass nur für Bestände, die Makroperiodengrenzen überdauern, Lagerkosten anfallen. Im GLSPMS werden nun auch die Mikroperiodenbestände ausgegeben, was die Vergleichbarkeit erleichtert. Dieses feinere Zeitraster ist einerseits praxisrelevant und andererseits notwendig, um auch eventuell auftretende Zwischenproduktbestände abbilden zu können. Zum besseren Verständnis der Modelleigenschaften wird der Ergebnisvergleich wiederum mit einem einfachen Beispiel¹¹³ gestartet.

Ein Vorprodukt, welches auf Linie#1 hergestellt wird, kann auf zwei parallelen Linien (Linie#2, Linie#3) zu zwei unterschiedlichen Endprodukten (EP#1, EP#2) weiterverarbeitet werden, wobei Umrüstungen von EP#1 auf EP#2 teurer sind (100 GE) als umgekehrt (50 GE). Die Rüstzeiten betragen einheitlich eine ZE. Zur Herstellung einer ME von EP#2 werden zwei ME des Vorproduktes benötigt. Der Direktbedarfskoeffizient von EP#1 hat den Wert $p = 1$. Es ist weiters teurer EP#2 auf Linie#2 zu produzieren, wofür Produktionskosten in der Höhe von 0,2 GE/ME anfallen, während die Herstellung aller übrigen Produkte nur 0,1 GE/ME kostet. Die Lagerkosten für die Produkte VP, EP#1 und EP#2 betragen 1, 2 und 4 GE. Die Anzahl der Mikroperioden beträgt 9. Es sind zwei Perioden mit einer Periodenlänge von jeweils 80 ZE vorgesehen, d.h. die Startzeitpunkte der fixierten Mikroperioden betragen 0, 80, und 160. Die korrespondierenden fixierten Mikroperioden sind somit 1, 5 und 9. Der Bedarf am Ende der ersten Periode beträgt für beide Produkte jeweils 10, am Ende der zweiten Periode für EP#1 30 und für EP#2 0. Es ist also in beiden Perioden ausreichend Produktionskapazität vorhanden. Die für dieses Beispiel relativ hohe Mikroperiodenanzahl wäre eigentlich nicht erforderlich, um eine zulässige Lösung zu erhalten. Bedingt durch den Umstand, dass die Rechenzeit von ILOG verschwindend gering ist, können problemlos mehrere Mikroperioden eingeplant werden. Zwischenproduktbestände sind nicht zugelassen. Abbildung 39 stellt die Produktionspläne beider Solver dar. Da in RMO keine Mikroperiodeneinteilung erfolgt, bezeichnet w_z den Startzeitpunkt des Produktionszyklus.¹¹⁴

¹¹³ siehe Anhang B.IV

¹¹⁴ w_z = Startzeitpunkt der Produktion des Vorprodukts

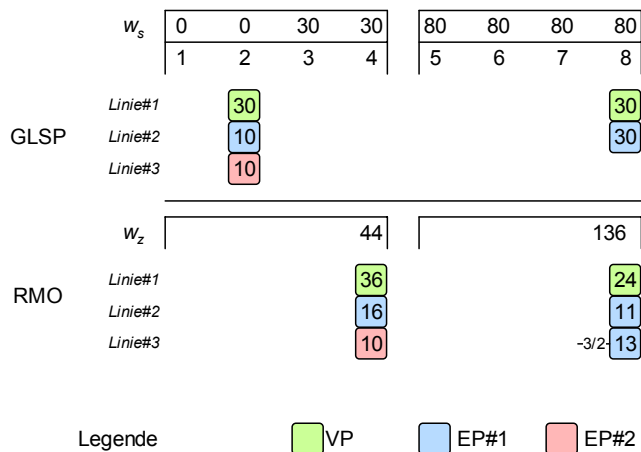


Abb. 39: Produktionspläne GLSPMS1VP2EP des Basisszenarios

Es sind hierbei auch jene Mikroperioden dargestellt, die eine Länge von 0 ZE aufweisen. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass sie den gleichen Startzeitpunkt wie die vorhergehende Mikroperiode besitzen. Somit kann auch die unterschiedliche Art der Terminierung der beiden Solver herausgelesen werden. Während in GLSPMS die Produkte jeweils zu Beginn des Planungshorizonts eingelagert werden, erfolgt in RMO die Einlagerung aufgrund der Einstellung JIT jeweils am Periodenende. Es ist auch zu erkennen, dass in GLSPMS die Art der Terminierung unabhängig davon ist, in welcher Mikroperiode mit der Produktion begonnen wird. So ist in diesem Beispiel in der zweiten Periode erst die vierte Mikroperiode für die Produktion bestimmt. Jedoch ist ihr Startzeitpunkt $w_8 = 80$ der Beginn der zweiten „Makroperiode“, weil die vorhergehenden drei Mikroperioden Leerperioden darstellen.

Was den Ergebnisvergleich betrifft, so ist zu erkennen, dass RMO eine schlechtere Performance gegenüber der GLSPMS-Lösung bietet. Unverständlicherweise wird in der ersten Periode ein Lagerbestand von EP#1 aufgebaut, was unweigerlich auch einen Bestandsaufbau des Vorprodukts zur Folge hat. Dies geschieht obwohl in der zweiten Periode ausreichend Produktionskapazität vorhanden wäre, um bedarfssynchron zu produzieren. Deshalb ergeben sich Lagerkosten in Höhe von 18 GE. Wie aufgrund der Ergebnisse aus den vorhergehenden Abschnitten zu erwarten war, teilt RMO das Los von EP#2 in der zweiten Periode, wodurch es zu einer unnötigen Umrüstung kommt, die Kosten in Höhe von 50 GE verursacht. Die GLSPMS-Lösung zeigt, dass es keinesfalls notwendig ist, weder Bestände aufzubauen oder Umrüstungen durchzuführen. Die Gesamtkosten gemäß GLSPMS, die in vollem Umfang den Produktionskosten entsprechen, betragen daher 12 GE, jene der RMO-Lösung 80 GE.

5.3.1 Ein divergierender Produktionsprozess¹¹⁵

Das folgende Beispiel wurde aus der Publikation des GLSPMS entnommen.¹¹⁶ Die Struktur des Produktionsprozess ist motiviert durch zwei Anwendungsfälle aus der Verpackungsmittel- und Farbmonitorproduktion, die in GLSPMS zwar abbildbar, wegen ihrer Problemgröße auf Standardsolvern jedoch nicht mehr lösbar sind.

Das Produktionssystem besteht aus zwei Produktionsstufen. Die erste Stufe umfasst die Herstelllinie $I = 1$ auf der Glas in heller ($j = 1$) und Glas in dunkler ($j = 2$) Farbe produziert werden kann. Die Produktion heller Farbe ist relativ zeitaufwändig, so dass von Produktionskoeffizienten $a_{11} = 4$ für helle und $a_{12} = 2$ für dunkle Farbe auszugehen ist. Umrüstungen von dunkel nach hell benötigen 6 ZE, umgekehrt jedoch nur 2 ZE. Die beiden Vorprodukte werden auf der zweiten Produktionsstufe in Endprodukte unterschiedlicher Länge geschnitten. Aus den Kombinationen hell/dunkel und lang/kurz ergeben sich daher die vier Endprodukte $j = 3, \dots, 6$. Für lange Endprodukte muss mit $p_{13} = p_{25} = 2$ doppelt soviel Vorproduktmenge bereitgestellt werden als mit $p_{14} = p_{26} = 1$ für kurze Endprodukte.

Auf der zweiten Produktionsstufe stehen zwei parallele Produktionslinien $I = 2, 3$ zur Verfügung. Die „neuere“ Linie $I = 2$ kann ein langes Endprodukt in 3 ZE und ein kurzes Endprodukt in 4 ZE fertigen. Eine Umrüstung von kurz nach lang dauert 2 ZE, umgekehrte Wechsel benötigen nur 1 ZE. Zusätzlich müssen für Farbwechsel von dunkel nach hell 3 ZE Reinigungszeit in Kauf genommen werden, für Farbwechsel von hell nach dunkel jeweils 1 ZE. Die „ältere“ Linie $I = 3$ kann nur kurze Endprodukte mit einem Zeitaufwand von 8 ZE/ME fertigen. Hier benötigen Farbwechsel von dunkel nach hell 4 ZE, umgekehrte Rüstvorgänge nur 2 ZE. Zudem ist es mit $c_{34} = c_{36} = 2$ um eine GE teurer auf der „älteren“ Linie zu produzieren. Der Lagerkostensatz beträgt 1 für Vorprodukte und 3 für Endprodukte. Der Planungshorizont umfasst drei Perioden. In der ersten Periode ist nur ein Bedarf von $j_5 = 2$ und $j_6 = 3$ vorgesehen, in den folgenden beiden Perioden sollen von jedem Endprodukt 6 ME erzeugt werden.

Im Originalproblem beträgt die Periodenkapazität 80 ZE. Die Gesamtkapazität von 240 ZE entspricht genau jenem Planungszeitraum, in dem gerade noch eine zulässige Lösung gefunden werden kann. Mit RMO konnte bei gleichen Periodenbedarfen erst ab einer Periodenkapazität von 120 ZE, d.h. 50% über der des Originalproblems, eine gültige Lösung gefunden werden. Dies ist einerseits auf die modellierungstechnische Besonderheit der Routings und andererseits auf die schlechte Performance bei „schwierigeren“ Modellen zurückzuführen. Der Umstand, dass für ein langes Endprodukt zwei Vorprodukte bereitgestellt werden müssen, macht es erforderlich, dass für jene Operationen, welche die Vorprodukte erstellen, „logische“ Losgrößen definiert werden müssen. So können beispielsweise immer nur 2 ME heller Farbe in 8 ZE erzeugt werden. Dadurch verlängert sich gezwungenermaßen die Durchlaufzeit, was dazu führt, dass die Kapazitätsgrenzen schneller erreicht werden. Darüber hinaus kommt es durch die Verdoppelung der Losgröße zu einer Überproduktion der Vorprodukte. RMO plant deshalb einen

¹¹⁵ Siehe Anhang B.V

¹¹⁶ Vgl. Meyr (2004), S19ff

Lagerbestand von 27 ME am Ende der dritten Periode ein. Außerdem wird bereits in der ersten Periode vorausproduziert und die Kapazität dadurch voll ausgelastet. Aufgrund der Kapazitätserweiterung um 40 ZE ist es allerdings nicht mehr notwendig, Lagerbestände aufzubauen, wie der GLSPMS-Produktionsplan zeigt (Tab.7). Mit RMO geschieht dies aber deshalb, weil der Solver darauf ausgerichtet ist, die Linie I = 1 ohne Produktionsunterbrechungen auszulasten.

GLSPMS

s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
w _s	0	1	9	10	120	138	168	216	240	266	316	340
I = 1		4/2		3/2	6/2	12/2	12/1	6/1	6/1	12/1	12/2	6/2
I = 2		2/5		3/6	4/6	6/5	6/3	6/4	6/4	6/3	6/5	5/6
I = 3					2/6							1/6

RMO

w _z	5						120				240	
I = 1	12/1	10/1	4/2	2/2	2/2	2/2	14/1	8/2	8/2	8/2	12/1	24/2
I = 2	5/4	5/3	2/6	1/5	1/6	1/5	7/3	5/5	1/6	1/5	6/5	
I = 3	1/4						5/6				6/4	6/6

Tab. 7: Produktionspläne GLSPMS2VP4EP des Basisszenarios mit Angabe von Produktionsmenge/Produktnummer

Wie erwartet lastet auch RMO die ineffizientere Linie I = 3 relativ gering aus und es kommt nicht zu einer „symmetrischen“ Aufteilung der Lose auf die parallelen Linien. Linienspezifische Produktionszeiten werden demzufolge also berücksichtigt. Trotzdem ist die Produktion auf I = 3 im Vergleich zur GLSPMS-Lösung größer, wodurch höhere Produktionskosten entstehen (Tab 8). Die Reihenfolgeplanung der RMO-Lösung ist wiederum weder kosten- noch zeitoptimal und verursacht verglichen mit jenen von GLSPMS mehr als doppelt so hohe Rüstkosten. Die Gesamtkostenabweichung beträgt, bedingt durch die Überproduktion und die hohe Anzahl an Produktwechsel, ungefähr 192%.

Kosten	GLSPMS	RMO
Produktion	135	177
Rüst	22	49
Lager	0	75
Summe	157	301

Tab. 8 Kostenvergleich GLSPMS2VP4EP des Basisszenarios

In einem neuen Szenario wurden Zwischenproduktbestände zugelassen, wodurch in RMO auf die ungünstige Modellierungstechnik mittels Routings verzichtet werden konnte. Dadurch kam es zu keiner Überproduktion mehr und die Höhe der Lagerkosten konnte gesenkt werden. Ansonsten ließ sich mit RMO jedoch keine Verbesserung erzielen. Linie I = 3 wird auch in diesem Szenario für die Produktion

eingepplant, obwohl dies nicht notwendig wäre und die Anzahl der Umrüstungen ist sogar noch höher, als bei der Modellierung mit Routings (Tab. 9).

GLSPMS

s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
w _s	0	0	14	21	120	162	183	214	240	266	312	336
Linie#1		7/2			18/2	4,25/1	7,75/1	6,5/1	6,5/1	11/1	12/2	6/2
Linie#2			2/5	3/6	6/6	6/5	6/3	6/4	6/4	6/3	6/5	6/60
Linie#3												

RMO

w _z	43			120				240		
Linie#1	2/1	20/2	5/1	17/1	12/2			12/1	12/2	
Linie#2		2/5	2/6	6/3	6/5	4/4	3/6	6/3	6/5	6/4
Linie#3			1/6			2/4	3/6			6/6

Tab. 9 Produktionspläne GLSPMS2VP4EP mit WIP-Beständen

Aus Kostensicht ist der Produktionsplan mit WIP-Beständen jedoch günstiger, weil die Gesamtkostenabweichung zu GLSPMS nur mehr ca. 153% beträgt (Tab. 10).

Kosten	GLSPMS	RMO
Produktion	132	145
Rüst	20	55
Lager	0,5	33
Summe	152,5	233

Tab. 10 Kostenvergleich GLSPMS2VP4EP des Szenarios mit WIP-Beständen

Die Ergebnisse dieses Beispiels haben gezeigt, dass die Modellierung mittels Routings, um Zwischenproduktbestände zu vermeiden, sehr problematisch sein kann. Außerdem scheinen die Kapazitätsgrenzen bei mehrstufigen Modellen bereits noch früher erreicht zu sein, als bei den einstufigen Problemen. Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten, die in diesem Beispiel den Rüstkosten entsprechen, werden vom Solver nicht berücksichtigt. Bei der Lösungsfindung traten keine wesentlichen Laufzeitunterschiede auf. Ohne WIP-Bestände benötigte ILOG 163 Sekunden, mit Zulassen von Zwischenproduktbeständen konnte bereits nach 12 Sekunden eine Lösung gefunden werden. RMO benötigte für beide Szenarien jeweils 7 Sekunden.

5.3.2 Ein dreistufig-konvergierender Produktionsprozess¹¹⁷

Laut Herstellerangabe ist RMO speziell darauf ausgerichtet, für komplexe Stücklisten gute Produktionspläne zu erstellen.¹¹⁸ Am folgenden mehrstufigen

¹¹⁷ siehe Anhang B.VI

¹¹⁸ Peoplesoft (2004), S. 1

Modell soll geprüft werden, ob RMO tatsächlich in der Lage ist, eine sinnvolle Losgrößen- und Reihenfolgeplanung durchzuführen. Das folgende Modell ist aufgrund der geringen Anzahl der Endprodukte kein typischer Fall kontinuierlicher Fließlinienproduktion, sondern eher ein Problem der diskreten Teilefertigung.

Der Produktionsprozess umfasst drei Stufen, fünf Linien, vier Vorprodukte und ein Endprodukt. In der ersten Stufe werden auf zwei parallelen Linien (Linie#1, Linie#1.1) die Vorprodukte VP#1 und VP#2 erzeugt, welche auf der zweiten Produktionsstufe von Linie#2 bzw. Linie#2.1 jeweils in die Vorprodukte VP#3 und VP#4 weiterverarbeitet werden können. Das Endprodukt (EP) setzt sich schlussendlich aus je einer ME VP#3 und VP#4 zusammen und wird auf Linie#3 produziert. Abbildung 40 veranschaulicht den Produktionsprozess für die ineffiziente Linie#1.1 bzw. Linie#2.1. Die Produktionszeiten für Linie#1 und Linie#2 betragen einheitlich 1 ZE/ME.

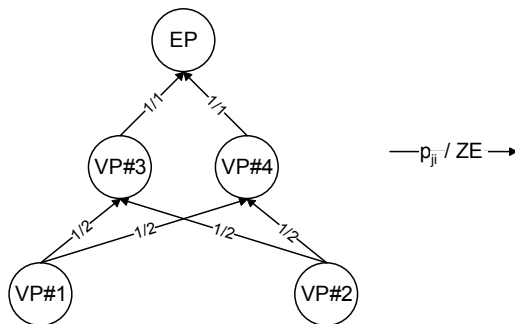


Abb. 40: Gozinthograph GLSPMS4VP1EP

Linie#1.1 und Linie#2.1 sind veraltet, weshalb auf diesen Linien sowohl die Produktion als auch Umrüstungen teuer (100 GE) und zeitaufwändig (2 ZE) sind. Auf den effizienten Linien kosten sämtliche Umrüstungen 50 GE und dauern nur 1 ZE. Auch die Produktionskosten sind auf diesen Linien um eine GE teurer (2 GE/ME) als auf den übrigen Linien. Die Lagerkosten betragen für alle Produkte einheitlich 1 GE. Zwischenbestände sind zugelassen. Der Planungshorizont umfasst drei Perioden mit jeweils einer Kapazität von 100 ZE. In GLSPMS umfasst der Planungshorizont darüber hinaus 16 Mikroperioden, die Bedarfe fallen am Ende der Perioden 5,10 und 15 an.

Am Beginn der Untersuchung wird von einem Bedarf für das Endprodukt in jeder Periode von 10 ME ausgegangen.¹¹⁹ Die gegenüber den Rüstkosten relativ niedrigen Produktionskosten ermöglichen eine problemlose Auslastung der ineffizienten Linien. Im Idealfall bräuchte daher in keiner Periode umgerüstet werden. Würde der gesamte Bedarf der Vorprodukte auf den kostengünstigeren Linien (Linie#1, Linie#2) produziert werden, so käme es auf diesen Linien zu Umrüstungen. Die Kosten, die für diese Umrüstungen anfallen, sind jedoch bedeutend höher als jene Kosten, die bei der Auslastung der teureren Linien entstehen. Der Übersichtlichkeit halber ist in Tabelle 11 jeweils nur die erste Periode

¹¹⁹ Glspsms4i1j_#1/Schedule_101010

der Produktionspläne dargestellt. Die nachfolgenden beiden Perioden unterscheiden sich jedoch sowohl in RMO als auch in GLSPMS kaum in ihrer Produktionsstruktur. In GLSPMS umfasst die erste Periode die Mikroperioden $s = 1$ bis $s = 5$, in RMO die ersten 100 ZE.

GLSPMS

s	1	2	3	4	5
w_s	0	40	40	40	40
Linie#1	10/1				10/1
Linie#1.1	20/2				
Linie#2					10/3
Linie#2.1	10/4				
Linie#3					10/5

RMO

w_z	65									
Linie#1	2/1	4/2	7/1	3/2	2/1	1/2	3/1	2/2	3/1	
Linie#1.1	3/1	10/2								
Linie#2			2/4	3/3	3/4	3/3	1/4			
Linie#2.1		1/3	2/4	2/3	2/4	1/3				
Linie#3										10/5

Tab. 11: Produktionspläne GLSPMS4VP1EP des Basisszenarios, erste Periode mit Angabe von Produktionsmenge/Produktnummer

In GLSPMS wird jeweils der gesamte Bedarf der einzelnen Produkte in einem Los erzeugt, weshalb keine Umrüstungen erforderlich sind. Die Linienzuweisung erfolgt dahingehend, dass jeder Linie ein Produkt zugewiesen wird. Bestände werden von der ersten bis zur vierten Mikroperiode aufgebaut, was jedoch an der Art der Modellierung liegt. Es ist beispielsweise durchaus möglich, dass die gesamte Periodenlänge die Länge einer Mikroperiode aufweist. Dadurch würde man kompaktere Produktionspläne erhalten. Endproduktbestände werden keine aufgebaut, weswegen in diesem Szenario auch keine Lagerkosten anfallen. Die Gesamtkosten der ersten Periode gemäß GLSPMS betragen 100 GE und setzen sich in vollem Umfang aus den Produktionskosten zusammen.

Der Produktionsplan gemäß RMO ist durch häufiges Umrüsten gekennzeichnet. Allein die Rüstkosten der ersten Periode betragen 1150 GE. Insgesamt finden 18 Produktwechsel statt. Die ineffizientere Linie#1.1 wird zwar auf der ersten Produktionsstufe weniger stark ausgelastet, jedoch wird auf ihr einmal umgerüstet, wodurch Rüstkosten in Höhe von 100 GE entstehen. Auf der zweiten Produktionsstufe wird die Linie#2.1 beinahe gleich beansprucht wie die schnellere Linie#2. Dadurch ist diese Produktionsstufe großteils für die hohen Gesamtkosten verantwortlich. Die Produktionskosten sind mit 91 GE geringer als in der GLSPMS-Lösung, weil die ineffizienten Linien weniger stark beansprucht werden. In GLSPMS werden auf diesen Linien 30 ME, also genau die Hälfte des Bedarfs der für die Produktion des Endprodukts notwendig ist, eingeplant. Diese Linienbelegung führt dazu, dass keine Produktwechsel notwendig sind. RMO dagegen plant nur 21 ME

auf den teureren Linien ein, was zwar zu den niedrigeren Produktionskosten führt, jedoch Umrüstungen auf den übrigen Linien erfordert, die wiederum teurer sind. Da auch in RMO kein Lagerbestand aufgebaut wird, können die Lagerkosten vernachlässigt werden. Die Gesamtkosten der ersten Periode belaufen sich auf 1241 GE und sind über zwölfmal höher als jene der GLSPMS-Lösung. Zieht man alle drei Perioden in Betracht, so ändert sich wenig an der Performance von RMO. GLSPMS bietet auch in den Folgeperioden mit Ausnahme der Mikroperiodenzuweisung die exakt gleichen Produktionspläne und daher in allen drei Perioden Gesamtkosten von 100 GE (Tab. 12). Die Gesamtkosten der RMO-Lösung steigen, bedingt durch zusätzliche Umrüstungen, geringfügig an.

Perioden	1	2	3	Summe
GLSPMS	100	100	100	300
RMO	1245	1293	1442	3980

Tab. 12: Kostenvergleich GLSPMS4VP1EP Basisszenario

Hauptverantwortlich für die außergewöhnlich hohen Kosten in RMO sind die häufigen Umrüstungen. Selbst bei günstiger Auslegung der Modellierung konnten in dieser Beziehung nur minimale Verbesserungen erzielt werden. So konnten durch eine manuelle Linienzuweisung der Produkte insgesamt nur eine Kosteneinsparung von 346 GE realisiert werden.

Sieht man von der hohen Kostenabweichung ab, und analysiert die Durchlaufzeiten der Produktionspläne, so wird die Zielsetzung des RMO-Solvers deutlich. Während die Gesamtdurchlaufzeit der ersten Periode in GLSPMS eine Länge von 60 ZE hat, dauert es hingegen in RMO nur 35 ZE bis das Los des Endproduktes hergestellt ist. Die minimale Durchlaufzeit kann in GLSPMS durch Herabsetzen der Mikroperiodenanzahl auf $s=1$ erreicht werden. Sie ist allerdings mit 40 ZE noch immer höher als jene des RMO-Produktionsplans. Dies ist darauf zurückzuführen, dass RMO die schnelleren Linien stärker auslastet und somit die Durchlaufzeit verkürzt. Bei einem Vergleich aller drei Perioden des Ausgangsszenarios ist die Durchlaufzeit des GLSPMS-Produktionsplans gegenüber jener der RMO-Lösung beinahe doppelt so lang (Tab. 13). Selbst wenn die Mikroperiodenanzahl in einem weiteren Szenario (GLSPMS*¹²⁰) auf $s = 4$ herabgesetzt wird, ist die Durchlaufzeit in GLSPMS länger (120 ZE).

Perioden	1	2	3	Summe
GLSPMS	50	80	80	210
GLSPMS*	40	40	40	120
RMO	35	36	43	114

Tab. 13: Vergleich der Durchlaufzeiten. GLSPMS*: $s = 1$ je Periode

Diese Vorgehensweise deutet darauf hin, dass der Solver zeitorientiert vorgeht. Wie bereits in Kapitel 4 gezeigt wurde, versucht RMO langsamere Linien nicht zu beanspruchen und nimmt dafür Umrüstungen in Kauf, ohne die Kosten zu

¹²⁰ Glsps4i1j_#2

berücksichtigen. Die längste zeitliche Beanspruchung einer Linie in der ersten Periode dauert in GLSPMS 40 ZE (Linie#1.1), wogegen in RMO Linie#1.1 nur 28 ZE beansprucht wird. Linie#1 bestimmt mit 35 ZE die gesamte Durchlaufzeit der ersten Periode.

Bei ausreichend vorhandener Produktionskapazität ist die Sinnhaftigkeit dieser Vorgehensweise allerdings in Frage zu stellen, weil die dadurch verursachten Gesamtkosten nicht in Relation zur eingesparten Durchlaufzeit stehen. Aus diesem Grund wurde in weiteren Szenarios das Bedarfsniveau erhöht, um die Ergebnisse bei hoher Auslastung zu vergleichen (Tab. 14). Hierbei wurde festgestellt, dass, falls der Bedarf die Kapazität einer Periode ($s \neq 1$) übersteigt, RMO nicht in der Lage ist, Lagerbestände in den Vorperioden aufzubauen. Erhöht man im Ausgangsszenario den Bedarf der dritten Periode auf 50 ME, wofür mit GLSPMS eine zulässige Lösung gefunden wird, erhält man mit RMO eine Fehlermeldung.¹²¹ Daher wurden die Lagerkosten in diesem Modell vernachlässigt.

Perioden	1	2	3	Summe
Szenario_Basis	10	10	10	30
Szenario#1	10	20	30	60
Szenario#2	20	30	25	75
Szeanrio#3	20	28	30	78

Tab. 14: Periodenbedarfe der Szenarios -_Basis bis -#3 GLSPMS4VP1EP

Anhand dieser vier Szenarien konnte festgestellt werden, dass die Gesamtkosten mit steigender Auslastung zunehmen. Hauptverantwortlich für den Kostenzuwachs sind erneut die Rüstkosten. Bei sukzessiver Erhöhung des Gesamtbedarfs nimmt die Anzahl der Umrüstungen in RMO zu (Abb. 41). Bei einem Bedarfsniveau, das 250% über dem des Ausgangsszenario liegt, haben sich die Rüstkosten bereits verdoppelt.

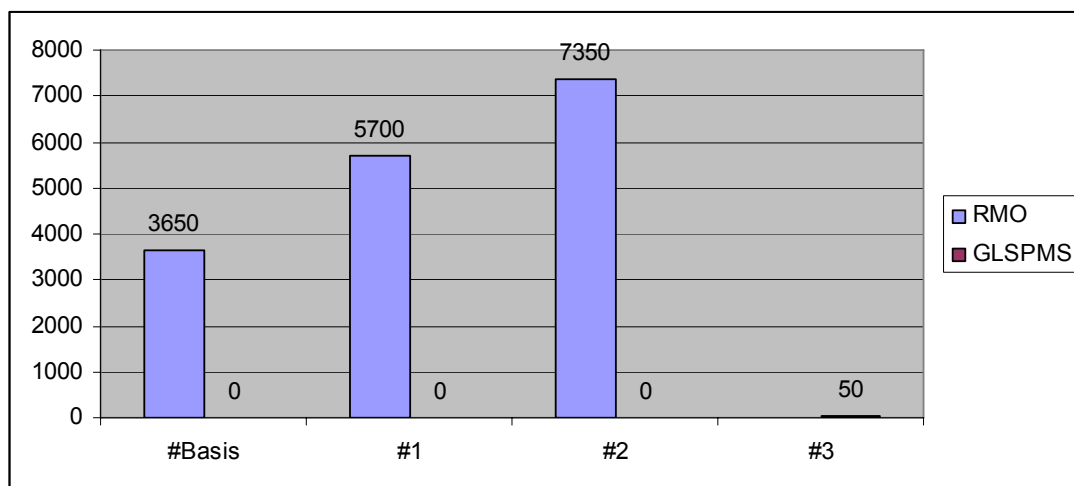


Abb. 41: Rüstkostenvergleich Szenarios-_Basis bis #3 GLSPMS4VP1EP

¹²¹ „Schedule infeasible: Insufficient Resource Capacity Linie#1.1“

Bei den einstufigen Problemen war es so, dass der Solver bei knapper Kapazität „gezwungen“ wurde, bessere Lösungen zu generieren um überhaupt einen gültigen Produktionsplan aufstellen zu können. Auf diese Weise konnten Umrüstungen eingespart werden. Bei diesen mehrstufigen Szenarios neigt RMO zu vermehrten Umrüstungen, wenn das Bedarfsniveau steigt. Im Gegensatz zu den einstufigen Modellen kann der Solver schon bei relativ niedrigen Bedarfsniveaus keinen gültigen Produktionsplan mehr erstellen. So konnten in den geprüften Szenarios dieses Modells nur bis zu einem Bedarfsniveau von 78 ME gültige Lösungen gefunden werden. Mit GLSPMS waren jedoch Lösungen mit einem Bedarf bis 112 ME möglich. In der Praxis müssten daher bei Verwendung von RMO 34 Produktionsaufträge aufgrund eines „scheinbaren“ Kapazitätsmangels abgelehnt werden.

Bei ausreichend vorhandener Produktionskapazität spart der Solver Durchlaufzeit ein, indem er auch die ineffizienteren Linien auslastet. Ist der Unterschied der Durchlaufzeiten im Ausgangsszenario noch relativ groß, so verringert sich dieser Abstand bei steigender Auslastung (Abb. 42). Aufgrund der häufigen Umrüstungen auf den effizienten Linien, können die Zeiteinsparungen auf den langsameren Linien nicht dazu genutzt werden, die Durchlaufzeiten gering zu halten. Die niedrigeren Durchlaufzeiten in RMO stellen daher keinen echten Trade-off zu den hohen Gesamtkosten dar.

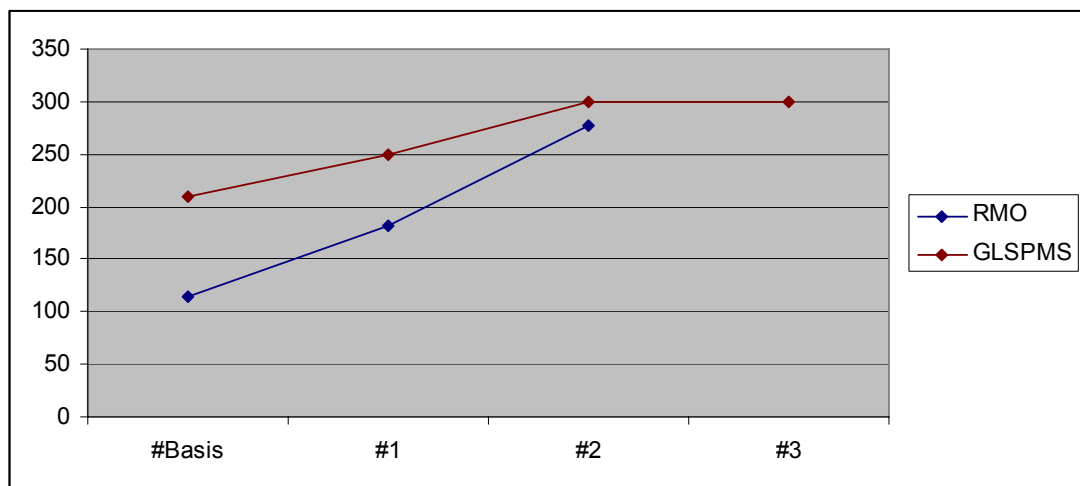


Abb. 42: Vergleich der Durchlaufzeiten Szenarios- #Basis bis #3 GLSPMS4VP1EP

5.3.3 Ein praxisnaher Produktionsprozess¹²²

Das folgende Beispiel ist einem realen Produktionssystem der Konsumgüterindustrie nachempfunden. Es umfasst drei Produktionsstufen mit sechs Vorprodukten und insgesamt neun Endprodukten. Die Endprodukte sind unterschiedlich bedruckte Bleistifte in zwei verschiedenen Härtegraden.

¹²² siehe Anhang B.VII

Auf der ersten Produktionsstufe werden Blätter aus Zedernholz auf einer Herstelllinie $l = 1$ gefräst und mit Graphitminen versehen, woraus Vorprodukte mit weicher Mine ($j = 1$) und solche mit harter Mine ($j = 2$) hervorgehen. Das Einspannen der Minen in die dafür vorgesehen Vorrichtung nimmt 1 ZE Rüstzeit in Anspruch. Sowohl die Rüst-, als auch die Lager- und Produktionskosten dieser Vorprodukte betragen 1 GE. Auf der zweiten Produktionsstufe stehen zwei identische Linien $l = 2$ und $l = 3$ zur Verfügung. Die Holzbretter werden hier verleimt, zusammengepresst und in die für Bleistifte übliche längliche Form geschnitten. Alternativ können die Bretter auf diesen Linien kantig oder abgerundet gefräst werden, so dass aus den Kombinationen weich/rund und hart/kantig die vier Vorprodukte $j = 3, \dots, 6$ resultieren. Die Umrüstungen auf diesen Linien nehmen einheitlich jeweils 1 ZE in Anspruch und verursachen Rüstkosten von $s_{ij} = 1$. Für Zwischenprodukte auf dieser Stufe fallen Lagerkosten in Höhe von 2 GE/ME an. In einem letzten Arbeitsgang werden die Bleistifte auf der dritten Produktionsstufe lackiert und gestempelt. Hierbei stehen drei verschiedene Farben (grau, grün, und rot) zur Auswahl. Es erfolgt allerdings eine Sortierung der Vorprodukte dahingehend, dass nicht jedes Produkt der zweiten Stufe in allen drei Farben erhältlich ist. Insgesamt entstehen somit die neun Endprodukte $j = 7, \dots, 15$, die je nach der korrespondierenden Farben drei Produktgruppen zugewiesen werden können. Die Endprodukte werden auf den parallelen Linien $l = 4$ bzw. $l = 5$ gefertigt. Bedingt durch die unterschiedlichen Reinigungszeiten vor einem Farbwechsel entstehen bei Umrüstungen zwischen den Produktgruppen reihenfolgeabhängige Rüstzeiten. Innerhalb dieser Farbgruppen dauern Umrüstungen lediglich 1 ZE. Die auf Erfahrungswerten basierenden durchschnittlichen Rüstzeiten zwischen den Produktgruppen sind in Tabelle 15 dargestellt.

	grau	grün	rot
grau	1	2	3
grün	2	1	2
rot	3	2	1

Tab. 15: Rüstmatrix GLSPMS_Praxis

Die Höhe der Rüstkosten ist betragsgleich mit der Höhe der Rüstzeiten. Die Produktionskoeffizienten der ersten beiden Produktionsstufen sind mit 0,01 ZE/ME kleiner als jene der dritten Stufe, auf der, bedingt durch den Färbungsprozess, 0,02 ZE/ME einzuplanen sind. Die Direktbedarfskoeffizienten betragen einheitlich für alle Stufen $p_{ji} = 1$. Aufgrund höheren Energieverbrauchs müssen für die Produktion auf den Linien $l = 3$ und $l = 5$ 2 GE an variablen Produktionskosten veranschlagt werden. Die Lagerung der Endprodukte kostet 3 GE/ME, WIP-Bestände sind in eingeschränkter Höhe zulässig.¹²³ Es ist von offener Losweitergabe auszugehen, Transportzeiten zwischen den Produktionsstufen sind nicht vorhanden. Tabelle 16 stellt das Produktions-system in Stücklistenform dar.

¹²³ Zwischenproduktbestände wurden deshalb zugelassen, weil eine Modellierung mittels Routings mit RMO zu keiner sinnvollen Lösung führte.

Produkt	Vorgänger	Direktbedarf	Eigenschaft	Produktionsstufe
j ₁			weich	1
j ₂			hart	1
j ₃	j ₁	1	rund	2
j ₄	j ₂	1	rund	2
j ₅	j ₁	1	kantig	2
j ₆	j ₂	1	kantig	2
j ₇	j ₃	1	grau	3
j ₈	j ₄	1	grau	3
j ₉	j ₅	1	grau	3
j ₁₀	j ₆	1	grün	3
j ₁₁	j ₃	1	grün	3
j ₁₂	j ₄	1	grün	3
j ₁₃	j ₅	1	rot	3
j ₁₄	j ₆	1	rot	3
j ₁₅	j ₃	1	rot	3

Tab. 16: Stückliste GLSPMS_Praxis

Als Planungszeitraum sind 4 Makroperioden mit einer Kapazität von jeweils 100 ZE vorgesehen. Im GLSPMS wurde ein für dieses Beispiel relativ straffes Zeitraster gewählt, das $s = 5$ Mikroperioden je Bedarfsperiode umfasst. Die Bedarfe der Endprodukte sind in den ersten beiden Perioden gering ($d_{j_5} = 50$, $d_{j_{10}} = 100$) und erreichen in den nachfolgenden Perioden mit $d_{j_{15}} = d_{j_{10}} = 500$ die Kapazitätsgrenzen in RMO.

Bei der Modellierung in RMO wurden „logische“ Losgrößen definiert. Hierzu wurden sämtliche Outputmengen, Direktbedarfe und Produktionskoeffizienten der einzelnen Operationen mit dem Faktor 10 multipliziert. Diese Vorgehensweise bei der Wahl der Modellierung hatte zwei Gründe: zum einen sollte mithilfe der „logischen“ Losgrößen häufiges Umrüsten vermieden werden um die Produktionspläne dadurch „stabiler“ zu gestalten. Zum anderen konnte dadurch die Laufzeit drastisch reduziert werden. Des weiteren wurden keine Stillstandzeiten zur Herstellung der Zeitäquivalenz eingegeben. Stattdessen wurden die Zeitpunkte des Bedarfsanfalls so gewählt, dass dazwischen nur die Periodenkapazitäten liegen. Dies geschah, um die Probleme bei der Lösung von Produktionsplänen mit Stillstandzeiten zu vermeiden. Was die Lösbarkeit des Beispiels mit der ILOG-Software betrifft, so ist zu sagen, dass die Grenzen der Lösbarkeit in relativ kurzen Laufzeiten überschritten sind. Da ILOG über 27 Tausend Binärvariablen setzt, konnte in der zur Verfügung stehenden Evaluierungszeit mit keiner vollständigen Optimallösung des Problems gerechnet werden. Deshalb wurde der Lösungsversuch nach 24 Stunden mit Finden einer zulässigen Lösung abgebrochen. Mit RMO betrug die Zeit bis zur Erstellung eines vollständigen Produktionsplans knapp über 13 Minuten. Es ist jedoch vorwegzunehmen, dass ILOG bei vorzeitigem Abbruch bereits nach wenigen Minuten einen besseren Zielfunktionswert und somit niedrigere Gesamtkosten ausgibt als die vollständige RMO-Lösung.

Die von den beiden Solvern erstellten Produktionspläne¹²⁴ unterscheiden sich wesentlich voneinander. Auszugsweise ist jeweils die erste Periode der Pläne

¹²⁴ Glspsms_Praxis/Schedule#1

dargestellt (Tab. 17). Die Losreihenfolge der GLSPMS-Lösung bleibt auch in den nachfolgenden Perioden annähernd unverändert, weil sowohl die Einplanung der Vorprodukte als auch der Endprodukte fast ausschließlich bedarfssynchron erfolgt. Insgesamt wird nur von j_1 in der ersten Periode und von j_5 in der dritten Periode jeweils eine ME vorausproduziert. Dies ist offenbar durch den vorzeitigen Abbruch des Lösungsversuchs bedingt. Ansonsten werden keine Zwischenbestände aufgebaut, obwohl dies u.U. zulässig wäre. Auch innerhalb der Makroperioden werden nur in sehr eingeschränktem Maße Zwischenprodukte vorausproduziert. Teure Produktwechsel zwischen den Produktgruppen „grau“ und „rot“ treten nur zweimal auf. Durchschnittlich muss auf allen Linien je Periode 13-mal für ein anderes Produkt gerüstet werden. Fernerhin vermeidet GLSPMS weitgehend die Produktion auf den teureren Linien. Linie $l = 3$ wird in keiner der Perioden beansprucht und auf Linie $l = 5$ werden um 1149 ME weniger produziert als auf der parallelen Linie $l = 4$.

GLSPMS

s	1	2	3	4	5
w_s	0	87	91	94	97
$l = 1$	250/1		200/2	1/1	
$l = 2$	150/3	100/4		100/5	100/6
$l = 3$					
$l = 4$	50/7	50/12	50/11	50/9	50/10
$l = 5$		50/8	50/15	50/13	50/14

RMO

w_z	51										
$l = 1$	2450/1	2400/2									
$l = 2$	40/6	40/5	20/3	10/4	40/3	30/4	10/6	10/4	10/5	10/3	
$l = 3$	20/6	10/3	50/5	10/3	20/4	40/3	20/6	10/4	10/6	20/4	20/3
$l = 4$	20/9	20/7	30/10	20/7	30/11	30/15	30/14	20/12	20/8	10/7	
$l = 5$	20/13	20/10	20/11	20/13	30/12	30/9	30/8	20/14	10/13	20/15	

Tab. 17: Produktionspläne GLSPMS_Praxis, erste Periode mit Angabe von Produktionsmenge / Produktnummer

Leider konnten in RMO auch durch die Festlegung von „logischen“ Losgrößen keine Rüstkosteneinsparungen erzielt werden. Die Lose der Zwischenprodukte der zweiten Stufe sowie die Lose der Endprodukte werden wiederum auf die parallelen Linien aufgeteilt, wodurch sich die Anzahl der Rüstvorgänge stark erhöht. Durch die Definition von Linienprioritäten sollte RMO eigentlich jene Linien mit der niedrigeren Prioritätszahl als erstes vollständig auslasten, bevor mit der Einplanung der nächsten Linie begonnen wird. Auf diese Weise könnte verhindert werden, dass die Lose auf die Linien aufgeteilt werden und unnötige Umrüstungen verursacht werden. In diesem Modell hatte die Vergabe von Linienprioritäten jedoch keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Obwohl WIP-Bestände zugelassen sind, plant der Solver die Produktionsmengen der zweiten Stufe fast ausschließlich bedarfssynchron ein. Das führt dazu, dass es aufgrund der häufigen Umrüstungen auf den Linien der dritten Stufe, unweigerlich

auch zu ebenso vielen Produktwechsel auf der zweiten Stufe kommt. Der RMO-Lösung kommt allerdings zu Gute, dass die Rüstkosten nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Die Rüstkosten der ersten Periode betragen in RMO 60 GE gegenüber 17 GE in GLSPMS. Während GLSPMS in allen vier Perioden annähernd gleiche Rüstkosten berechnet, schwanken diese in RMO jedoch deutlich. Generell ist festzustellen, dass die Rüstkosten mit der Größe der Produktionsmenge einer Periode korrelieren d.h. je mehr in einer Periode produziert wird, umso häufiger finden Produktwechsel statt. So werden in der dritten Periode Lagerbestände über 2710 ME aufgebaut und gleichzeitig die meisten Umrüstungen aller Perioden durchgeführt (Abb. 43). Diese Vorgehensweise des Solvers bestätigt die im vorhergehenden Beispiel getroffene Annahme, dass bei steigender Auslastung keine Rüstvorgänge eingespart werden können und deutet daraufhin, dass der Solver offenbar Schwierigkeiten bei der Linienkoordination hat.

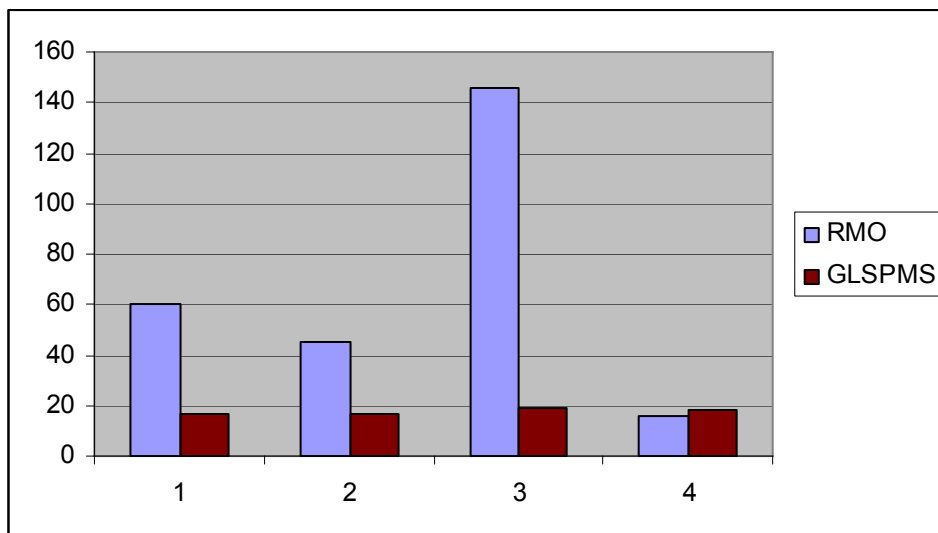


Abb. 43: Rüstkostenvergleich GLSPMS_Praxis der Perioden 1-4

RMO baut bereits in der ersten Periode je 2200 ME an Lagerbeständen der Vorprodukte j_1 bzw. j_2 auf. Diese Bestände können allerdings nicht genutzt werden um Umrüstungen auf Linie $l = 1$ in den nachfolgenden Perioden einzusparen. So wird in weiterer Folge auf der ersten Produktionsstufe in den nachfolgenden Perioden noch insgesamt 18-mal umgerüstet. Die Zwischenprodukte der zweiten Produktionsstufe werden ausschließlich bedarfssynchron produziert d.h. nicht über Periodengrenzen eingelagert. Die im Vergleich zu GLSPMS hohen Lagerbestände, welche Lagerkosten in Höhe von 11110 GE verursachen, sind hauptsächlich für die Gesamtkostenabweichung der RMO-Lösung verantwortlich (Tab.18). Die Abweichung der Produktionskosten von ungefähr 13% entsteht dadurch, dass RMO erwartungsgemäß auch die teuren Produktionslinien $l = 3$ bzw. $l = 5$ annähernd gleich stark auslastet wie die parallelen Linien. Allein in der letzten Makroperiode wird $l = 5$ nicht beansprucht. So liegen die Produktionskosten der ersten Perioden um beinahe dem Vierfachen über jenen der GLSPMS-Lösung. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass die Gesamtkosten gemäß RMO um ca.

45% über jenen der GLSPMS-Lösung liegen. Diese Abweichung hält sich wie bereits angeführt nur deshalb in Grenzen, weil die Rüstkosten einen relativ geringen Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Erhöht man beispielsweise den Anteil der Rüstkosten an den Gesamtkosten, so nimmt klarerweise auch die Rüstkostenabweichung überproportional zu, und die Differenz der Gesamtkosten vergrößert sich.

Kosten	RMO	GLSMS
Prod.	40330	35651
Rüst	267	71
Lager	11110	3
Summe	51707	35725

Tab. 18: Gesamtkostenvergleich GLSPMS_Praxis

Die Aufschlüsselung der Gesamtkosten in den einzelnen Perioden zeigt, dass in GLSPMS die Kosten proportional mit dem Periodenbedarf zunehmen (Abb. 44). Das ist deshalb plausibel, weil es aus Kostengründen nicht notwendig ist, Lagerbestände aufzubauen. Aus diesem Grund sollte sich die Linienzuweisung bzw. Produktionsstruktur in den einzelnen Perioden nicht wesentlich ändern. Die Kostenzuwächse ergeben sich daher nur aus dem Anstieg der Produktionskosten, weil die Höhe der Rüstkosten unabhängig von der Höhe des Periodenbedarfs ist.

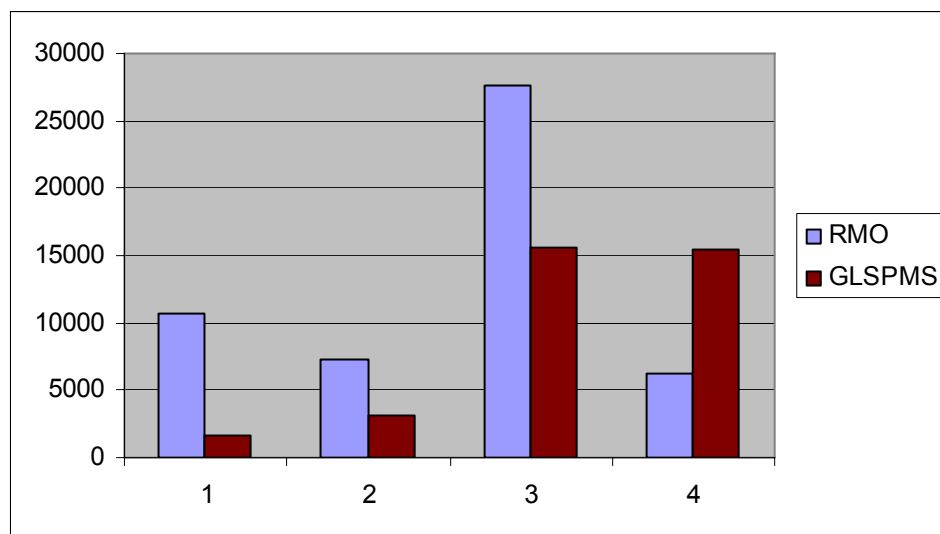


Abb. 44: Gesamtkosten GLSPMS_Praxis in den Perioden 1-4

Aufgrund der Tatsache, dass RMO auch die teureren Linien verstärkt einplant, wäre es folglich möglich, die Durchlaufzeit deutlich zu verkürzen. In der ersten Periode wird dies aber durch die Vorausproduktion von j_1 und j_2 verhindert. Auf der zweiten Produktionsstufe wird erst mit der Produktion begonnen, nachdem das gesamte Los von j_1 eingeplant wurde. Die Durchlaufzeit der ersten Periode beträgt 49 ZE in RMO gegenüber 16 ZE in GLSPMS. In der zweiten Periode können die Bestände aus der ersten Periode zum Teil abgebaut werden, wodurch Linie $l = 1$ kaum beansprucht werden muss. Die Einplanung von Linie $l = 3$ führt dazu, dass die Durchlaufzeit der

zweiten Periode kürzer ist als in GLSPMS (Tab. 19). In den übrigen Perioden kann die Durchlaufzeit wegen der zahlreichen Umrüstungen nicht gering gehalten werden. So nimmt die Produktion in der dritten Periode 99,76 ZE in Anspruch und stößt damit an die Kapazitätsgrenzen.

t	1	2	3	4	Summe
RMO	49	17	100	40	206
GLSPMS	16	19	70	61	166

Tab. 19: Vergleich der Durchlaufzeiten GLSPMS_Praxis (gerundet auf ZE).

Auch in diesem Modell wurde beabsichtigt, das relativ niedrige Bedarfsniveau anzuheben, um eine Aussage über die Lösungsgüte bei hoher Auslastung treffen zu können. In GLSPMS ergab sich ein maximales Bedarfsniveau von 4350 ME.¹²⁵ RMO deklarierte sämtliche Szenarien ab einem Bedarfsniveau von 2351¹²⁶ ME sofort als unlösbar. Unter diesem Wert konnte zwar ein Lösungsversuch gestartet werden, dieser führte jedoch nach mehr als einem Tag Rechenzeit zu keiner Lösung. ILOG konnte für selbiges Bedarfsniveau bereits nach vorzeitigem Abbruch nach 1120 Sekunden einen Plan erstellen, der mit einem Zielfunktionswert von 87857 GE nur um 15% vom Lower Bound¹²⁷ abweicht.

¹²⁵ Bedarfe in den Perioden 1/2/3/4 = 50/100/1000/3200

¹²⁶ Bedarfe in den Perioden 1/2/3/4 = 50/100/1000/1200

¹²⁷ Der Lower Bound ist die Unterschranke der Lösung eines Problems, d.h. der optimale Zielfunktionswert kann diese Grenze nicht unterschreiten.

6 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Einordnung der Untersuchung ergibt sich aus folgenden Überlegungen: bei der Fließlinienproduktion durchlaufen alle Produkte die Produktionslinien in der gleichen Reihenfolge. Hierfür stehen mehrere parallele Produktionslinien zur Verfügung, für die eine möglichst hohe Auslastung angestrebt wird. Umfasst das Produktionssystem mehrere Stufen, so gehen aus einer geringen Anzahl von Vorprodukten zumeist eine hohe Anzahl von Endprodukten hervor. Aufgrund ihrer technologisch bedingten Verwandtheit können diese oft in wenige Produktfamilien unterteilt werden. Für Umrüstungen zwischen den Produkten fallen Rüstzeiten und Rüstkosten, z.B. für Reinigung oder Personal, an. Sind diese unterschiedlich hoch, so muss eine Reihenfolgeplanung getroffen werden, welche die reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten- bzw. Kosten minimiert. Die Bedarfe gehen zumeist nicht über konkrete Kundenaufträge, sondern über Bedarfsprognosen in die Produktionsplanung ein, wodurch es erforderlich sein kann, Lagerbestände aufzubauen. Die Wahl der Größe eines Produktionsloses sollte in der Weise getroffen werden, dass sowohl die gegenläufigen Rüst- bzw. Lagerkosten, als auch die linienabhängigen Produktionskosten minimiert werden. Hierfür gibt es in der Literatur zahlreiche Modelle, die großteils mittels Optimierungsprogrammen umgesetzt werden können. In der Praxis stehen Softwaremodule von APS-Anbietern für die kurzfristig-operative Produktionsplanung zu Verfügung, die bisher nur ungenügend für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung geeignet waren.

Das Ziel dieser Arbeit war es, zu untersuchen, ob der Solver des APS-Moduls PSD 8.10 von Oracle für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei Fließlinienproduktion geeignet ist. Hierzu wurden mehrere, von der Struktur her, praxisrelevante Modelle mit variierenden Komplexitätsgraden erstellt, deren Lösungen in Form von Produktionsplänen aufbereitet wurden. In einer Reihe von Szenarios wurden die Inputdaten der Modelle verändert, um so Rückschlüsse über die Lösungseigenschaften des von PSD verwendeten Solvers RMO ziehen zu können. RMO stellt in PSD eine Alternative zum Standardsolver dar und soll laut Herstellerangaben in der Lage sein, Operationen kontinuierlich einzuplanen, um in Folge dessen Rüstkosten bzw. Rüstzeiten einzusparen. Deshalb wurde die generelle Performance von RMO anhand der vom Standardsolver erstellten Produktionspläne gemessen. Die Eignung des Solvers für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung geht aus dem Ergebnisvergleich mit den von Meyr entwickelten Losgrößenmodellen GLSP bzw. GLSPMS hervor. Die rechnergestützte Umsetzung dieser Modelle erfolgt anhand der Optimierungssoftware OPL-Studio 3.7 von ILOG. Für die Untersuchung stand ein Pentium 4 (2 GHz, 520 MB RAM) mit einem WindowsNT System zur Verfügung.

Die Modellierung in PSD ermöglicht es, komplexe Produktionsprozesse realistisch abzubilden. Die erstellten Produktionspläne bzw. Szenarios lassen sich in verschiedenen Kalenderansichten graphisch darstellen. Auf diese Weise ist es möglich z.B. die zeitliche Beanspruchung von Produktionslinien sowie deren Auslastungsgrad, die Bestandsverläufe der Produkte und die Befriedigung der

Bedarfe zu betrachten. Rüst-, Lager-, und Produktionskosten werden in den KPI ausgewiesen. Diese Kosten werden herangezogen um die Güte der in den Szenarios erstellten Produktionspläne zu messen. Sämtliche Daten können sowohl nach Excel exportiert werden als auch direkt in angeschlossene ERP- bzw. MRP-Systeme gesendet werden.

Die Einflussnahme auf den Lösungsalgorithmus beschränkt sich im Wesentlichen auf die Eingabe von Bedarfsregeln, z.B. ob just-in-time produziert werden soll, und auf die Vergabe von Linienprioritäten. Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe von Funktionen, die als Nebenbedingungen in den Lösungsprozess des Solvers eingehen. Dazu zählen z.B. die Definition von Mindestlosgrößen, die Wahl zwischen der Minimierung von Rüstkosten oder Rüstzeiten, die Definition des Rüstzustandes am Beginn der Periode oder die Veränderung der Makespan-Strategy. Im Laufe der Untersuchung hat sich allerdings herausgestellt, dass diese Einstellungen entweder fehlerhaft sind, oder überhaupt keinen Einfluss auf das Lösungsverhalten des Solvers haben.

In dieser Arbeit wurden sowohl einstufige als auch mehrstufige Probleme modelliert, deren Komplexitätsgrad sukzessive erhöht wurde. Die Ergebnisse der einstufigen Modelle wurden mit denjenigen der allgemeinen Formulierung des GLSP, die mehrstufigen Modelle mit den Ergebnissen des GLSPMS, verglichen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten mussten in PSD einige modellierungstechnische Anpassungsmaßnahmen getroffen werden. So war es notwendig, äquivalente Periodenlängen innerhalb des Planungszeitraums herzustellen. Dies konnte z.B. durch die Eingabe von Stillstandzeiten erreicht werden. Auch die Bewertung der Bestände mit Lagerkosten musste angepasst werden, weil in GLSP Lagerkosten nur für Makroperioden berechnet werden, während in PSD die Lagerkostenabrechnung kontinuierlich erfolgt. Außerdem war es aus verschiedenen Gründen erforderlich, die erstellten Modelle mit der Bedarfsregel JIT zu lösen.

Die Prüfung der generellen Lösungseigenschaften hinsichtlich der Performance von RMO führte zu folgenden Ergebnissen:

- RMO ist nach wie vor hauptsächlich auf Termintreue ausgerichtet, d.h. Kosten werden nicht oder nur ungenügend berücksichtigt. Verbietet man Nachlieferungen, so werden die Bedarfstermine stets eingehalten. Ansätze zu einer Berücksichtigung von Kosten sind durch eine Einstellung zur Minimierung der Rüstkosten zwar vorhanden, jedoch konnte deren Einfluss auf den Lösungsprozess nicht verifiziert werden. Die Berücksichtigung der Produktionskosten ist gegeben, allerdings führt ihre Eingabe bei knappen Kapazitäten zu unlösbaren Plänen.
- RMO kann Operationen im Vergleich zum relativ instabilen Standardsolver zu größeren Produktionslosen zusammenfassen und dadurch Umrüstungen einsparen.
- Sind mehrere parallele Linien vorhanden, so werden die Produktionsmengen gleichmäßig auf alle Linien aufgeteilt, wodurch zusätzliche Umrüstungen erforderlich werden.

- RMO erkennt reihenfolgeabhängige Rüstzeiten und ist in der Lage diese zu minimieren.
- Heterogene parallele Linien, die einen höheren Produktionskoeffizienten aufweisen, d.h. „langsamer“ produzieren, werden so weit als möglich nicht oder nur geringfügig ausgelastet. Diese Vorgehensweise ist ein weiteres Indiz für die zeitliche Ausrichtung des Solvers.
- Die Bedarfsregel für eine vorwärtsorientierte Einlastung der Operationen „PRE“ liefert gegenüber der Bedarfsregel „JIT“ zumeist schlechtere Ergebnisse und kann bei knappen Kapazitäten eine zulässige Lösung verhindern.
- Die Eingabe von Maschinenstillstandzeiten kann bei knappen Kapazitäten zu fehlerhaften Plänen führen, weil RMO in diesem Fall „fiktive“ Umrüstungen vornimmt, die nicht mit Kosten bewertet werden. Die Modellierung mittels Stillstandzeiten ist auf jeden Fall erforderlich, wenn parallele Linien unterschiedliche Produktionskapazitäten aufweisen.

Die Ergebnisse aus dem Vergleich mit GLSP bzw. GLSPMS können wie folgt interpretiert werden:

RMO konnte in keinem der Szenarios einen aus Kostensicht besseren Produktionsplan erzeugen. Dieses Ergebnis ist allerdings für jene Modelle, die mit GLSP optimal gelöst werden konnten, nicht überraschend. Die Qualität der Pläne ist von mehreren Faktoren abhängig, wobei eine starke Unterscheidung zwischen einstufigen und mehrstufigen Problemen getroffen werden muss. Bei einstufigen Modellen konnten bei einer (GLSP-) Linienauslastung zwischen ca. 80% und 90% die besten Pläne erstellt werden. Ein Auslastungsvergleich hat gezeigt, dass die Gesamtkostenzuwächse bei zunehmenden Bedarfsniveaus abnehmen. Dies ist deshalb der Fall, weil es offenbar durch die knappe Kapazität zu einer Einschränkung des Lösungsraums kommt. RMO muss in Folge dessen Rüstzeiten einsparen, um noch eine zulässige Lösung zu erzeugen. Das Lösungsverhalten deutet darauf hin, dass RMO zu früh eine zulässige Lösung akzeptiert und keine weitere Optimierung nach den jeweiligen Kriterien der Nebenbedingungen mehr vornimmt. Dies kann teilweise auf die Eigenschaften des CP zurückgeführt werden. Es ist daher notwendig, den Lösungsraum soweit als möglich einzuschränken um gute Lösungen zu erhalten. Ab einer Auslastung von ca. 90% bis 95% können zumeist keine Pläne mehr erstellt werden. Gibt es also nur mehr wenige zulässige Lösungen, so kann RMO unnötige Umrüstungen nicht einsparen und bricht den Lösungsvorgang vorzeitig ab.

Bei mehrstufigen Modellen hingegen kann RMO oft schon bei relativ niedrigen Bedarfsniveaus bei einem Auslastungsgrad ab ca. 60% bis 75% keinen Produktionsplan mehr erstellen. Diese Eigenschaft kann sich äußerst restriktiv auf die Produktionsplanung auswirken, weil Produktionsaufträge aus „scheinbarem“ Kapazitätsmangel abgelehnt werden müssen. Aufgrund der gleichmäßigen Aufteilung der Lose und der daraus resultierenden zusätzlichen Umrüstungen wird die zur Verfügung stehende Produktionszeit bei mehrstufigen Problemen sehr stark reduziert, wodurch die Kapazitätsgrenzen frühzeitig erreicht sind. Demzufolge sind die Rüstkosten um ein Vielfaches höher als in den GLSPMS-Lösungen. Da mit

steigendem Bedarf die Anzahl der Rüstvorgänge und Rüstzeiten zunimmt, verlängern sich die Durchlaufzeiten dementsprechend. Der Hersteller weist darauf hin, dass PSD speziell für mehrstufige Produktionssysteme mit komplexen Stücklisten geeignet ist. Diese Annahme konnte in der vorliegenden Untersuchung nicht bestätigt werden. Einige Faktoren, wie z.B. die nur einmalige Modellierung von RMO in Routings, deuten darauf hin, dass der Solver für einstufige Produktionssysteme ausgerichtet ist.

Eine weitere Schwäche des Solvers ergibt sich aus dem Umstand, dass häufig zu hohe Lagerbestände aufgebaut werden. Dies geschieht auch dann, wenn es günstiger wäre, bedarfssynchron zu produzieren. Dies führt dazu, dass die von RMO berechneten Lagerkosten relativ zu GLSPMS viel zu hoch sind.

Sind keine WIP-Bestände erlaubt, müssen die Operationen in PSD mittels Routings „verknüpft“ werden. Das Problem dieser Modellierung ist, dass bei unterschiedlichen Produktionskoeffizienten bzw. Direktbedarfen die Linienkoordination zwischen den Produktionsstufen manuell durchgeführt werden muss. Hierzu muss der Output einer Operation genau an den Direktbedarf ihrer Nachfolger-Operation angepasst werden. Bei parallelen Linien müssen die Produktionskoeffizienten angeglichen werden, um die Lösbarkeit zu garantieren. Diese teilweise umständliche Art der Modellierung führte in den meisten Fällen sowohl zu einer Überproduktion als auch zur Verlängerung der Durchlaufzeiten und führt dazu, dass die Kapazitätsgrenzen auch bei relativ niedrigen Bedarfsniveaus rasch erreicht werden.

Im Allgemeinen kann auch bei mehrstufigen Modellen festgehalten werden, dass RMO gültige Lösungen zu schnell akzeptiert. Insgesamt weist RMO keine wesentlichen Laufzeitvorteile gegenüber der ILOG-Software auf. Die Laufzeiten von RMO variierten in dieser Untersuchung je nach Komplexitätsgrad zwischen wenigen Sekunden bis wenige Minuten. In denjenigen Fällen, in denen OPL-Studio erheblich länger bis zum Finden einer Lösung brauchte, war jedoch auch die Lösungsqualität weitaus größer. Die RMO-Heuristik konnte also die schlechtere Lösungsqualität nicht durch Laufzeitvorteile kompensieren.

Abschließend soll noch auf die Frage eingegangen werden, inwieweit die Erwartungshaltungen des Anwenders erfüllt sind und Empfehlungen für die Anwendung gegeben werden:

Die Modellierung in PSD ist unkompliziert. Komplexe Produktionsprozesse können relativ schnell und detailgetreu mit Unterstützung der Datenimportfunktion aus Excel erstellt werden. Die graphische Aufbereitung der Produktionspläne ist leicht nachvollziehbar und mithilfe der cut-and-paste Funktion können die Pläne beliebig nachbearbeitet werden. Es empfiehlt sich, RMO vor allem für einstufige und u.U. einfache, mehrstufige Entscheidungsprobleme unter hoher Auslastung anzuwenden. Aufgrund der schnellen Lösungsgenerierung ist es problemlos möglich, umfassende Szenarioanalysen durchzuführen. Mittels manueller Korrekturen und anschließendem Starten eines repair solves lassen sich leicht fehlerhafte Pläne unkompliziert verbessern.

Für zukünftige PSD- bzw. RMO-Versionen wäre es erforderlich, die Berücksichtigung von Kosten zu verbessern und die fehlerhaften Funktionen zu

korrigieren. Vor allem Rüstzeiten- und -Kosten sollten verstärkt in den Lösungsprozess einbezogen werden, weil die Anzahl der Umrüstungen in den meisten geprüften Szenarios hauptverantwortlich für die Kostenabweichung zu GLSP war. Die Funktion zur Eingabe von Mindestlosgrößen stellt einen ersten Ansatz dar, die häufigen Produktwechsel zu reduzieren.

Literaturverzeichnis

- Brüssau (2002):** Brüssau, K.: Evolutionäre Algorithmen zur simultanen Losgrößen- und Ablaufplanung, Wiesbaden 2002
- Derstroff (1995):** Derstroff, M.: Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsbeschränkungen, Heidelberg 1995
- Domschke (1993):** Domschke, W., Scholl, A. & Voß, S.: Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte, Heidelberg 1993
- Fleischmann (1988):** Fleischmann, B.: Operations-Research-Modelle und -Verfahren in der Produktionsplanung.- Zeitschrift für Betriebswirtschaft 58 (3): S. 347- 372.
- Grünert (1998):** Grünert T.: Multi-level sequence dependent dynamic lotsizing and scheduling, Aachen 1998
- Haase (1994):** Haase K.: Lotsizing and scheduling for production planning, Berlin [u.a.] 1994
- Helber (1994):** Helber S.: Kapazitätsorientierte Losgrößenplanung in PPS-Systemen, Stuttgart [u.a.] 1994
- Kimms (1997):** Kimms, A.: Multi-level lot sizing and scheduling: methods for capacitated, dynamic, and deterministic models; Heidelberg 1997
- Maes/Van Wassenhove (1988):** Maes, j. und Van Wassenhove, L.: Multi-item single-level capacitated dynamic lot-sizing heuristics: A general review, Journal of the Operations Research Society 39. Jg. (1988), Nr. 11, S. 991-1004
- Mauch (2002):** Mauch, K.: Eignung der Scheduling Software J.D. Edwards PSD für die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung, Dipl.-Arbeit, Universität Augsburg 2002
- Meyr (1999):** Meyr, H.: Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für kontinuierliche Produktionslinien – Modelle und Methoden im Rahmen des Supply Chain Management, Wiesbaden 1999
- Meyr (2002):** Meyr H.: Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines, European Journal of Operational Research 139(2), S. 277–292
- Meyr (2004):** Meyr, H.: Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei mehrstufiger kontinuierlicher Fertigung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaftslehre 74. Jg. (2004), Nr. 6, S. 585-610
- Peoplesoft (2004):** Peoplesoft (Hrsg.): Supply Chain Planning: Production Scheduling-Discrete. Version 8.10 PeopleBook. User's Guide, Denver June 2004
- Schneeweiß (1997):** Schneeweiß, C.: Einführung in die Produktionswirtschaft, 6. Aufl., Berlin [u.a.] 1997

Stadtler/Kilger (2005): Stadtler, H. und Kilger, C. (Hrsg.): Supply Chain Management and Advanced Planning - Concepts, Models, Software and Case Studies, Heidelberg 2005

Tempelmeier (1999): Tempelmeier, H.: Material Logistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung und das Supply-chain-Management, 4. Aufl., Berlin [u.a.] 1999

Tempelmeier/Günther (2005): Tempelmeier, H., Günther, H.: Produktion und Logistik (Hauptbd), Berlin [u.a.] 2005

ANHANG

A

A.I

Modell1L3P

Schedule#1RMO:	Basisszenario
Schedule#2RMO Lagerkosten:	Prüfung des Lagerkosteneinfluss
Schedule#2lastop#2:	Definition des Anfangszustandes einer Linie
Schedule#2RMORüstkosten:	Prüfung des Rüstkosteneinfluss

A.II

Modell1VP1EP

Schedule#1:	Basisszenario für parallele Linien
Schedule#1RMO:	Schedule#1 mit RMO
Schedule#1PRE:	Schedule#1 mit build strategy PRE
Schedule#1PRERMOM:	Schedule#1RMO mit build strategy PRE
Schedule#2:	unterschiedliche Direktbedarfe
Schedule#2RMO:	Schedule#2 mit RMO

A.III

Modell2VP1EP

Schedule#1:	Basisszenario für reihenfolgeabhängige Rüstzeiten
Schedule#1*	knappe Kapazität um Rüstoptimum zu "erzwingen"
Schedule#1RMO:	Schedule#1 mit RMO
Schedule#1RMO*:	Schedule#1* mit RMO
Schedule#2:	vertauschte Rüstzeiten
Schedule#2RMO:	Schedule#2 mit RMO
Schedule#3:	veränderte Operationslänge (1h), erweiterter Horizont (1w)

A.IV

Modell2VP2EP

Schedule#1:	Parallele Linien, Bedarfserhöhung
Schedule#2:	knappe Kapazität
Schedule#1RMO:	Schedule#1 mit RMO
Schedule#3:	Basisszenario
Schedule#3RMO:	Schedule#3 mit RMO
Schedule#4:	Vergabe von Linienprioritäten
Schedule#4RMO:	Schedule#4 mit RMO
Schedule#5:	Prüfung der build strategy PRE
Schedule#5RMO:	Schedule#5 mit RMO

A.V

Modell Kostenabrechnung

Schedule#1:	Lagerkostenabrechnung
Schedule#2:	Lagerkostenabrechnung bei unterschiedliche Produktionskoeffizienten
Schedule#3	unterschiedliche Bedarfszeitpunkte

B

B.I

GLSP113j2t

Glsp113j2t_#1 / Schedule#1:	Basisszenario
Glsp113j2t_#2 / Schedule#2:	verändertes Bedarfsniveau
Glsp113j2t_#3 / Schedule#3:	verändertes Bedarfsniveau

B.II

GLSP114j1t

Glsp114j1t_#1 / Schedule#4:	Basisszenario
Glsp114j1t_#2 / Schedule#5:	optimale Rüstreihenfolge
Glsp114j1t_#3 / Schedule#6:	verändertes Bedarfsniveau

B.III

GLSP214j3t

Glsp214j3t_#1 / Schedule#1:	Basisszenario, 95% Auslastung
Glsp214j3t_#2 / Schedule#2:	veränderter Bedarf, 13% Auslastung
AV25% / ScheduleAV25%:	25% Auslastung
AV33% / ScheduleAV33%:	33% Auslastung
AV50% / ScheduleAV50%:	50% Auslastung
AV70% / ScheduleAV70%:	70% Auslastung
AV85% / ScheduleAV85%:	85% Auslastung
Glsp216j4t / Schedule216j4t:	unterschiedl. Linienkapazität
Schedule_bug#1:	Rüstkostenbug

B.IV

GLSPMS1VP2EP

Glspms1i2j_#1 / Schedule#1:	Basisszenario für mehrstufigen Produktionsprozess
Schedule_prodcost:	Prüfung des Produktionskosteneinfluss
Schedule_bug#2:	Produktionskostenbug
Schedule_LK:	logische Losgröße bei der Linienkoordination

B.V

GLSPMS2VP4EP

Glsrms2i4j	Originalproblem
Glsrms2i4j_#1 / Schedule#1:	Basisszenario
Glsrms2i4j_#2 / Schedule#2:	Basisszenario mit WIP-Beständen
Schedule#3:	max. Bedarf mit WIP

B.VI

GLSPMS4VP1EP

Szenario_Basis/ Schedule_101010:	Basisszenario
Szenario#1 / Schedule_102030:	verändertes Bedarfsniveau
Szenario#2 / Schedule_203025:	verändertes Bedarfsniveau
Szenario#3 / Schedule_202830:	verändertes Bedarfsniveau
Glsrms4i1j_#2	Verringerung der Mikroperiodenanzahl

B.VII

GLSPMS Praxis

Glsrms_Praxis / Schedule#1:	Basisszenario
Schedule#2:	dt1234: 50/100/1000/1000
Schedule#3:	max. Bedarf bei 1200 in den letzten beiden Perioden