



DIPLOMARBEIT

Simulation in der  
Produktionsplanung und -steuerung  
an einem Beispiel der Lasselsberger, a.s.

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Felix Breitenecker  
und  
Shabnam Michele Tauböck

Institut für Analysis und Scientific Computing  
E101

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Andreas Prankl  
Matrikelnummer: 0226112  
Krübling 7  
A-3250 Wieselburg

---

Ort, Datum

---

Unterschrift (Verfasser)

# Zusammenfassung

Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) beschäftigt sich mit der Lösung von Entscheidungsproblemen im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Ressourcen, Bedarf und absetzbaren Produkten. Hierfür stehen eine Vielzahl von Modellen, Konzepten und Methoden zur Verfügung, deren Anwendung im Wesentlichen von der Produktion und dem Betriebstyp abhängen. Lasselsberger, a.s. ist in der Branche der Herstellung und des Vertriebs keramischer Verkleidungen tätig. Das über 3.000 Varianten umfassende Produktsortiment reicht von weißen Standardfliesen, über Serien für den Wohn- sowie den Architekturbereich, bis hin zu speziellen Dekorfliesen. Der Betriebstyp entspricht einem Großserien- und Massenfertiger. Der Primärbedarf wird in Linienproduktion gefertigt. Die Produktionsplanung erfolgt nach dem MRPII-Konzept. Die Herausforderung der Planung besteht in der Festlegung der Produktionsreihenfolge und -menge von Fliesen mit der Bedingung, Fehlbestände zu vermeiden und die vorhandenen Kapazitäten möglichst gut auszulasten.

Mit dem Zweck, grundsätzliche Erkenntnisse über die Abbildung der Produktionsplanung, der Produktion und des Vertriebs zu erhalten, sowie zur Beurteilung von Planungsstrategien wurde ein Konzept zur Simulation entwickelt. Das konzeptionelle Modell beschränkt sich auf die Planung, die Produktion und den Vertrieb des Primärbedarfs von Wandfliesen auf einer Produktionslinie. Da die Herstellung der Produkte im Realsystem auf mehreren Linien möglich ist, wurde eigens ein Produktportfolio zusammengestellt, das auf den Absatzzahlen des Jahres 2007 beruht. Die Implementierung des Konzepts erfolgte in einem Simulationsmodell des Softwarepakets Enterprise Dynamics. Die Validierung lässt grundsätzlich auf ein verhaltensgültiges Modell schließen. Quantitativ mussten jedoch Abweichungen zum Realsystem festgestellt werden. Gründe hierfür können in den durch Schätzung approximierten Daten der Rüstzeit, den strukturellen Abstraktionen oder einem Produktportfolio, das mit realen Verhältnissen nur unzureichend vergleichbar ist, liegen.

Mit dem verhaltensgültigen Simulationsmodell wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Die erste beinhaltet die Untersuchung der Gewichtung von Lagerreichweite und Reservierungen als Parameter der Reihenfolgeplanung. In Versuchsreihe 2 wurde mit unterschiedlichen Strategien und Taktiken der Mengenplanung experimentiert. Im Zuge der dritten Versuchsreihe wurden die Auswirkungen der Variation des Initiallagerstandes auf Fehlmengen und Lagerreichweite untersucht.

Die Beobachtung von Fehlmengen, Lagerreichweite und Bestand einzelner Produkte lässt darauf schließen, dass die Eignung von Lagerreichweite und Reservierungen zur Reihenfolgeplanung nicht für alle Produkte gleich gut ist. Artikel mit regelmäßigem und hohem Bedarf werden häufig produziert. Produkte mit seltenem oder regelmäßigem, jedoch sehr niedrigem Lagerabgang finden kaum Berücksichtigung in der Produktionsplanung und verursachen daher hohe Fehlbestände. Es zeigen sich je nach Produkt Produktionszyklen von wenigen Wochen bis hin zu Produkten, die nur noch einmalig in zwei Jahren hergestellt werden.

Für ein quantitativ aussagekräftigeres Simulationsmodell ist eine detaillierte Erhebung der Rüst-, Bedien- und Ausfallzeiten erforderlich. Eine weitere Herausforderung stellt die Abbildung des Planers im Simulationsmodell dar. Einfache Sortier- und Mengenplanungsalgorithmen eignen sich nur unzureichend für den automatischen Einsatz in der Produktionsplanung. Der Planer ist in der Lage, Informationen in der Planung zu berücksichtigen, die in elektronischer Form nicht vorliegen oder nur mit großem Aufwand ermittelt und quantifiziert werden können (z.B. Marketingoffensiven). Trotz des Aufwandes und der Herausforderungen zeigt die Simulation interessante Perspektiven und Möglichkeiten für den Einsatz in der PPS von Lasselsberger, a.s. auf.

# Abstract

The aim of production planning and control is to solve decision-making problems as far as the allocation of resources and requirements is concerned. A multitude of models, concepts and methods are available depending on the type of production shop. Lasselsberger, a.s. is part of the sector of manufacturing and distribution of ceramic tiles. The assortment includes more than 3.000 types of products from ordinary white wall tiles, series in the area of living as well as the area of architecture to special decorations. The products are manufactured in long run work on production lines. The production planning is based on the concept of MRPII. The challenge of production planning is to find the right sequence and lot size of the products by simultaneously minimizing stockouts and downtimes.

With the intended purpose of obtaining fundamental knowledge on modelling production planning, production and sales and of evaluating strategies of production planning, a simulation concept has been developed. The conceptual model is limited to planning, production and sales of wall tiles produced on one production line. It is though possible to manufacture the same product on different lines. For that reason a product portfolio was compiled based on the sales of the year 2007. The concept has been implemented with the help of the Enterprise Dynamics software. Basically the validation of the model showed the expected behavior, but the quantitative results deviate from the real system. Reasons might be the changeover times which are determined by approximation, the structural abstractions of the model or a product portfolio which is not comparable to reality.

Three experiments have been conducted with the qualitative valid simulation model. The first one examines the weight of stock turnover and reservations as parameters of the sequencing process. In the second test run different strategies and tactics of lot sizing have been investigated. In the third one the focus lay on the impact of initial stock variations on the system dynamics.

Due to the characteristics of stock, stockouts and stock turnover of individual products the exclusive use of parameters stock turnover and reservations are not applicable for sequencing of all products with the same quality. Products with regular and high sales are manufactured frequently. Products with rare sales or regular and low sales are hardly considered in production planning and result in high stockouts. There are products with production cycles of a few weeks and others which are produced only once in two years.

For a more significant quantitative simulation model an inquiry of changeover time, service time and downtime is necessary. A further challenge is the implementation of the planner in the simulation model. Simple algorithms of sorting products and determining the lot size are insufficient for an automated application in production planning. The planner is able to process information which are not available by digital or only with big efforts (for example marketing campaigns). Despite the complexity and the great challenges of the simulation stated there are interesting prospects and possibilities for the application in production planning and control of Lasselsberger, a.s.

# Shrnutí

Plánování a řízení výroby se zabývá řešením rozhodovacích problémů v souvislosti s přípravou zdrojů, poptávky a výrobků pro prodej. Za tímto účelem byla vyvinuta řada modelů, pojmů a metod, které jsou využívány v závislosti na produkci a typu firmy. Lasselsberger, a.s. podniká v oboru výroby a prodeje keramických obkládů. Sortiment výrobků, který čítá na 3.000 druhů, sahá od standardních bílých obkládaček a dlaždic přes série v oblasti bytové a objektové keramiky, až ke speciálním dekoračním a funkčním doplňkům. Typ firmy odpovídá velkosériovému a hromadnému výrobcí. Primární poptávka je produkována sériovou výrobou. Plánování výroby se uskutečňuje podle koncepce MRPII. Obtížnost plánování spočívá hlavně v rozhodování o pořadí a velikostech výrobních dávek. Přitom je podmínkou předcházet jakostním problémům a využívat co nejlépe kapacity, které jsou k dispozici.

Za účelem získání základních poznatků o zobrazení plánované výroby, dále o zobrazení výroby a prodeje, stejně jako k posouzení plánovacích strategií byl vyvinut koncept simulace. Koncepční model se omezuje na plánování výroby a prodeje obkládů vyráběných na jedné výrobní lince. Protože v reálném systému je možná výroba produktů na více linkách, bylo k našim účelům sestaveno výrobní portfolio, které spočívá na údajích prodeje z roku 2007. Implementování konceptu bylo realizováno v simulačním modelu softwarového balíčku Enterprise Dynamics. Výsledky v zásadě umožňují usuzovat, že se jedná o funkční model. Kvalitativně jsme ale museli zjistit odchylky od reálného systému. Je možné, že to bylo buď z důvodu aproximovaných dat připraveného období, strukturálních abstrakcí nebo výrobním portfolioem, které není dostatečně srovnatelné s reálnými poměry.

Se simulačním modelem byly provedeny tři řady pokusů. První obsahuje výzkum vyvažování dosahu skladu a rezervace jako parametru plánování postupu. Ve druhé řadě byly prováděny pokusy s různými strategiemi a taktikami množstevního plánování. V průběhu třetí řady pokusů byly předmětem pozorování účinky variace původního stavu zásob ve skladi na chybějící množství a dosah skladu.

Pozorováním chybějícího množství a dosahu skladu jednotlivých produktů nám umožňuje usuzovat, že tento systém není do stejné míry vhodný pro všechny výrobky. Výrobky s pravidelným a vysokým odbytem jsou vyráběny často, naopak výrobky s nepravidelným nebo malým prodejem nejsou téměř zohledňovány v plánování výroby a následně u nich dochází k výpadkům v disponibilitě. Podle druhu výrobku dochází k cyklům výroby od několika týdnů až k výrobkům, které se vyrábějí jen jednou za dva roky.

Pro simulační model, který má větší kvantitativní vypovídací hodnotu, je nezbytná detailní specifikace časů přípravy, obsluhy a výpadků výroby. Další obtíž představuje znázornění plánovače v simulačním modelu. Jednoduchý algoritmus třídění výrobků a rozhodování o výrobní dávce není dostatečný pro automatickou aplikaci v plánování výroby. Koordinátor je schopen zohledňovat v plánu i informace, které nejsou standardně v elektronické formě k dispozici nebo mohou být pouze obtížně zprostředkovány a kvantifikovány (např. důsledky marketingových kampaní). Navzdory námaze a obtížnosti ukazuje simulace zajímavé perspektivy a možnosti pro uplatnění v plánování výroby a prodeje firmy Lasselsberger, a.s.

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich auf meinem Studienweg begleitet haben. Allen voran bedanke ich mich bei Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Felix Breitenecker und Shabnam Tauböck für die ausgezeichnete Betreuung, den Rat und die Hilfestellung während meiner Diplomarbeit. Den Mitarbeitern und Kollegen des Instituts für Analysis und Scientific Computing sei gedankt für das angenehme Arbeitsklima und die anregenden Diskussionen.

Mein Dank gilt der Firma Lasselsberger, die das Thema meiner Diplomarbeit zur Verfügung stellte. Ich möchte mich bei Herrn Pavel Vokáč für seine Zeit und sein Wissen bedanken, das er in meine Arbeit investierte. Ein Dankeschön auch Herrn Mag. Georg Reich für seine Unterstützung. Insbesondere möchte ich mich bei Mag. Walter Riess bedanken für sein jahrelanges Vertrauen und die Motivation durch die interessanten Projekte, an denen ich mitarbeiten durfte.

Weiters bedanke ich mich bei Mag. Kathrin Schiefer sowie Dr. Thomas Steiner und Christine Braunsteiner, die in speziellen Bereichen Hilfestellung leisteten. Meinen Verwandten, Freunden und Kollegen sei gedankt für alle fachlichen oder auch fachfremden Anregungen und Gespräche sowie für die moralische Unterstützung.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie danken, meinen Eltern Johann und Maria Prankl, meinen Brüdern Hannes und Peter, meiner Schwägerin Michaela sowie meinem Neffen Matthias. Herzlichen Dank für den Rückhalt, den ihr mir gegeben und die Möglichkeiten, die ihr mir eröffnet habt. Euch sei diese Arbeit gewidmet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Aufgabenstellung . . . . .	1
1.3 Unternehmensprofil . . . . .	2
<b>2 Grundlagen der betrieblichen Planung</b>	<b>4</b>
2.1 Der Begriff der Planung . . . . .	4
2.2 Inhalt der betrieblichen Planung . . . . .	4
2.3 Reichweite . . . . .	5
2.3.1 Strategische (langfristige) Planung . . . . .	6
2.3.2 Taktische (mittelfristige) Planung . . . . .	6
2.3.3 Operative (kurzfristige) Planung . . . . .	7
2.4 Interdependenzen . . . . .	7
2.4.1 Total- und Partialmodell . . . . .	7
2.4.2 Simultan- und Sukzessivplanung . . . . .	8
2.4.3 Hierarchische Modelle . . . . .	9
2.5 Anpassung an Datenveränderungen . . . . .	9
2.5.1 Rollierende Planung, Anschlussplanung und ereignisorientierte Planung . . . . .	9
2.5.2 Neuaufwurf und Net-Change . . . . .	11
<b>3 Produktion</b>	<b>12</b>
3.1 Produkt- und Produktionsprogrammtypen . . . . .	12
3.1.1 Produkteigenschaften . . . . .	12
3.1.2 Produktionsprogrammeigenschaften . . . . .	14
3.2 Produktionsfaktortypen . . . . .	15
3.3 Produktionsprozesstypen . . . . .	15
<b>4 Produktionsplanung und -steuerung</b>	<b>18</b>
4.1 Ziele der Produktionsplanung und -steuerung . . . . .	18
4.2 Das Aachener PPS-Modell und seine Erweiterungen . . . . .	18
4.3 Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung . . . . .	21
4.3.1 Absatz- und Produktionsprogrammplanung . . . . .	21
4.3.2 Materialwirtschaft . . . . .	22
4.3.3 Zeitwirtschaft . . . . .	24
4.3.4 Produktionssteuerung . . . . .	26

4.4	Konzepte . . . . .	26
4.4.1	Organisationsformen . . . . .	26
4.4.2	Umfassende Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung . . . . .	27
4.4.3	Spezielle Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Modellbildung und Simulation</b>	<b>31</b>
5.1	Grundlagen . . . . .	31
5.1.1	Begriffe und Inhalt . . . . .	31
5.1.2	Methoden der Simulation . . . . .	33
5.2	Aufbau einer Simulationsstudie . . . . .	35
5.3	Simulationssoftware . . . . .	40
5.3.1	Klassifikation der Simulationsinstrumente . . . . .	40
5.3.2	Incontrol Enterprise Dynamics . . . . .	41
5.4	Einsatzmöglichkeiten in der Produktionsplanung und -steuerung . . . . .	45
5.4.1	Unternehmensplanung . . . . .	46
5.4.2	Layoutplanung . . . . .	46
5.4.3	Materialflussplanung . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Produktionsplanung und -steuerung bei Lasselsberger, a.s.</b>	<b>48</b>
6.1	Betriebstyp der Lasselsberger, a.s. . . . .	48
6.2	Strategische Planung . . . . .	48
6.3	Taktische Planung . . . . .	50
6.4	Operative Planung und Steuerung . . . . .	50
<b>7</b>	<b>Simulationsstudie der PPS bei Lasselsberger, a.s.</b>	<b>52</b>
7.1	Problemdefinition und Ziele . . . . .	52
7.2	System . . . . .	53
7.2.1	Produkt: Fliese . . . . .	53
7.2.2	Produktionsplanung . . . . .	55
7.2.3	Produktion von Wand- und Bodenfliesen . . . . .	58
7.2.4	Lagerung und Kommissionierung . . . . .	61
7.2.5	Vertrieb . . . . .	61
7.3	Konzept . . . . .	63
7.3.1	Produktionsplanung . . . . .	63
7.3.2	Produktion . . . . .	63
7.3.3	Lagerung und Vertrieb . . . . .	66
7.4	Simulationsmodell - Implementierung in Enterprise Dynamics . . . . .	67
7.4.1	Modellinitialisierung . . . . .	68
7.4.2	Produktionsplanung . . . . .	68
7.4.3	Produktion . . . . .	70
7.4.4	Lagerung und Vertrieb . . . . .	73
7.4.5	Benutzeroberfläche: Fliesenproduktion . . . . .	74
7.5	Verifikation und Validierung . . . . .	75
7.5.1	Verifikation . . . . .	75
7.5.2	Validierung . . . . .	77
7.6	Versuchsplanung . . . . .	79
<b>8</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>81</b>

8.1	Versuchsreihe 1: Gewichtung der Planungskennzahlen . . . . .	81
8.2	Versuchsreihe 2: Strategien der Mengenplanung . . . . .	82
8.3	Versuchsreihe 3: Einfluss des Initiallagerstandes . . . . .	83
8.4	Einzelbetrachtungen . . . . .	84
<b>9</b>	<b>Resümee</b>	<b>85</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>87</b>
A.1	Weitere Prozesse . . . . .	87
A.1.1	Produktionsprozess von Dekorfliesen . . . . .	87
A.1.2	Produktionsprozess von Reliefbordüren . . . . .	88
A.2	Produktportfolio und Planungsparameter . . . . .	91
A.3	Schätzung der Rüstzeiten . . . . .	95
A.4	Modellauszüge des Simulationsmodells . . . . .	97
A.5	Beschreibung der Methode IDEF0 . . . . .	103
A.6	Beschreibung der ABC-Analyse . . . . .	103

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Der betriebliche Kreislauf . . . . .	5
2.2	Sukzessivplanung . . . . .	8
2.3	Hierarchische Planung . . . . .	10
2.4	Prinzipien der Planung: a rollierende Planung, b Anschlussplanung, c ereignisorientierte Planung . . . . .	11
3.1	Produktion als Throughput-Prozess . . . . .	12
3.2	Darstellung der Betriebstypologie mittels morphologischen Kastens . . . . .	13
4.1	Struktur der Aufgabenreferenzsicht . . . . .	20
4.2	a) Synchronisation und b) Emanzipation von Produktion und Nachfrage . . . . .	22
4.3	Struktur des MRPII-Konzepts . . . . .	29
4.4	MRP-Ablauf . . . . .	29
5.1	Schematischer Ablauf diskreter ereignisorientierter Simulation . . . . .	35
5.2	Durchführung einer Simulationsstudie . . . . .	36
5.3	Oberfläche von Incontrol Enterprise Dynamics . . . . .	42
5.4	Einfaches Warteschlangenmodell: Quelle-Warteschlange-Bedienstation-Senke . . . . .	43
5.5	Atom-Editor . . . . .	44
5.6	Einfaches Warteschlangenmodell mit Monitor und Optionen . . . . .	45
6.1	Charakterisierung des Betriebstyps der Lasselsberger, a.s. mittels morphologischen Kastens . . . . .	49
7.1	Systemdiagramm der Teilsysteme Produktionsplanung, Produktion, Lagerung und Kommissionierung und Vertrieb der Lasselsberger, a.s. . . . .	54
7.2	Prozessdiagramm Produktionsplanung . . . . .	57
7.3	Prozessdiagramm einer Standardboden- oder -wandfliese . . . . .	59
7.4	Globale Absatzcharakteristik des Sortiments von Lasselsberger, a.s. . . . .	61
7.5	Typischer Absatz von Produkten ohne saisonalen Effekt (a) und mit saisonalem Effekt (b) . . . . .	62
7.6	Grafische Darstellung des Modellkonzeptes . . . . .	64
7.7	Steuerdiagramm des Rüstvorganges . . . . .	66
7.8	Simulationsmodell in Enterprise Dynamics . . . . .	69
7.9	Atome <i>Availability Control</i> und <i>Time Schedule Availability</i> . . . . .	72
7.10	Benutzeroberfläche: Fliesenproduktion . . . . .	75
7.11	Simulationslauf Validierung: Gesamtlagerstand über die Zeit . . . . .	78
7.12	Simulationslauf Validierung: Lagerreichweite über die Zeit . . . . .	78
8.1	Versuchsreihe 1; Fehlmengen über Klassenweite der Lagerreichweite . . . . .	81

8.2	Versuchsreihe 2: Fehlmengen (a) und Lagerreichweite (b) der Simulationsläufe 1-6 . . . . .	82
8.3	Versuchsreihe 2: Auslastung des Ofens der Simulationsläufe 1-6 . . . . .	83
8.4	Versuchsreihe 3: Fehlmengen (a) und Lagerreichweite (b) über den Initiallagerstand . . . . .	83
8.5	Verlauf des Lagerbestandes . . . . .	84
A.1	Prozessdiagramm einer Dekorfliese . . . . .	89
A.2	Prozessdiagramm einer Reliefbordüre . . . . .	90
A.3	Lorenzkurve der Pareto-Klassifikation des modellierten Produktportfolios . . . . .	91
A.4	Farbklassifizierung für Wandfliesen . . . . .	96
A.5	Planungsablauf im Simulationsmodell . . . . .	98
A.6	Steuerung der Presse . . . . .	99
A.7	Steuerung des Rüstvorgangs der Rüstgruppe 1 . . . . .	101
A.8	Steuerung des Rüstvorgangs der Rüstgruppe 2 . . . . .	102
A.9	Modellierungskonzept IDEF0 . . . . .	103

# Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht der outputbezogenen Produkttypen . . . . .	14
3.2	Übersicht der outputbezogenen Produktionsprogrammtypen . . . . .	15
3.3	Übersicht der faktorbezogenen Produktionstypen . . . . .	16
3.4	Übersicht der produktionsprozessbezogenen Produktionstypen . . . . .	17
5.1	Modellklassifikation . . . . .	32
5.2	Auszug der erforderlichen Daten für eine Simulationsstudie . . . . .	37
5.3	Klassifikation von Simulationsinstrumenten . . . . .	40
5.4	Einsatzgebiete der Materialflusssimulation . . . . .	47
7.1	Klassifizierung der Produkte nach der Verfügbarkeitsgarantie . . . . .	55
7.2	Produktkodierung der Lasselsberger, a.s. . . . .	55
7.3	Beschreibung der Materialgruppe . . . . .	56
7.4	Ofenkapazität Rako 3 im Jahr 2007 . . . . .	60
7.5	Produktionsplanungsparameter . . . . .	65
7.6	Servicezeiten der Anlagen der Produktionslinie . . . . .	65
7.7	Zeiträume der Verfügbarkeitsgarantie . . . . .	67
7.8	Tabellen des Simulationsmodells . . . . .	68
7.9	Richtsätze für geplante Produktionsmengen . . . . .	74
7.10	Verifikation des Rüstprozesses . . . . .	76
7.11	Verifikation des Simulationsmodells; Teil 1 . . . . .	76
7.12	Verifikation des Simulationsmodells; Teil 2 . . . . .	76
7.13	Verhaltensvalidierung durch Variation der Produktionsmenge je Los . . . . .	77
7.14	Versuchsplan . . . . .	80
A.1	Produktportfolio-Planungsparameter 1 . . . . .	92
A.2	Schema zum Schätzen der Rüstzeiten . . . . .	95
A.3	Rüstzeit aufgrund Änderung des Produktformats . . . . .	95
A.4	Rüstzeit der Glasuranlage aufgrund Änderung der Produktfarbgruppe . . . . .	96
A.5	Rüstzeit des Ofens aufgrund Änderung der Produktoberfläche . . . . .	96
A.6	Rüstzeit der Presse aufgrund Änderung der Produktstruktur . . . . .	97

# Abkürzungen

ATO	Assembly-To-Order
BoM	Bill of Materials
DDE	Dynamic Data Exchange
DESS	Differential Equation System Specification
DEVS	Discrete Event System Specification
DTSS	Discrete Time System Specification
ED	Enterprise Dynamics
ERP	Enterprise Resource Planning
ETO	Engineer-To-Order
FIFO	First-In-First-Out
FIR	Forschungsinstitut für Rationalisierung
FTS	fahrerloses Transportsystem
GRB	Größte Restbearbeitungszeit
GUI	Graphical User Interface
IDEF0	Integration Definition for Function Modelling
JiT	Just-in-Time
KOZ	Kürzeste Operationszeit
KRB	Kleinste Restbearbeitungszeit
LOZ	Längste Operationszeit
MPS	Master Production Schedule
MRP	Material Requirements Planning
MRPII	Manufacturing Resource Planning
MS	Microsoft
MTO	Make-To-Order
MTS	Make-To-Stock
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PTO	Package-To-Order
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

# 1 Einleitung

Vorliegende Arbeit dient als Abschlussarbeit des Studiums Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau der Technischen Universität Wien. Das Thema der Simulation in der Produktionsplanung und -steuerung wurde vom Unternehmen Lasselsberger, a.s., einem Mitglied der Lasselsberger Gruppe, zur Verfügung gestellt.

## 1.1 Motivation

Der Markt für keramische Verkleidung verlangt hohe Qualität und rasche Verfügbarkeit zum kostengünstigen Preis. Die beiden letzteren Forderungen stehen in einem Konflikt zueinander, da eine rasche Verfügbarkeit ein hohes Maß an Flexibilität in der Produktion voraussetzt. Die Steigerung der Flexibilität durch kleine Losgrößen und beliebige Rüstreihenfolgen führt zu erhöhtem Rüst- und Personalaufwand sowie erhöhtem Einsatz von Ressourcen. Die Folge ist die Minderung der Auslastung der Produktionslinien, welche schließlich eine Erhöhung der Produktionskosten bedingt. Der Produktionsplanung, als Regler zwischen Verkauf und Produktion, obliegt es, dieses Problem durch Einsatz moderner Strategien und Methoden möglichst effizient zu lösen.

Die Lasselsberger, a.s. führt ein Sortiment von über 3.000 Produktvarianten, die auf 23 Produktionslinien hergestellt werden. Somit ergibt sich das Problem der Planung von Produktreihenfolge und Produktionsmenge. Aufgabe der Produktionsplanung ist sicherzustellen, dass das geforderte Produkt zur rechten Zeit in ausreichender Menge im Lager ist. Aufgrund der Variantenvielfalt weist die Lösung dieses Planungsproblems einen hohen Komplexitätsgrad auf. Dem Planungsproblem gegenüber steht der Planer, welcher nach vorgegebener Basisstrategie und mit Hilfe von Erfahrung, Kreativität und Intuition Produktreihenfolge und Produktionsmenge festlegt. Die Komponenten Erfahrung, Kreativität und Intuition lassen sich nur sehr schwierig in der Prozessdokumentation erfassen. Daher stellt die Implementierung der Produktionsplanung in das PPS-System<sup>1</sup> der Lasselsberger, a.s. ein Problem dar, das bis zu diesem Zeitpunkt nur unzureichend gelöst werden konnte.

## 1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung beinhaltet die Analyse der PPS der Lasselsberger, a.s. zur Erstellung eines Simulationskonzepts, welches der Beurteilung von Planungsstrategien in der Fliesenproduktion dient. Das Konzept ist in einem Pilotmodell mit der Simulationssoftware Incontrol Enterprise Dynamics umzusetzen. Da die Anforderungen an Umfang und Qualität der erforderlichen Daten einer Simulationsstudie sehr hoch sind, und der Aufwand einer vollständigen

---

<sup>1</sup> Softwaresysteme für die Produktionsplanung und -steuerung (vgl. Kurbel (1999), S.15)

Ermittlung den Rahmen einer Diplomarbeit übersteigen würde, wird auf die Erhebung fehlenden Datenmaterials verzichtet und dieses durch Schätzungen von Fachpersonal der Lasselsberger, a.s. approximiert.

Zweck der Studie ist es einerseits, grundsätzliche Erkenntnisse bezüglich der Abbildung der Produktionsplanung, der Produktion und des Vertriebs zu gewinnen, um die Möglichkeiten und Probleme der Implementierung in das PPS-System abschätzen zu können. Andererseits soll der Planer durch einfache Planungsalgorithmen ersetzt und mit diesen verglichen werden.

### 1.3 Unternehmensprofil

Die Gesellschaft Lasselsberger, a.s. ist Hersteller keramischer Verkleidungen mit Sitz in Pilsen, in der Tschechischen Republik. Lasselsberger, a.s. gehört der Lasselsberger Gruppe an, mit dem Hauptquartier in Pöchlarn, Österreich. Die Gesellschaft ist seit 1998 in der Tschechischen Republik tätig. Die keramischen Produkte werden unter den Marken RAKO und LB OBJECT in der Tschechischen Republik und 40 weiteren Ländern vertrieben. Hauptexportländer sind Deutschland, Slowakei, Österreich, Polen, Ukraine, Frankreich, Russland, Niederlande, etc. Die Produktionskapazität von ca. 30 Mio. m<sup>2</sup> pro Jahr verteilt sich auf acht Werke und folgende fünf Standorte:

- Rakovník (Werke: Rako 1, Rako 2, Rako 3)
- Horní Bříza
- Chlumčany
- Borovany
- Podbořany

Wie bereits unter Abschnitt 1.1 erwähnt, umfasst das Produktsortiment in etwa 3.000 Produkte, welche auf 23 Produktionslinien hergestellt werden. Lasselsberger, a.s. zählt damit zu den größten europäischen Herstellern von Verkleidungskeramik und besitzt in der Tschechischen Republik einen Marktanteil von mehr als 50%.

Die Lasselsberger GmbH, Muttergesellschaft der Lasselsberger, a.s., ist eines der führenden Unternehmen bei Rohstoffen, Baustoffen und keramischen Produkten in Europa. Die Gruppe umfasst 67 Produktionsgesellschaften in 17 Ländern und beschäftigt mehr als 13.200 Mitarbeiter. Die Gruppe gliedert sich in folgende Unternehmensbereiche:

- **Ceramics:** Produktion und Vertrieb von Wohn-, Architektur- und Industriekeramik (Produktionskapazität: 65 Mio. m<sup>2</sup> pro Jahr)
- **Building Materials:** Herstellung und Vertrieb von Vorbereitungsmaterialien, Trockenbaustoffen und Transportbeton (u.a. Zement, Estrich, Fliesenkleber, Fugenmörtel, Silikon, Wärmedämmverbundsysteme)
- **Minerals:** Rohstoffgewinnung wie Kaolin und Ton
- **Trading:** Handel am Baustoffsektor
- **Shipping:** Logistikdienstleister überwiegend in Mittel- und Südeuropa

- **Finance:** Finanzdienstleister für Unternehmen
- **Factoring:** Finanzdienstleister im Factoringbereich und darüber hinaus (Vorfinanzierung, Risikoübernahme uvm.)

LASSELSBERGER, a.s.  
Adelova 2549/1  
320 00 Plzeň - Jižní Předměstí  
Czech Republic

Lasselsberger GmbH  
Wörth 1  
A-3380 Pöchlarn  
[www.lasselsberger.com](http://www.lasselsberger.com)



LASSELSBERGER

## 2 Grundlagen der betrieblichen Planung

Für ein besseres Verständnis der Produktionsplanung und -steuerung wird zu Beginn die allgemeine betriebliche Planung erläutert. Nachdem in Abschnitt 2.1 der Begriff der Planung definiert wird, folgt unter Abschnitt 2.2 eine Betrachtung aus betrieblicher Sicht. Abschnitt 2.3 behandelt den zeitlichen Rahmen betrieblicher Planung, beschrieben durch die Reichweite. Abschnitt 2.4 erläutert die Interdependenzen zwischen den Teilbereichen der Planung. Das Kapitel *Grundlagen der betrieblichen Planung* schließt mit Abschnitt 2.5, welcher die Anpassung des Plans an Datenänderungen beinhaltet.

### 2.1 Der Begriff der Planung

Der Anlass zur Planung liegt im Bestreben, einen Zustand - den Sollzustand - zu erreichen, und dessen Abweichung zum Istzustand. Die Planung dient der Findung von Maßnahmen, um den Sollzustand mit möglichst geringem Aufwand zu erreichen.<sup>1</sup> Diese Maßnahmen werden im Rahmen des Planungsprozesses bewertet und stellen Handlungsalternativen eines Entscheidungsproblems dar. Planung dient der Entscheidungsvorbereitung und -findung.<sup>2</sup> Folgende Definitionen sind eine Auswahl aus dem in der Literatur sehr umfassend definierten Begriff der Planung:

Planung ist die geistige Vorwegnahme künftigen Handelns.<sup>3,4</sup>

*“Planung ist ein von Planungsträgern auf der Grundlage unvollkommener Informationen durchgeführter, grundsätzlich systematischer und rationaler Prozess zur Lösung von (Entscheidungs-) Problemen unter Beachtung subjektiver Ziele.”<sup>5</sup>*

### 2.2 Inhalt der betrieblichen Planung

Zur Erläuterung der Teilbereiche des betrieblichen Kreislaufes und deren Wechselwirkungen wird die Darstellung in Abbildung 2.1 herangezogen. An zentraler Stelle der betrieblichen Planung steht die Planung der Produktion, als Transformationsprozess von Produktionsfaktoren in Produkte. Auslöser der Produktionsplanung ist der Absatz. Durch die Festlegung des Produktionsprogramms im Zuge der Absatzplanung wird die Planung der Beschaffung angestoßen. Durch Planvorgaben der betrieblichen Planung wird im Zuge der Finanzplanung das Investitionsprogramm erstellt. Die Interaktion von betrieblicher Planung und Finanzplanung

---

<sup>1</sup> Vgl. Adam (1996), S.1.

<sup>2</sup> Vgl. Kiener et al. (2006), S.27.

<sup>3</sup> Vgl. Schneeweiß (1991), S.1.

<sup>4</sup> Vgl. Kiener et al. (2006), S.27.

<sup>5</sup> Vgl. Domschke/Scholl (2005), S.25.

wird durch strategische Vorgaben der Unternehmensleitung gesteuert. Der gesamte Planungskreislauf wird ständig durch Anstöße aus der Umwelt beeinflusst (Nachfrage, Bedingungen der Beschaffungsmärkte, gesetzliche Vorschriften etc.).<sup>6</sup>

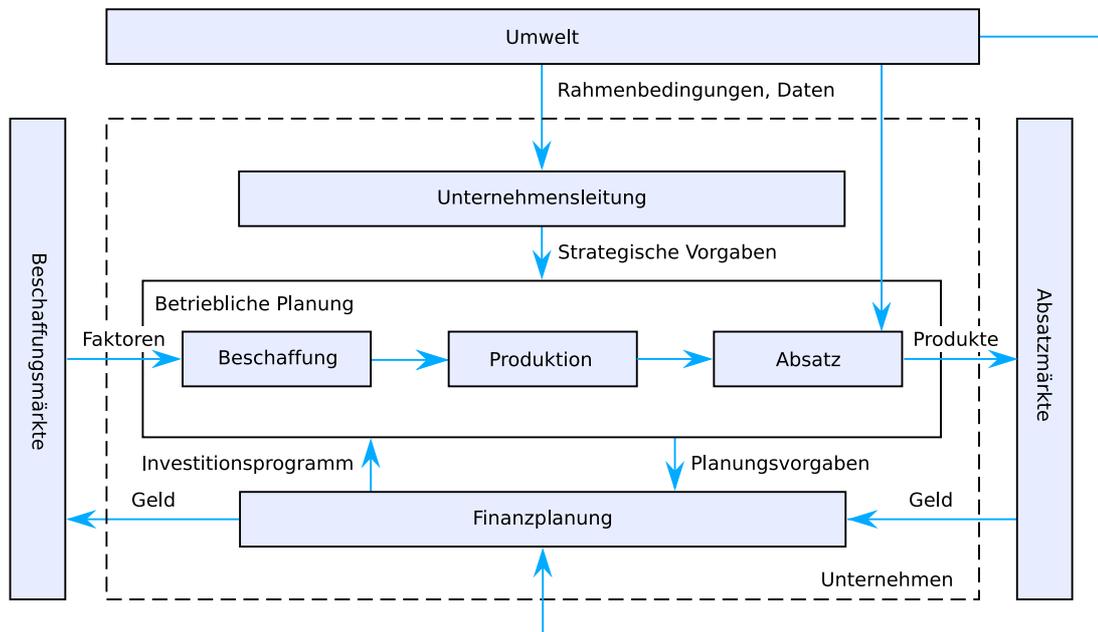


Abbildung 2.1: Der betriebliche Kreislauf (in Anlehnung an Kistner/Steven (2001), S.6)

## 2.3 Reichweite

Planung ist ein zukunftsorientierter Prozess, daher stehen als Planungsgrundlage nur unsichere Informationen zur Verfügung. Unter Reichweite, oder auch Fristigkeit,<sup>7</sup> ist der zeitliche Rahmen zu verstehen, der in der Planung berücksichtigt wird. Je weiter in die Zukunft geplant wird, desto unsicherer ist in der Regel das Eintreten der geplanten Ereignisse. Unter dem Aspekt von Reichweite und Unsicherheit gliedert sich die betriebliche Planung in folgende drei Ebenen:<sup>8</sup>

- strategische (langfristige) Planung
- taktische (mittelfristige) Planung
- operative (kurzfristige) Planung

Unter Detaillierung wird die Aggregation der Planungsdaten sowohl in zeitlicher als auch in sachlicher Hinsicht verstanden. Von übergeordneter zu untergeordneter Ebene verkürzt sich die Reichweite und erhöht sich die Detaillierung des Plans. Folgend werden die Funktionen und Merkmale der einzelnen Planungsebenen genauer erläutert.<sup>9</sup>

<sup>6</sup> Vgl. Kistner/Steven (2001), S.5.

<sup>7</sup> Vgl. Kistner/Steven (2001), S.12.

<sup>8</sup> Vgl. Domschke/Scholl (2005), S.28.

<sup>9</sup> Vgl. Luczak/Eversheim (1999), S.93.

### 2.3.1 Strategische (langfristige) Planung

Die strategische Planung dient zur langfristigen Sicherung und Erweiterung der unternehmerischen Geschäftstätigkeit. Die strategische Planung beschäftigt sich einerseits innerbetrieblich mit den Stärken und Schwächen des Unternehmens und definiert Kernkompetenzen, Unternehmensfeld und Branche. Andererseits ist die Beobachtung der Konkurrenz und des Marktes Planungsinhalt auf strategischer Ebene, um unternehmerische Gefahren zu erkennen und Potenziale zu nutzen.<sup>10</sup>

In der Verantwortung der strategischen Planung liegen Entscheidungen betreffend Marketingstrategie, Standortwahl, Vertriebsstrategie, Forschung und Entwicklung, globale Produktionsstrategie sowie Investitionsplanung, etc. Sie ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- **Hohe Reichweite:** langfristige Planung von bis zu zehn Jahren
- **Geringe sachliche Detaillierung:** Planung in hochaggregierten Gruppen und groben Mengeneinheiten
- **Geringe zeitliche Detaillierung:** Planung in Jahren

Über den Planungshorizont<sup>11</sup> sind in der Literatur je nach Planungsbereich und Autor unterschiedliche Auffassungen gegeben. Ein Planungshorizont von fünf bis zehn Jahren ist jedoch üblich.<sup>12,13,14</sup>

### 2.3.2 Taktische (mittelfristige) Planung

Auf taktischer Ebene erfolgt die schrittweise Umsetzung strategischer Vorgaben. Es obliegt der taktischen Planung, Entscheidungen betreffend des Leistungsprogramms zu treffen, ebenso wie die Unternehmensorganisation, Produktionsinfrastruktur, Layoutplanung, Dimensionierung der Produktionskapazitäten, Personalentscheidungen, etc. Die taktische Planung wird durch folgende Charakteristika beschrieben:<sup>15,16</sup>

- **Mittlere Reichweite:** wenige Monate bis zu fünf Jahre (Abhängig vom Planungsbereich; Differenzierte Angaben in der Literatur)
- **Mittlere sachliche Detaillierung:** Gruppierung entsprechend gleicher Planungsmerkmale, Produktserien, etc.
- **Mittlere zeitliche Detaillierung:** Planung in Wochen oder Monaten, gegebenenfalls in Jahren

Auf taktischer Ebene besteht ebenfalls eine Unschärfe bezüglich der Reichweite. Während Domschke/Scholl (2005) der mittelfristigen Planung eine Reichweite von wenigen Monaten bis zu zwei Jahren zuordnen, beziffern Dyckhoff/Spengler (2007) den Planungshorizont mit ein bis fünf Jahren.

---

<sup>10</sup> Vgl. Domschke/Scholl (2005), S.29.

<sup>11</sup> Ende der Reichweite (vgl. Kistner/Steven (2001), S.12)

<sup>12</sup> Vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.30.

<sup>13</sup> Vgl. Domschke/Scholl (2005), S.29.

<sup>14</sup> Vgl. Voigt (2007), S.524.

<sup>15</sup> Vgl. Domschke/Scholl (2005), S.29.

<sup>16</sup> Vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S.27.

### 2.3.3 Operative (kurzfristige) Planung

In der operativen Planung erfolgt die kurzfristige Detailplanung der Bereiche Materialwirtschaft (Bedarfs- und Bestandsplanung), Zeitwirtschaft (Kapazitäts- und Durchlaufterminierung, Reihenfolge) und Produktionssteuerung (Auftragsfreigabe und -überwachung). Der operativen Planung sind folgende Merkmalsausprägungen zuzuordnen:<sup>17</sup>

- **kurze Reichweite:** bis zu einem Jahr (Abhängig von Planungsbereich und Unternehmen)
- **hohe sachliche Detaillierung:** völlige Disaggregation, Planung auf der Ebene einzelner Aufträge und Produkte
- **hohe zeitliche Detaillierung:** Planung in Stunden, Tagen oder Wochen

## 2.4 Interdependenzen

Das unternehmerische Planungsproblem erhält seine Komplexität unter anderem durch die Vielzahl von Abhängigkeiten ihrer Planungsvariablen. Diese Interdependenzen lassen sich wie folgt unterscheiden:

- Sachliche Interdependenz
- Zeitliche Interdependenz

Die sachliche Interdependenz beschreibt die Abhängigkeiten eines Planungsproblems zu einem bestimmten Zeitpunkt (z.B. Abhängigkeit zwischen Produkten aufgrund knapper Ressourcen), während die zeitliche Interdependenz die Abhängigkeit von der Informationsenthüllung über die Zeit beschreibt (z.B. die Notwendigkeit der Absatzplanung vor der Programmplanung).<sup>18</sup>

### 2.4.1 Total- und Partialmodell

Der Handlungszeitraum erstreckt sich theoretisch vom Planungszeitpunkt bis zum Ende der unternehmerischen Tätigkeit (Insolvenz, Liquidation). Totalmodelle sind Planungsmodelle, die alle sachlichen Interdependenzen des Planungsproblems berücksichtigen und deren Reichweite sich mit dem Handlungszeitraum deckt (Berücksichtigung aller zeitlichen Interdependenzen). Dieses Modell besitzt jedoch nur theoretische Relevanz, da aufgrund der Komplexität des Modells der praktisch mögliche Detaillierungsgrad zu gering ist, um entscheidungsrelevante Informationen aus der Planung zu erhalten.<sup>19</sup>

Partialmodelle besitzen hingegen eine verkürzte Reichweite. Der Plan erstreckt sich nicht über den gesamten Handlungszeitraum. Nach Kistner/Steven (2001) ist in Bezug auf sachliche Interdependenzen die Unterscheidung zwischen Total- und Partialmodell relativ zum Standpunkt des Anwendungsfeldes. Beispielsweise wäre ein Modell, das alle Entscheidungsvariablen und Restriktionen der operativen und taktischen Ebene der Produktionsplanung

---

<sup>17</sup> Vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.31.

<sup>18</sup> Vgl. Kistner/Steven (2001), S.13 ff.

<sup>19</sup> Vgl. Kiener et al. (2006), S.36.

berücksichtigt, ein Totalmodell, während es sich aus strategischer Sicht um ein Partialmodell handelt.<sup>20</sup>

Nachteilig an der Dekomposition des Gesamtplanungsproblems zu Partialproblemen ist, dass ein optimales Planungsergebnis lediglich dann möglich ist, wenn die Partialmodelle unabhängig voneinander sind. Andernfalls stellt sich ein inkonsistenter Zustand zwischen den Partialmodellen ein.

### 2.4.2 Simultan- und Sukzessivplanung

Sind die unter Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Partialmodelle nicht unabhängig voneinander, so ist ein Koordinationsmechanismus nötig, um konsistente Planungsergebnisse zu erhalten. Anhand der Koordination wird die Planung in Simultan- und Sukzessivplanung unterschieden.

Im Falle einer Simultanplanung werden alle Teilprobleme der Planung zeitgleich behandelt, wodurch die Ermittlung der optimalen Lösung ermöglicht wird. Dennoch ist solch ein Modell für die PPS nur bedingt geeignet. Ein Scheitern des Modells liegt aus folgenden Gründen nahe:<sup>21</sup>

- Komplexität und Umfang des Planungsproblems<sup>22</sup>
- Mangelnde Berücksichtigung des organisatorischen Rahmens (Eignung nur für zentralgesteuerte PPS-Systeme)
- Keine Berücksichtigung der zeitlichen Struktur des PPS-Problems (Unterschiedliche Reichweite der Teilprobleme der operativen PPS)

Die Sukzessivplanung behandelt die verschiedenen Teilprobleme der Planung in einer zeitlichen Reihenfolge, wobei die Planungsergebnisse einer Planungsstufe der nachfolgenden Stufe als Input dienen (siehe Abbildung 2.2). Ein Defizit dieses Konzepts ist, dass die optimale Lösung jeder einzelnen Planungsstufe nicht zwangsläufig zur optimalen Lösung des Gesamtproblems führt.<sup>23</sup>

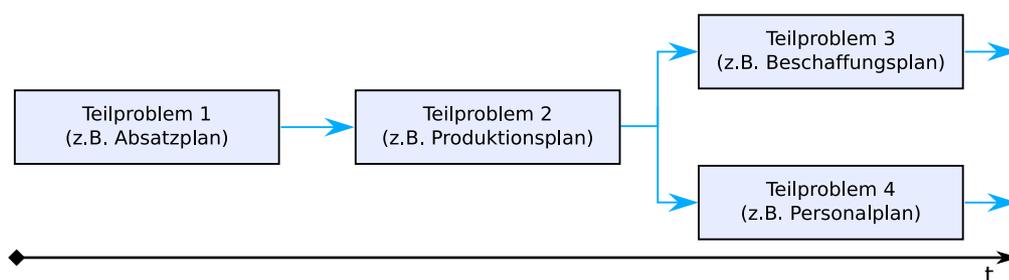


Abbildung 2.2: Sukzessivplanung (in Anlehnung an Voigt (2007), S.31)

<sup>20</sup> Vgl. Kistner/Steven (2001), S.15.

<sup>21</sup> Vgl. Rücker (2006), S.10.

<sup>22</sup> Vgl. Schneider et al. (2005), S.17.

<sup>23</sup> Vgl. Kiener et al. (2006), S.37.

### 2.4.3 Hierarchische Modelle

Hierarchische Modelle, wie in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt, entsprechen dem Prinzip der Sukzessivplanung mit Rückkoppelung. Es erfolgt eine Dekomposition des Gesamtproblems in Teilprobleme, welche in Partialmodellen sukzessive gelöst werden. Die Partialmodelle sind hierarchisch angeordnet, wobei der Planungshorizont auf höchster Ebene am weitesten ist und die Planungsdaten stark aggregiert sind (z.B. Planung in Produktfamilien).<sup>24</sup> Die Koppelung zweier Ebenen durch

- **Vorgaben** (Festlegung des Handlungsrahmens von übergeordneter zu untergeordneter Planungsebene)<sup>25</sup>
- **Feedforward-Mechanismen** (Berücksichtigung spezifischer Eigenschaften der untergeordneten Planungsebene bei der Planerstellung der übergeordneten)<sup>26</sup> und
- **Feedback-Mechanismen** (rollierende Planung)<sup>27</sup>

gewährleistet von übergeordneter zu untergeordneter Ebene eine konsistente Disaggregation der Daten, wobei die Detaillierung der Planung mit abnehmender hierarchischer Stufe zunimmt. Auf unterster Ebene erfolgt unter völliger Disaggregation die Planung einzelner Produkte.<sup>28,29</sup>

## 2.5 Anpassung an Datenveränderungen

Aufgrund der Dynamik der Datengrundlage muss der Plan regelmäßig den Änderungen angepasst werden. Es lassen sich folgende Prinzipien der Anpassungsänderung unterscheiden:<sup>30,31</sup>

- Rollierende Planung, Anschlussplanung und ereignisorientierte Planung
- Neuaufwurf und Net-Change

### 2.5.1 Rollierende Planung, Anschlussplanung und ereignisorientierte Planung

Das Prinzip der rollierenden Planung ist in Abbildung 2.4a dargestellt. Im Zuge der rollierenden Planung wird der Planungsprozess nach Ablauf einer Periode  $p_{ti}$  wiederholt, wobei die Planungsreichweite  $t_r$  größer ist als die Periode  $p_{ti}$ . Die Periode  $p_{ti}$  entspricht auch dem Fixierungshorizont, da die Planungsparameter für die erste Periode des Planungszeitraumes fixiert sind, alle folgenden Perioden können im Zuge eines neuerlichen Planungsdurchgangs nochmals verändert werden.

---

<sup>24</sup> Vgl. Neumann (1996), S.194.

<sup>25</sup> Vgl. Rücker (2006), S.10.

<sup>26</sup> Vgl. Rücker (2006), S.11.

<sup>27</sup> siehe Absatz 2.5.1 Rollierende Planung, Anschlussplanung und ereignisorientierte Planung

<sup>28</sup> Vgl. Otto/Obermaier (2007), S.166.

<sup>29</sup> Vgl. Kistner/Steven (2001), S.214 ff.

<sup>30</sup> Vgl. Kurbel (1999), S.114 ff.

<sup>31</sup> Vgl. Kistner/Steven (2001), S.16 ff.

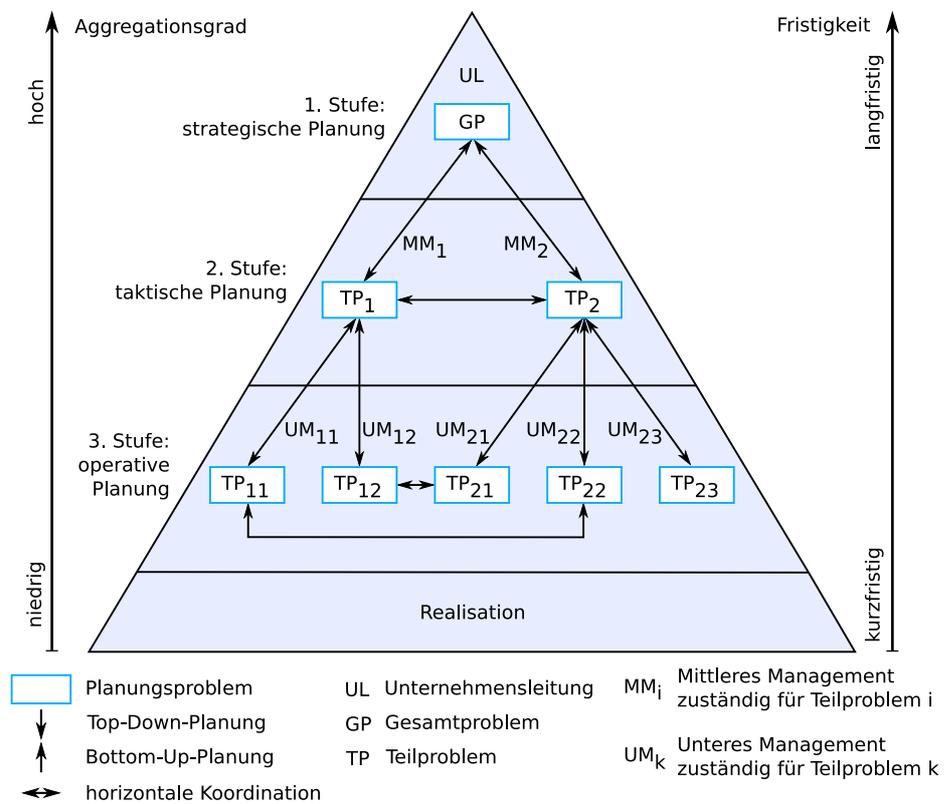


Abbildung 2.3: Hierarchische Planung (in Anlehnung an Voigt (2007), S.33)

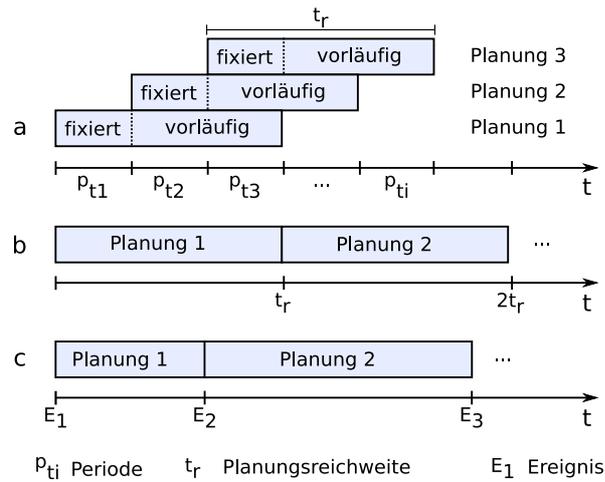


Abbildung 2.4: Prinzipien der Planung: a) rollierende Planung, b) Anschlussplanung, c) ereignisorientierte Planung

Schließt nach Erreichen des Planungshorizonts, ohne Überlappung, ein neuerlicher Planungsdurchgang an, so handelt es sich um eine Anschlussplanung. Das Prinzip der Anschlussplanung ist in Abbildung 2.4b dargestellt.

Die ereignisorientierte Planung besitzt keine bestimmte Planungsreichweite. Ein neuerlicher Planungsdurchgang wird durch das Eintreten eines bestimmten Ereignisses ausgelöst (siehe Abbildung 2.4c).

### 2.5.2 Neuaufwurf und Net-Change

Wird eine Planung durchgeführt, ohne Rücksicht auf eventuell bestehende Pläne, so handelt es sich um einen Neuaufwurf. Am Beispiel der rollierenden Planung ist ein Neuaufwurf ein Planungsdurchgang, der vorläufige Planungsergebnisse der vorangegangenen Planung ignoriert.

Wird im Falle eines neuerlichen Planungsdurchgangs der bestehende Plan herangezogen und nach Abweichungen der Eingangsdaten korrigiert, so handelt es sich um einen Net-Change.

# 3 Produktion

Unter Produktion ist ein Prozess zu verstehen, der materielle und nichtmaterielle Einsatzfaktoren (Input) zum Zweck der Erstellung von Produkten (Output) kombiniert und transformiert (siehe Abbildung 3.1).<sup>1,2</sup>

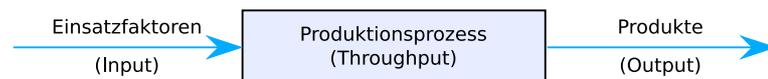


Abbildung 3.1: Produktion als Throughput-Prozess (in Anlehnung an Domschke et al. (1993), S.4)

Die Planung von Faktoren und Produkten sowie des Produktionsprozesses erfolgt im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung. Die Anforderungen, die an die PPS gestellt werden, unterscheiden sich stark nach der betrieblichen Organisation und deren strukturelle Merkmale. Der in Abbildung 3.2 dargestellte morphologische Kasten wird häufig zur Darstellung unterschiedlicher Betriebstypen verwendet. Im Folgenden ist die Typologie von Betrieb und Produktion differenziert nach<sup>3</sup>

- Produkt- und Produktionsprogrammtyp (Outputtyp)
- Produktionsfaktortyp (Inputtyp)
- Produktionsprozesstyp (Throughputtyp)

## 3.1 Produkt- und Produktionsprogrammtypen

Die Klassifizierung nach Produkt- und Produktionsprogrammtyp erfolgt auf der Outputseite des Produktionssystems. Nachfolgend sind die Eigenschaften einzelner Produkte sowie die Eigenschaften des Produktionsprogramms erläutert.<sup>4</sup>

### 3.1.1 Produkteigenschaften

Tabelle 3.1 zeigt ausgewählte Merkmale, an denen sich Produkte unterscheiden lassen, sowie die entsprechenden Produkttypen. In der Folge werden diese kurz erklärt. Während Hauptprodukte per Definition immer erwünscht sind, lassen sich Nebenprodukte der Kategorien

---

<sup>1</sup> Vgl. Domschke et al. (1993), S.4.

<sup>2</sup> Vgl. Kurbel (1999), S.32.

<sup>3</sup> Vgl. Kurbel (1999), S.33.

<sup>4</sup> Vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S.10.

Merkmal	Merkmalsausprägung				
Auftragsauslösungsart	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen	Produktion auf Bestellung mit Rahmenaufträgen	kundenanonyme Vorproduktion/ Endproduktion auf Auftrag	Produktion auf Lager	
Erzeugnisspektrum	Erzeugnisse nach Kundenspezifikation	typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten	
Erzeugnisstruktur	mehnteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur		mehnteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur		geringteilige Erzeugnisse
Ermittlung des Bedarfs	bedarfsorientiert auf Erzeugnisebene	erwartungs- u. bedarfsorient. auf Komponenten Ebene	erwartungsorientiert auf Komponentenebene	erwartungsorientiert auf Erzeugnisebene	verbrauchsorientiert auf Erzeugnisebene
Auslösung des Sekundärbedarfs	auftragsorientiert		teils auftragsorientiert/ teils periodenorientiert		periodenorientiert
Beschaffungsart	weitgehend Fremdbezug		Fremdbezug in größerem Umfang		Fremdbezug unbedeutend
Bevorratung	keine Bevorratung von Bedarfspositionen	Bevorratung von Bedarfspositionen auf unteren Strukturebenen	Bevorratung von Bedarfspositionen auf oberen Strukturebenen	Bevorratung von Erzeugnissen	
Fertigungsart	Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung	
Fertigungsablaufart	Werkstattfertigung	Inselfertigung	Reihenfertigung	Fließfertigung	
Montageablaufart	Baustellenmontage	Gruppenmontage	Reihenmontage	Fließmontage	
Fertigungsstruktur	Fertigung mit geringem Strukturierungsgrad		Fertigung mit mittlerem Strukturierungsgrad		Fertigung mit hohem Strukturierungsgrad
Änderungseinfluss des Kunden	Änderungseinflüsse in größerem Umfang		Änderungseinflüsse gelegentlich		Änderungseinflüsse unbedeutend

Abbildung 3.2: Darstellung der Betriebstypologie mittels morphologischen Kastens (in Anlehnung an Kurbel (1999), S.34)

gut, übel und neutral unterscheiden. Die Güterart beschreibt, ob es sich um materielle Güter wie Werkzeug, Werkstoff oder Maschinen handelt, oder um immaterielle, wie menschliche und maschinelle Arbeit oder auch Informationen. Die Gestalt der Güter lässt sich in geformte (z.B. Stahlbleche) und ungeformte (z.B. Getränke) Fließgüter sowie Stückgüter differenzieren. Ist das Produkt an den Nutzungsort gebunden, so handelt es sich um ein unbewegliches Gut, andernfalls um ein bewegliches.<sup>5,6</sup>

Tabelle 3.1: Übersicht der outputbezogenen Produkttypen (vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S.10 und Dyckhoff/Spengler (2007), S.13)

Merkmal	Produkttyp
Produktionsziel	Hauptprodukt
	Nebenprodukt
Güterart	Materielles Gut
	Immaterielles Gut
Gestalt der Güter	Geformtes Fließgut
	Ungeformtes Fließgut
Bindung an Nutzungsort	Stückgut
	Unbewegliches Gut
	Bewegliches Gut

### 3.1.2 Produktionsprogrammeigenschaften

Tabelle 3.2 zeigt eine Auswahl an Merkmalen des Produktionsprogramms. Die Beziehung zwischen Produktion und Absatzmarkt wird durch den Auftragsstyp<sup>7</sup> oder auch die Auftragsauslösungsart beschrieben. Die Kundenproduktion sieht zu Produktionsbeginn einen Kundenauftrag vor, während die Marktproduktion für den anonymen Markt produziert. Daraus lassen sich folgende Produktionsstrategien ableiten:<sup>8</sup>

- Engineer-To-Order (ETO): Zumindest teilweise Entwicklung auf Bestellung
- Make-To-Order (MTO): Produktion nur auf Bestellung
- Assembly-To-Order (ATO): Bevorratung von Baugruppen oder Einzelteilen und kundenspezifische Endfertigung
- Make-To-Stock (MTS): Bevorratung auf Endproduktebene
- Package-To-Order (PTO): Kundenspezifische Verpackung

<sup>5</sup> Vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S.10 ff.

<sup>6</sup> Vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.13 ff.

<sup>7</sup> Vgl. Schneider et al. (2005), S.7.

<sup>8</sup> Vgl. Schönsleben (2007), S.185 ff.

Tabelle 3.2: Übersicht der outputbezogenen Produktionsprogrammtypen (in Anlehnung an Kurbel (1999), S.33)

Merkmal	Produktionsprogrammtyp
Produktion-Absatzmarkt-Beziehung	Auftragsproduktion
	Kundenproduktion
	Bestellproduktion
	Vorratsproduktion
	Lagerproduktion
	Marktproduktion
Anzahl der Endprodukte	Einproduktproduktion
	Mehrproduktproduktion
Verwandtschaftsgrad	Artenproduktion
	Sortenproduktion

### 3.2 Produktionsfaktortypen

Produktionsfaktortypen, auch als einsatzbezogene Produktionstypen bezeichnet<sup>9</sup>, sind die inputseitige Klassifizierung der Betriebstypologie. Tabelle 3.3 zeigt eine Gliederung der faktorbezogenen Merkmale der Produktion und dazugehörige elementare Produktionstypen, welche an dieser Stelle kurz erläutert werden.

Ein Maß für die Intensität des Einsatzfaktors ist der Kostenanteil an den Herstellkosten des Produkts. Arbeitsintensive Produktion ist beispielsweise durch einen hohen Lohnkostenanteil, aufgrund von Fachkräften oder dem hohen Produktionskoeffizienten bezüglich der Arbeit, gekennzeichnet. Die Qualifikation der Arbeitskräfte, differenzierbar in un- oder angelernte Arbeitskräfte und Fachkräfte, steht im engen Zusammenhang zum Repetitionstyp (siehe Abschnitt 3.3). Sind Produkte aufgrund des Ausmaßes der Werkstoffqualitätsschwankung nicht als gleich anzusehen, so handelt es sich um nicht wiederholbare Produktion, andernfalls wird sie als wiederholbar bezeichnet. Die Spezialproduktion zeichnet sich im Gegensatz zur Universalproduktion im Einsatz spezieller Maschinen oder hoch spezifizierter Arbeitskräfte aus. Anhand der Anzahl der Einzelteile oder Baugruppen im Endprodukt wird zwischen einteiligen und mehrteiligen Produkten unterschieden.<sup>10</sup>

### 3.3 Produktionsprozestypen

Unter Produktionsprozess ist eine Folge von Arbeitsgängen zu verstehen, welche von Arbeitssystemen an Objekten durchgeführt werden. Während der Organisationstyp die räumliche Anordnung der Produktion wiedergibt, handelt es sich bei den übrigen Merkmalen der Tabelle 3.4 um prozessstrukturbestimmende Merkmale.

<sup>9</sup> Vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.16.

<sup>10</sup> Vgl. Kistner/Steven (2001), S.21.

Tabelle 3.3: Übersicht der faktorbezogenen Produktionstypen (vgl. Kistner/Steven (2001), S.21)

Merkmal	Produktionstyp
Intensität der Einsatzfaktoren	Arbeitsintensive Produktion
	Betriebsmittel- oder anlagenintensive Produktion
	Material- oder werkstoffintensive Produktion
	Energieintensive Produktion
Qualifikation der Arbeitskräfte	Un-/Angelernte Arbeitskräfte (z.B. Massen-, Großserienfertigung)
	Ausgebildete Fachkräfte (z.B. Einzel-, Kleinserienfertigung)
Konstanz der Werkstoffqualität	Wiederholbare Produktion
	Nicht wiederholbare Produktion
Flexibilität des Faktoreinsatzes	Spezialproduktion
	Universalproduktion
Anzahl der Vorprodukte im Endprodukt	Einteilige Produkte
	Mehrteilige Produkte

Tabelle 3.4: Übersicht der produktionsprozessbezogenen Produktionstypen (in Anlehnung an Kurbel (1999), S.33)

Merkmal	Produktionsprozesstyp
Wiederholungsgrad (Repetitionstyp)	Einmalige Einzelproduktion Wiederholte Einzelproduktion Serienproduktion Massenproduktion
Organisationstyp	Werkstattproduktion Baustellenfertigung Reihenproduktion Transferstraße Fließproduktionslinie Flexibles Fertigungssystem Produktionsinsel
Verbundenheit des Produktionsprozesses	Verbundene (Kuppel-) Produktion Unverbundene Produktion
Vergenz	durchlaufende Produktion (glatt) konvergierende Produktion (synthetisch) divergierende Produktion (analytisch) umgruppierende Produktion
Stufigkeit	einstufige Produktion mehrstufige Produktion zyklische Produktion
Konstanz der Prozessbedingungen	prozesstechnologisch konstante Produktion prozesstechnologisch nicht konstante Produktion (Chargenproduktion)

## 4 Produktionsplanung und -steuerung

Mit Kapitel 2 ist das grundsätzliche Verständnis für das Planungsproblem geschaffen. Nachdem in Kapitel 3 ein Überblick über die Diversität der Planungsumgebung gegeben wurde, soll nun auf die Produktionsplanung und -steuerung im engeren Sinn eingegangen werden. Zu Beginn dieses Kapitels werden in Abschnitt 4.1 die Ziele der PPS abgegrenzt. Abschnitt 4.2 enthält den wissenschaftlichen Zugang zur PPS über das Aachener PPS-Modell. Die Aufgaben der PPS werden in Abschnitt 4.3 behandelt. Abschnitt 4.4 befasst sich schließlich mit der betrieblichen Praxis und erläutert ausgewählte Konzepte der PPS.

### 4.1 Ziele der Produktionsplanung und -steuerung

Als Teil der Unternehmensplanung sind die Ziele der PPS in das Zielsystem des Unternehmens eingegliedert, wodurch das Wirtschaftlichkeitsprinzip<sup>1</sup> zur Leitlinie der Handlungen im Rahmen der PPS wird. Hauptmöglichkeit der PPS, auf die Wirtschaftlichkeit Einfluss zu nehmen, besteht in der Beeinflussung der Kosten. Da diese zum Planungszeitpunkt in der Regel nicht im erforderlichen Umfang verfügbar sind, wird häufig auf Ersatzzielgrößen zurückgegriffen.<sup>2</sup> Im Rahmen der PPS werden Zeitziele wie

- Minimierung der Durchlaufzeit,
- Minimierung der Liegezeit,
- Maximierung der Kapazitätsauslastung,
- Minimierung der Stillstandszeit,
- Minimierung der Terminüberschreitung

und Mengenziele wie unter anderem folgende angestrebt:

- Minimierung von Beständen,
- Minimierung von Fehlmengen.

### 4.2 Das Aachener PPS-Modell und seine Erweiterungen

Die Planung der industriellen Produktion unter dem Begriff der Produktionsplanung und -steuerung gewann in den 1980er-Jahren sowohl in der Wirtschaft als auch der Wissenschaft zunehmend an Bedeutung. 1984 definierte Rolf Hackstein, vom Forschungsinstitut für

---

<sup>1</sup> Berücksichtigung des ökonomischen Prinzips in der Produktion, als Vermeidung ineffizienter Faktorkombinationen (vgl. Kistner/Steven (2002), S.22)

<sup>2</sup> Vgl. Kurbel (1999), S.19 ff.

Rationalisierung (FIR) - Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), die wesentlichen Funktionen der PPS. 1993 wurde diese Arbeit fortgeführt und ein Aufgaben-Modell ausgearbeitet. In der Folge entwickelte sich das Aufgaben-Modell zum Aachener PPS-Modell. Um dem Trend der überbetrieblichen Netzwerkbildung gerecht zu werden, wurde das Aachener PPS-Modell adaptiert.<sup>3,4</sup>

Das Aachener PPS-Modell dient zur Unterstützung unterschiedlichster PPS-Projekte, wie die Auswahl und Einführung eines PPS-Systems, Reorganisation oder Harmonisierung der PPS sowie Entwicklung von Konzepten und Systemen der PPS.<sup>5</sup>

Unter der Sicht versteht man Teilmodelle, deren Beziehung zueinander im gleichen Zweck besteht. Ist- und Soll-Zustände beschreiben Grenzzustände eines Modells. Referenzzustände hingegen können als signifikante Zustände betrachtet werden, die nicht notwendigerweise dem Ideal entsprechen müssen.<sup>6</sup> Das Aachener PPS-Modell unterteilt sich in folgende vier Referenzsichten:<sup>7</sup>

- Aufgabensicht
- Prozessarchitektur
- Prozesssicht
- Funktionssicht

Die Aufgabenreferenzsicht bildet gemeinsam mit den Referenzsichten Prozesssicht und Prozessarchitektur die Grundlage zur Gestaltung der Aufbau-<sup>8</sup> und Ablauforganisation<sup>9</sup>. An die Aufgabenreferenzsicht werden folgende Anforderungen gestellt:

- Gliederung unabhängig von der Aufbauorganisation
- Ungebunden an organisatorische Ablaufstrukturen (Betriebstypunabhängigkeit)
- Einfacher Aufbau
- Einsetzbarkeit für inner- sowie für überbetriebliche Planungs- und Steuerungsaufgaben (Netzwerktauglichkeit)

Die ursprüngliche Aufgabenreferenzsicht unterteilt sich in Kernaufgaben und Querschnittsaufgaben, welche alle Aufgaben des innerbetrieblichen Produkterstellungsprozesses beinhalten. Zu den vier Kernaufgaben zählen die Produktionsprogrammplanung, Produktionsbedarfsplanung, Fremdbezugsplanung und -steuerung und Eigenfertigungsplanung und -steuerung. Die drei Querschnittsaufgaben umfassen Auftragsmanagement, Beschaffungsmanagement und Controlling.

Die Netzwerkaufgaben stellen eine Erweiterung des ursprünglichen Aachener PPS-Modells dar. Sie integrieren die überbetriebliche Tätigkeit in die Planung und Steuerung des Unternehmens auf strategischer Ebene und umfassen die Netzwerkkonfiguration, Netzwerkabsatzplanung und Netzwerkbedarfsplanung. Die Verflechtung von Kern- und Netzwerkaufgaben

---

<sup>3</sup> Vgl. Schuh (2006), S.4.

<sup>4</sup> Vgl. Luczak/Eversheim (1999), S.4.

<sup>5</sup> Vgl. Schuh (2006), S.12.

<sup>6</sup> Vgl. Schuh (2006), S.14.

<sup>7</sup> Vgl. Schuh (2006), S.18.

<sup>8</sup> Hierarchische Gliederung unterschiedlichen Umfangs der Organisationseinheiten des Unternehmens (vgl. Wiendahl (1989), S.13)

<sup>9</sup> Regelt den grundsätzlichen Ablauf der normalen Geschäftsfälle (vgl. Wiendahl (1989), S.13)

erfolgt durch die Querschnittsaufgaben. Die Datenverwaltung erstreckt sich über alle drei Bereiche des Aachener PPS-Modells. In Abbildung 4.1 ist die Struktur der Aufgabenreferenzsicht dargestellt.<sup>10</sup>

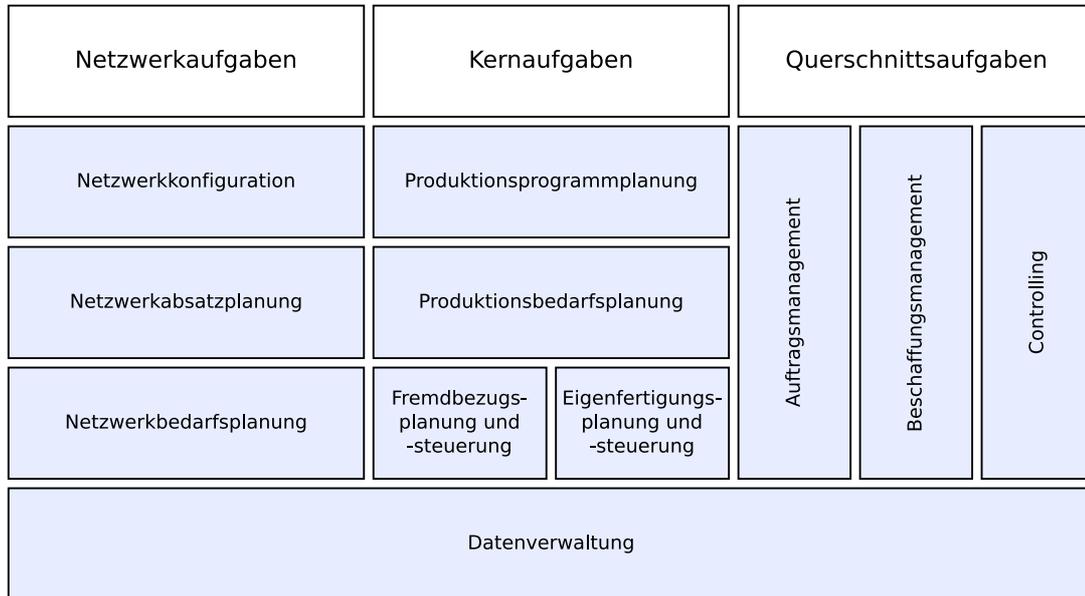


Abbildung 4.1: Struktur der Aufgabenreferenzsicht (Quelle: Schuh (2006), S.21)

Ausgehend von den Aufgaben der Aufgabenreferenzsicht bildet die Prozessreferenzsicht die innerbetriebliche, zeitliche und logische Strukturierung der Aufgabenschritte ab. Da der Ablauf der einzelnen Prozessschritte von den Merkmalsausprägungen des Betriebstyps (z.B. Auftragsfertiger, Variantenfertiger, etc.) abhängt, ist eine allgemeine Darstellung dieser Sicht nicht möglich. Die Prozessreferenzsicht bildet auch die überbetrieblichen Netzwerkaufgaben ab, jedoch ohne Rücksichtnahme auf den unternehmensübergreifenden Charakter.<sup>11</sup>

Die Prozessarchitektursicht, ebenfalls eine Adaption im Zuge des erweiterten Aachener PPS-Modells, verbindet die Aufgabenreferenzsicht und die Prozessreferenzsicht. Die Aufgabenreferenzsicht ist nun in zwei Ebenen gegliedert: die Unternehmensebene und die Netzwerkebene. Die Prozessarchitektursicht definiert die Schnittstellen zwischen diesen Ebenen und beschreibt die Koordination der Prozesse auf Netzwerkebene. Die Struktur dieser Sicht ist vom Typ des Netzwerkes abhängig (z.B. Projekt Netzwerk, Hybridfertigungsnetzwerk, Lieferantennetzwerk, etc.).<sup>12</sup>

Die Funktionssicht, ebenfalls aus der Aufgabensicht abgeleitet, definiert und beschreibt die einzelnen Funktionen, die durch ein ERP- bzw. PPS-System unterstützt werden sollen. Um eine rasche Identifikation der Funktion zu ermöglichen, ist die Strukturierung dieser Referenzsicht an die Aufgabensicht angepasst.<sup>13</sup>

<sup>10</sup> Vgl. Schuh (2006), S.19 ff.

<sup>11</sup> Vgl. Schuh (2006), S.23.

<sup>12</sup> Vgl. Schuh (2006), S.21 ff.

<sup>13</sup> Vgl. Schuh (2006), S.25 ff.

## 4.3 Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung

### 4.3.1 Absatz- und Produktionsprogrammplanung

Anhand der Fristigkeit unterscheidet man das potenzielle und das aktuelle Produktionsprogramm. Während das potenzielle Produktionsprogramm das langfristige Produktfeld und dazugehörige Produktlinien bestimmt, setzt das aktuelle Produktionsprogramm strategische und taktische Vorgaben des potenziellen Produktionsprogramms um.<sup>14</sup> Die operative Absatz- und Produktionsprogrammplanung dient der Festlegung des Primärbedarfs<sup>15</sup> für den definierten Planungszeitraum nach

- Art der Leistung,
- Menge der Leistung und
- Termin der Leistung.

Das Ergebnis der Absatz- und Produktionsprogrammplanung ist das Produktionsprogramm. Der Planungszeitraum erstreckt sich, je nach Branche und Unternehmensstrategie, von wenigen Monaten über maximal zwei Jahre. Der Schwerpunkt der Programmplanung ist stark vom Betriebstyp (siehe Kapitel 3) abhängig. Während bei einer Produktion für den kundenanonymen Markt auf Lager (MTS) die Ermittlung des zukünftigen Bedarfs mit Hilfe statistischer Methoden erfolgt, kann bei Bestellproduktion auf bereits vorliegende Kundenaufträge zurückgegriffen werden.<sup>16</sup> Zur Reduktion der Komplexität erfolgt die Planung mit zu Gruppen verdichteten Daten oder repräsentativen Gruppenvertretern.<sup>17</sup>

In der Literatur existieren unterschiedlichste Aufgabengliederungen der Absatz- und Produktionsprogrammplanung. Unabhängig von Konzept und Vorgehensweise werden folgende grundlegende Probleme behandelt:

- Ermittlung des Absatzpotenzials
- Ermittlung des ergebnismaximierenden Programms und deren Mengen unter
- Berücksichtigung zur Verfügung stehender Ressourcen

Die Ermittlung zukünftig absetzbarer Primärbedarfsmengen erfolgt im Rahmen der Absatzplanung (Demand Planning<sup>18</sup>)<sup>19</sup>. Aus dem Gebiet der Statistik stehen zahlreiche Prognoseverfahren zur Ermittlung zukünftigen Bedarfs zur Verfügung. Man unterscheidet univariate Prognoseverfahren (Zeitreihenanalysen), welche sich zur kurzfristigen Vorhersage künftigen Nachfrageverhaltens eignen, und multivariate Prognoseverfahren, welche kausale Zusammenhänge in die Prognose miteinbeziehen.<sup>20</sup> Folgende Verfahren der Statistik finden häufig Anwendung zur Vorhersage künftiger Nachfrage:<sup>21</sup>

- ungewichtete oder gewichtete gleitende Mittelwertbildung

---

<sup>14</sup> Vgl. Domschke et al. (1993), S.9 ff.

<sup>15</sup> Bedarf an verkaufsfähigen Erzeugnissen (vgl. Wiendahl (1989), S.294)

<sup>16</sup> Vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.197.

<sup>17</sup> Vgl. Schuh (2006), S.38.

<sup>18</sup> Vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S.142.

<sup>19</sup> Vgl. Schuh (2006), S.40.

<sup>20</sup> Vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.198 ff.

<sup>21</sup> Vgl. Schuh (2006), S.41.

- exponentielle Glättung erster und zweiter Ordnung
- Verfahren nach Winters
- Hochrechnung (Extrapolation)
- Verfahren nach Holt
- (Multiple) lineare Regressionsrechnung

Der Nettoprimärbedarf, welcher sich aus Primärbedarf unter Berücksichtigung auf Lager liegender Endprodukte ermittelt, wird im Rahmen der Beschäftigungsglättung (Ressourcengrobplanung) mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen abgeglichen. Der Abgleich zwischen Nachfrage und Ressourcen erfolgt nach den Prinzipien der Synchronisation und Emanzipation. Während bei Synchronisation unter schwankender Auslastung die Produktionsmenge an die Nachfrage angepasst ist, zeigt die emanzipierte Produktion eine konstante Auslastung der Ressourcen bei schwankendem Lagerbestand (siehe Abbildung 4.2). In der Praxis stellt sich eine Mischung dieser Prinzipien ein. Das Operations Research bietet eine Fülle an Verfahren und Modellen, wie beispielsweise die lineare Programmierung, um Entscheidungsprobleme der Abstimmung von Kapazitätsbedarf und -nachfrage zu lösen.<sup>22,23</sup>

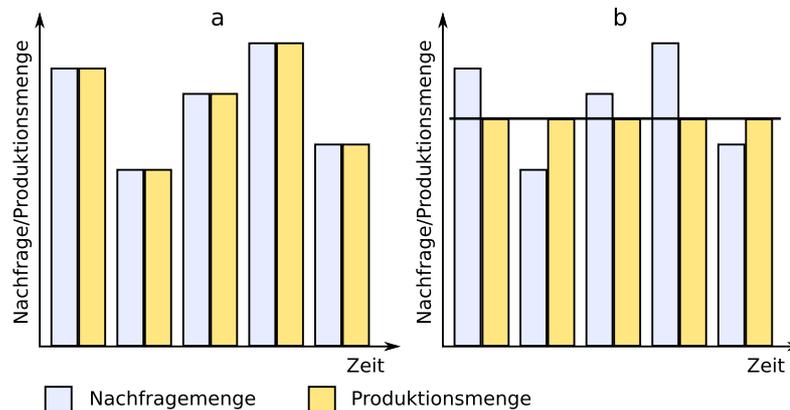


Abbildung 4.2: a) Synchronisation und b) Emanzipation von Produktion und Nachfrage (in Anlehnung an Günther/Tempelmeier (2005), S.152)

### 4.3.2 Materialwirtschaft

Zentraler Inhalt der Materialwirtschaft ist die Ermittlung des Bedarfs nach Art und Menge an fremdzubeziehenden und eigenzufertigenden Gütern (Sekundärbedarf<sup>24</sup> und Tertiärbedarf<sup>25</sup>), die zur Herstellung des Primärbedarfes erforderlich sind. Folgende Aufgaben werden im Rahmen der Materialwirtschaft behandelt:<sup>26</sup>

- Bedarfsermittlung
- Losgrößenplanung

<sup>22</sup> Vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.201 ff.

<sup>23</sup> Vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S.151 ff.

<sup>24</sup> Bedarf an Rohstoffen, Teilen und Gruppen zur Fertigung des Primärbedarfes (vgl. Wiendahl (1989), S.294)

<sup>25</sup> Bedarf an Betriebs- und Hilfsstoffen (vgl. Wiendahl (1989), S.294)

<sup>26</sup> Vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.221.

- Weitere Aufgaben (Bestandsführung, Lieferterminbestimmung, Kundenauftragsverwaltung, Vorlaufsteuerung)<sup>27</sup>

### Bedarfsermittlung

Zur Ermittlung des Sekundärbedarfs stehen grundsätzlich folgende drei Methoden zur Verfügung.

- Deterministische (bedarfsgesteuerte, programmgesteuerte) Bedarfsermittlung
- Stochastische (verbrauchsgesteuerte) Bedarfsermittlung
- Heuristische Bedarfsermittlung

Die Bestimmung des Sekundärbedarfs im Zuge der deterministischen Bedarfsermittlung erfolgt durch Auflösung des Primärbedarfs mit Hilfe von Erzeugnisstrukturdaten (Stückliste, Gozinto-Graf). Die stochastische Bedarfsermittlung stützt sich auf die Prognose des künftigen Bedarfs mit Hilfe des Verbrauchs vergangener Perioden. Als heuristische Bedarfsermittlung bezeichnet man die Schätzung durch Vergleich ähnlicher Materialien oder Erzeugnisse oder aufgrund von Erfahrung und Vermutungen. Welches Verfahren zum Einsatz kommt, hängt im Wesentlichen von den zur Verfügung stehenden Daten der Bedarfsermittlung sowie vom Wert der Bedarfsart ab. Die ABC-Analyse wird häufig zur Entscheidungshilfe herangezogen.

Des Weiteren unterscheidet man zwischen Brutto- und Nettobedarf. Unter Bruttobedarf versteht man den Primärbedarf laut Produktionsprogramm und den daraus abgeleiteten Sekundärbedarf, um etwaige Ersatzteile erweitert. Der Nettobedarf errechnet sich aus der Differenz von Bruttobedarf und disponiblen Lagerstand.<sup>28</sup>

### Losgrößenplanung

Die Losgrößenplanung dient der Ermittlung der Auflagengröße und des Auflagenzeitpunktes des erforderlichen Nettobedarfs jeder Produktkomponente unter dem Aspekt der Kostenminimierung und der Durchlaufzeitminimierung sowie der Bedingung der rechtzeitigen Verfügbarkeit. Unter dem Aspekt der Kostenminimierung stehen einander Fixkosten der Maschineneinrichtung (Eigenfertigung) bzw. bestellfixe Kosten (Fremdbezug) und variable Lager- und Kapitalbindungskosten gegenüber. Die Durchlaufzeit setzt sich aus Rüst- und Bearbeitungszeit des Loses zusammen. Ist das Fertigungslos sehr klein gewählt, so stellt sich ein Zeitverlust aufgrund häufigen Umrüstens ein. Bei sehr großen Fertigungslosen hingegen steigt die Durchlaufzeit bedingt durch die Bearbeitungszeit.<sup>29</sup>

Die Komplexität des Losgrößenproblems besteht in den umfangreichen Interdependenzen, die an das Bedarfsgut knüpfen, wie beispielsweise die Abhängigkeit zwischen den Dispositionsstufen (Produktstruktur), beschränkte Kapazitäten, etc.<sup>30</sup> Diese Abhängigkeiten werden in den

---

<sup>27</sup> Vgl. Matyas (2001), S.129.

<sup>28</sup> Vgl. Wiendahl (1989), S.295 ff.

<sup>29</sup> Vgl. Vahrenkamp (2004), S.173 ff.

<sup>30</sup> Vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S.192 ff.

verschiedenen Losgrößenmodellen in unterschiedlichem Ausmaß berücksichtigt. Losgrößenmodelle können grundsätzlich als einstufig oder mehrstufig, stochastisch oder deterministisch, statisch oder dynamisch, Ein- oder Mehrproduktmodell charakterisiert werden.<sup>31</sup>

Folgende Aufzählung beinhaltet exemplarisch Verfahren zur Lösung einstufiger Einproduktlosgrößenmodelle:

- Wochenlos, Richtlos, Eindeckzeitlos
- Andler'sche Losgröße (statisches Modell)
- Verfahren von Wagner/Whitin (dynamisches Modell)
- Silver-Meal-Verfahren (dynamisches Modell)
- Groff-Verfahren (dynamisches Modell)

### 4.3.3 Zeitwirtschaft

Die Zeitwirtschaft beinhaltet die zeitliche und kapazitätsmäßige Planung der Fertigung der im Zuge der Materialwirtschaft ermittelten Bedarfsmengen. Dies erfolgt im Rahmen der Durchlaufterminierung, der Kapazitätsterminierung und der Reihenfolgeplanung.

#### Durchlaufterminierung

Die Durchlaufterminierung dient der Ermittlung von Start- und Endterminen sowie der Durchlaufzeit der Fertigung unter Berücksichtigung der technologischen Arbeitsabfolge. In der Durchlaufterminierung bleiben Kapazitätsrestriktionen noch unberücksichtigt. Die Netzplantechnik ist ein häufig verwendetes Werkzeug zur Durchlaufterminierung. Der Netzplan bildet die technologische Arbeitsabfolge ab und beinhaltet die Durchlaufzeit<sup>32</sup> jedes Arbeitsschritts. Man unterscheidet drei Prinzipien der Durchlaufterminierung:<sup>33</sup>

- Vorwärtsterminierung: Ermittlung des frühesten Endzeitpunkts
- Rückwärtsterminierung: Ermittlung des spätesten Startzeitpunkts
- Mittelpunktsterminierung: Kombination von Vorwärts- und Rückwärtsterminierung (besondere Berücksichtigung von Engpassmaschinen)

#### Kapazitätsterminierung

Die Durchlaufterminierung geht von unbeschränkten Kapazitäten aus, daher erfolgt im Zuge der Kapazitätsbedarfsrechnung die Belastung von einzelnen Kapazitäten oder Kapazitätsgruppen. Die Gegenüberstellung von Kapazitätsangebot und -nachfrage ergibt das Belastungsprofil. Zeigt das Belastungsprofil einen Engpass bzw. freie Kapazitäten, so besteht die Möglichkeit der Abstimmung der Kapazitäten. Ziel der Kapazitätsabstimmung ist eine möglichst gleichmäßig hohe Auslastung der Kapazitäten ohne Beeinträchtigung des Auftragsendtermins. Es bestehen folgende Möglichkeiten der Kapazitätsabstimmung:

---

<sup>31</sup> Vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.231 ff.

<sup>32</sup> Summe aus Bearbeitungszeit, Rüstzeit, Wartezeit und Transportzeit (vgl. Vahrenkamp (2004), S.198 )

<sup>33</sup> Vgl. Schuh (2006), S.46 ff.

- Kapazitätsabgleich: Zeitliche Verschiebung der Kapazitätsnachfrage
- Nachfrageanpassung: Verringerung des Bedarfs durch Anpassung der Nachfrage (Auswärtsvergabe, Verzicht auf Aufträge)
- Kapazitätsanpassung: Anpassung des Kapazitätsangebots an die Nachfrage

Weiters besteht die Möglichkeit der Fremdvergabe von Aufträgen, um die Überlastung der Kapazitäten zu beseitigen. Die Anpassung der Kapazitäten an die Nachfrage kann im Zuge von Überstunden, Einführung einer weiteren Arbeitsschicht, Kapazitätserweiterung durch Zukauf oder auch Erhöhung der Intensität zu Lasten der Qualität erfolgen.<sup>34,35</sup>

### Reihenfolgeplanung

Aufgabe der Reihenfolgeplanung ist die Festlegung der Bearbeitungsfolge konkurrierender Fertigungsaufträge für jede Kapazitätseinheit. Folgende Ziele sind für die Reihenfolgeplanung von zentraler Bedeutung:<sup>36</sup>

- Einhaltung vorgegebener Fertigstellungstermine
- Minimierung der Durchlaufzeit bzw. Zykluszeit
- Maximierung der Kapazitätsauslastung bzw. Minimierung der Leerzeiten<sup>37</sup>
- Minimierung der (reihenfolgeabhängigen) Rüstzeit<sup>38</sup>

Die Literatur stellt eine umfangreiche Auswahl an Entscheidungsmodellen zur Lösung des Problems der Reihenfolgeplanung und Maschinenbelegung zur Verfügung. Die Auswahl des Modells hängt wesentlich vom Betriebstyp (siehe Kapitel 3) ab, wobei man zwischen folgenden Problemen unterscheidet:

- Flow-Shop-Problem: Fließfertigung, Maschinenfolge aller Aufträge ident
- Job-Shop-Problem: Werkstattfertigung, Maschinenfolge auftragsindividuell
- Open-Shop-Problem: Werkstattfertigung, Maschinenfolge beliebig

In der Praxis werden häufig heuristische Verfahren der Reihenfolgeplanung, wie Prioritätsregeln, eingesetzt. Folgende Aufzählung beinhaltet eine Auswahl der bekanntesten Prioritätsregeln.<sup>39,40</sup>

- First-In-First-Out (FIFO)
- Operationszeitregeln: Kürzeste Operationszeit (KOZ), Längste Operationszeit (LOZ)
- Restbearbeitungszeitregeln: Kleinste Restbearbeitungszeit (KRB), Größte Restbearbeitungszeit (GRB)
- Lieferterminregel

---

<sup>34</sup> Vgl. Matyas (2001), S.130.

<sup>35</sup> Vgl. Vahrenkamp (2004), S.202 ff.

<sup>36</sup> Vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.254.

<sup>37</sup> Wartezeit einer Maschine auf den nächsten Auftrag (starving) (vgl. Dyckhoff/Spengler (2007), S.257)

<sup>38</sup> Vgl. Vahrenkamp (2004), S.207.

<sup>39</sup> Vgl. Vahrenkamp (2004), S.222.

<sup>40</sup> Vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S.224.

- Rüstzeitregel
- Kapitalbindungsregel

#### 4.3.4 Produktionssteuerung

Der Produktionssteuerung obliegt die Umsetzung der Fertigungspläne. Funktionen der Produktionssteuerung werden von PPS- und ERP-Systemen im Allgemeinen nicht mehr unterstützt. Die Produktionssteuerung umfasst folgende Aufgaben:

- Auftragsveranlassung oder -freigabe
- Auftragsüberwachung
- Betriebsdatenerfassung

Im Zuge der Auftragsveranlassung wird die Verfügbarkeit der erforderlichen Ressourcen nochmals überprüft. Anschließend erfolgt die Erstellung der Auftragspapiere sowie die Zuordnung zu Maschinen und Arbeitsplätzen durch den Belegungs- und Terminplan. Zur tatsächlichen Freigabe des Auftrages existieren eine Vielzahl von Verfahren und Konzepten, welche in Abschnitt 4.4 exemplarisch angeführt sind.

Die Überwachung des Auftragsfortschritts in Bezug auf Menge, Termin, Qualität sowie Kapazitäten werden unter dem Begriff der Auftragsüberwachung zusammengefasst. Sie ermöglicht die Anpassung des Produktionsablaufes an geänderte Produktionsbedingungen, wie beispielsweise Kapazitätsausfälle. Dies erfordert die rechtzeitige Erhebung der Betriebsdaten, welche im Zuge der Betriebsdatenerfassung erfolgt. Hier werden Daten bezüglich Personal, Auftrag, Bestände, Maschinen, Qualität und Instandhaltung eruiert. Betreffend der Aktualität der Daten unterscheidet man die periodische und die ereignisorientierte Erfassung.

### 4.4 Konzepte

Zur Planung und Steuerung der Produktion existieren eine Vielfalt unterschiedlichster Konzepte, Ansätze und Philosophien, die den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würden. Aus diesem Grund wird zunächst in Abschnitt 4.4.1 auf grundsätzliche organisatorische Differenzierungskriterien der Konzepte eingegangen. Aufgrund ihres unterschiedlichen Ansatzes wird anschließend auf die umfangreichen Konzepte Just-in-Time und Manufacturing Resource Planning eingegangen. Spezielle Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung behandeln spezielle Teilbereiche. In Abschnitt 4.4.3 sind exemplarisch die Konzepte Material Requirements Planning und Kanban erläutert. Für weitere Konzepte der PPS sei auf Lödding (2005), Matyas (2001) und Schönsleben (2007) verwiesen.

#### 4.4.1 Organisationsformen

##### Verteilung der Entscheidungskompetenz

Je nach Verteilung der Planungs- und Steuerungskompetenzen lassen sich drei Organisationsformen von PPS-Systemen unterscheiden:

- Zentrales PPS-Konzept
- Dezentrales PPS-Konzept
- Hybrides PPS-Konzept

Ein zentrales PPS-Konzept ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Planungs- und Steuerungsaufgaben auf zentraler Ebene ausgeführt werden. Ein dezentrales Konzept zeichnet sich durch keinerlei Vorgaben von zentraler Stelle aus. Alle dispositiven Aufgaben werden an die ausführende Ebene übergeben. In einem hybriden oder partial zentralen Konzept sind die Planungs- und Entscheidungskompetenzen auf mindestens zwei Ebenen aufgeteilt. Entscheidungen, die bereichsübergreifenden Überblick erfordern, werden von zentraler Stelle bestimmt und als Handlungsrahmen an die ausführenden Stellen vorgegeben.<sup>41,42</sup>

### Push- und Pull-Prinzip

In der Produktionsplanung und -steuerung versteht man unter Push-Prinzip (Bring-Prinzip) die deterministische Vorwärtsplanung der Fertigungsaufträge. PPS-Konzepte, die nach dem Push-Prinzip arbeiten, wie das in Abschnitt 4.4.2 beschriebene MRPII-Konzept, sind zentrale Sukzessivplanungskonzepte, die durch möglichst genaue Vorausplanung des Start- und Endtermins den Produktionsauftrag in den Produktionsprozess hineindrücken.<sup>43</sup>

Als Pull-Prinzip (Hol-Prinzip) bezeichnet man die direkte oder indirekte Auslösung der Produktionsvorgänge durch einen eingetroffenen Auftrag. Es zielt darauf ab, durch Veränderung der strukturellen und technischen Bedingungen der Produktion das Problem an sich zu beseitigen, anstelle der lediglichen Verbesserung des Problemlösungsverfahrens.<sup>44</sup>

## 4.4.2 Umfassende Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung

### Just-in-Time

Just-in-Time (JiT) ist ein im Rahmen des Toyota-Produktionssystems entwickeltes Konzept, welches im Wesentlichen die Bereitstellung von Ressourcen zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Menge am richtigen Ort gewährleistet.<sup>45</sup> JiT dient der Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit durch geringere Kapitalbindung, Eliminierung von Verschwendung<sup>46</sup> und die Ausrichtung der Produktion an die Marktbedürfnisse. Dies wird durch folgende Ziele erreicht:<sup>47</sup>

- Verringerung der Materialbestände
- Verringerung der Durchlaufzeiten
- Minimierung der Rüstzeiten<sup>48</sup>

---

<sup>41</sup> Vgl. Schneider et al. (2005), S.17.

<sup>42</sup> Vgl. Adam (1998), S.614.

<sup>43</sup> Vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S.307.

<sup>44</sup> Vgl. Günther/Tempelmeier (2005), S.315.

<sup>45</sup> Vgl. Syska (2006), S.65.

<sup>46</sup> Als Verschwendung (jap. „muda“) werden alle Tätigkeiten verstanden, die aus der Sicht des Kunden nicht wertschöpfend sind (vgl. Schönsleben (2007), S.311)

<sup>47</sup> Vgl. Matyas (2001), S.112 ff.

<sup>48</sup> Vgl. Schönsleben (2007), S.312.

- Erhöhung der Arbeitsproduktivität
- Erhöhung der Flexibilität

Die Reduktion von Beständen ist ein zentrales Ziel der JiT-Philosophie, da es störanfällige Prozesse, unabgestimmte Kapazitäten, mangelnde Flexibilität, Ausschuss, unzuverlässige Lieferanten und mangelhafte Liefertreue aufdeckt.<sup>49</sup>

### Manufacturing Resource Planning

Manufacturing Resource Planning (MRPII) ist ein umfassendes Planungs- und Steuerungskonzept, welches häufig bei Programm- und Lagerfertigung zum Einsatz kommt. Es beinhaltet die innerbetriebliche und außerbetriebliche Logistik von der Beschaffung des Rohmaterials bis zum Absatz der Produkte. MRPII ist eine Erweiterung des MRP-Konzepts und der bekannteste Vertreter zentralisierter PPS-Systeme.<sup>50,51</sup>

Das in Abbildung 4.3 dargestellte Konzept besitzt einen hierarchischen Aufbau und arbeitet nach dem Prinzip der Sukzessivplanung. Auf langfristiger Ebene erfolgt die Absatz- und Produktionsplanung (Sales & Operations Planning), welche eng verbunden mit der Geschäftsplanung (Business Planning) ist. Das Bedarfsmanagement (Demand Management) beschäftigt sich mit der Planung des in Gruppen aggregierten Bedarfs infolge von Absatzprognosen und Kundenaufträgen. Darauf folgt unter Berücksichtigung der groben Kapazitätsplanung (Rough-cut Capacity Planning) die Produktionsprogrammplanung (Master Production Scheduling).<sup>52</sup>

Die Ebene der mittelfristigen Planung beinhaltet die Materialbedarfsplanung (Material Requirements Planning) und die Kapazitätsbedarfsplanung (Capacity Requirements Planning). Das Produktionsprogramm ist die Grundlage für die Materialbedarfsplanung, welche der Ermittlung der Mengen an Rohstoffen und Zwischenprodukten dient. Die Planung der erforderlichen und vorhandenen Kapazitäten erfolgt in der Kapazitätsbedarfsplanung.

Die Fertigungssteuerung, oder auch Werkstattsteuerung (Shop Floor Control), befindet sich auf der operativen Ebene der Planung. Die Aufgaben der Fertigungssteuerung umfassen die Freigabe und Ausführung der Aufträge.

#### 4.4.3 Spezielle Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung

Spezielle Konzepte behandeln Teilprobleme der PPS und eignen sich abhängig von der Kompatibilität zur Kombination und Implementierung in umfangreiche Konzepte. Im Folgenden werden exemplarisch das MRP-Konzept und das Kanban-Konzept beschrieben. Beide Konzepte eignen sich zur Integration in das MRPII-Konzept, wobei durch MRP die Aufgaben der Materialwirtschaft und durch Kanban die der Zeitwirtschaft und Produktionssteuerung abgedeckt sind.

---

<sup>49</sup> Vgl. Schönsleben (2007), S.313.

<sup>50</sup> Vgl. Matyas (2001), S.110.

<sup>51</sup> Vgl. Voigt (2007), S.637.

<sup>52</sup> Vgl. Kurbel (1999), S.113.

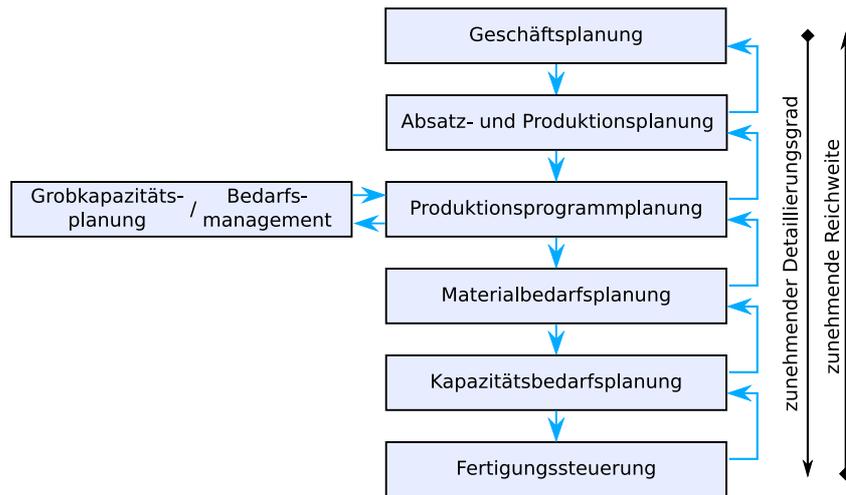


Abbildung 4.3: Struktur des MRPII-Konzepts (in Anlehnung an Kurbel (1999), S.112)

### Material Requirements Planning

Material Requirements Planning (MRP) ist ein prognoseorientiertes Konzept des Materialmanagement, welches nach dem Push-Prinzip arbeitet und sich aufgrund der Unabhängigkeit von der Produktionsaufgabe für die Massen-, Serien- und Einzelfertigung eignet.<sup>53,54</sup> Für einen Dispositionslauf sind folgende Inputdaten nötig:

- Produktionsprogramm (Master Production Schedule (MPS))
- Erzeugnisstruktur (Stückliste, Bill of Materials (BoM))
- Disponibler Lagerbestand

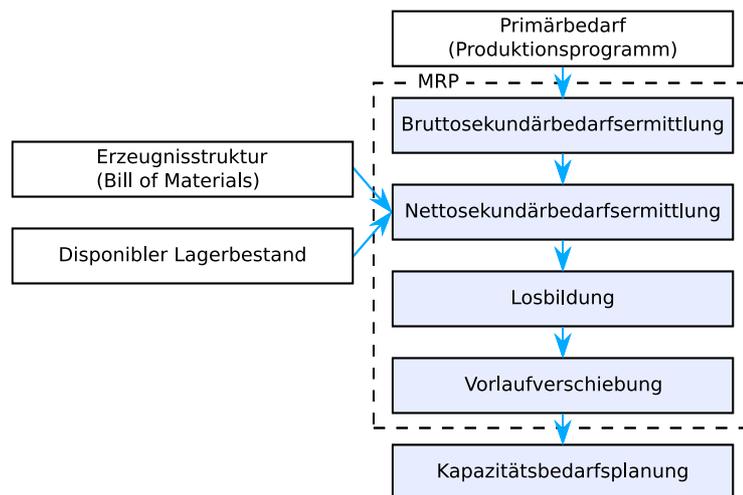


Abbildung 4.4: MRP-Ablauf (in Anlehnung an Neumann (1996), S.94)

<sup>53</sup> Vgl. Matyas (2001), S.109.

<sup>54</sup> Vgl. Jodlbauer (2007), S.133.

Wie aus Abbildung 4.4 ersichtlich, beginnt der Dispositionslauf einer Planungsperiode mit der Auflösung des Primärbedarfs in den Sekundärbedarf mit Hilfe der Bill of Materials. Der Nettobedarf ermittelt sich aus dem Bruttobedarf unter Berücksichtigung des disponiblen Lagerbestandes.<sup>55</sup> Entsprechend der Lospolitik folgt die Zusammenfassung des Nettosekundärbedarfs zu Losen.<sup>56</sup> Die Vorlaufzeit gewährleistet die Verfügbarkeit des Bedarfs zum Zeitpunkt der Entstehung. Bei Eigenfertigung entspricht die Vorlaufzeit der Zeit von der Auftragsfreigabe bis zur Fertigstellung.<sup>57</sup> Sollte der Bedarf fremd gefertigt werden, so ist die Wiederbeschaffungszeit heranzuziehen.<sup>58</sup> Der Zeitpunkt der Auftrags- bzw. Bestellfreigabe wird durch Rückwärtsterminierung ermittelt. Um Störungen entgegenzuwirken, sind im MRP-Konzept sowohl Mengen- als auch Zeitpuffer vorgesehen.

## Kanban

Kanban ist ein verbrauchsgesteuertes, dezentrales Konzept der Produktionssteuerung. Es zielt auf die Minimierung von Materialbeständen, Durchlaufzeiten und zentralem Steueraufwand unter Verwendung des Pull-Prinzips ab. Als Informationsträger dienen Kanbans (japanisch: Karte, Schild), welche folgende Informationen enthalten:

- Name und Identifikationsnummer des Artikels
- Arbeitsanweisung, Werkzeuge, Prozessparameter
- Skizze der Teile
- Behälterart und Anzahl der Teile pro Behälter
- Herkunft (Abteilung oder Lieferant)
- Empfänger (Abteilung oder Kunde)
- Abholzeit
- Gegebenenfalls Zusatzinformationen

Bei Eintreffen eines Kanbans beginnt die Herstellung des angegebenen Artikels (Quelle). Ist die Stückzahl erreicht, wird die Karte dem Behälter beigelegt und zur Empfängeradresse (Senke) gebracht. Sobald der Mindestbestand erreicht bzw. unterschritten ist, wird der Kanban wieder zur Quelle zurückgeschickt. Somit wird ein sich selbst steuernder Regelkreis zwischen Materialquelle und -senke realisiert. Es stellt sich ein Materialfluss von Quelle zur Senke sowie ein Informationsfluss von Senke zur Quelle ein. Der in Umlauf befindliche Materialbestand wird mit Hilfe der Anzahl der ausgegebenen Kanbans geregelt.<sup>59,60</sup>

---

<sup>55</sup> verfügbarer Lagerbestand (physischer Lagerstand + geplante Zugänge – reservierter Bestand)

<sup>56</sup> Vgl. Neumann (1996), S.91 ff.

<sup>57</sup> Vgl. Schneider et al. (2005), S.101.

<sup>58</sup> Vgl. Wiendahl (1989), S.318.

<sup>59</sup> Vgl. Matyas (2001), S.115.

<sup>60</sup> Vgl. Syska (2006), S.68.

# 5 Modellbildung und Simulation

Menschen verwenden schon seit jeher Modell und Simulation zur Analyse der Realität. Denkmodelle dienen dazu, Pläne zu entwerfen, zur Mitteilung und Diskussion. Bauwerke, Boote und dergleichen wurden vor ihrer Fertigung als maßstabsgetreues Modell errichtet, um die Konstruktion mittels Experimente zu prüfen.<sup>1</sup>

In Kapitel 7 werden Modellbildung und Simulation als Methoden zur Analyse der Produktionsplanung und -steuerung der Lasselsberger, a.s. eingesetzt. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel oben genannte Methoden erläutert. In Abschnitt 5.1 sind Begriffe im Zusammenhang mit der Modellbildung und Simulation erläutert und eine Auswahl an Simulationsmethoden beschrieben. Anschließend ist in Kapitel 5.2 das Vorgehen bei der Durchführung einer Simulationsstudie dokumentiert. Abschnitt 5.3 gibt einen Überblick über die Simulationssoftware, im Speziellen über Incontrol Enterprise Dynamics. Abschließend wird in Abschnitt 5.4 eine Auswahl an Anwendungsmöglichkeiten in der Produktionsplanung und -steuerung angeführt.

## 5.1 Grundlagen

### 5.1.1 Begriffe und Inhalt

Das Wort “Simulieren” stammt vom lateinischen Wort *simulare* ab, dessen Bedeutung “ähnlich” ist. Allgemein versteht man darunter das Vortäuschen einer Krankheit. Aus technischer Sicht erhält es die Bedeutung “wirkungsgetreu nachahmen”.<sup>2</sup> Bevor nun weiter auf den Simulationsbegriff eingegangen wird, sollen an dieser Stelle, beginnend mit dem Begriff Prozess, weitere Begriffe erläutert werden, die zum Verständnis des Inhalts der Simulation beitragen werden.

Ein Prozess ist ein Phänomen, das zeitlich-räumlichen Veränderungen unterworfen ist. Der Prozess ist dadurch gekennzeichnet, dass er ein oder mehrere Größen besitzt (Prozessvariablen), die sich in Abhängigkeit von Zeit und/oder vom Ort verändern.

Ein System ist ein durch willkürliche Systemgrenzen von der Umwelt gedanklich abgegrenzter Ausschnitt einer realen Gegebenheit. Systeme sind charakterisiert durch ihre Elemente und deren Beziehung zueinander sowie deren Beziehung zur Umwelt. Systemgrößen unterscheiden sich in Prozessvariablen und Systemparameter. Prozessvariablen ändern sich in Abhängigkeit von den Zeit- und/oder Raumparametern  $t$  bzw.  $\mathbf{r}$ . Eine weitere Unterscheidung besteht in der

---

<sup>1</sup> Vgl. Bossel (1992), S.11.

<sup>2</sup> Vgl. Brockhaus (1993), S.302.

unabhängiger (Eingangsgrößen) und abhängiger Größen (Ausgangsgrößen). Eingangsgrößen werden nach ihrer Beeinflussbarkeit in Steuer- und Störgrößen differenziert.<sup>3,4</sup>

Nachdem die Begriffe Prozess und System diskutiert wurden, soll für die Definition des Modell-Begriffs auf die VDI Richtlinie 3633, Blatt 1, zurückgegriffen werden.

*“Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.”<sup>5</sup>*

Aus dem Zweck eines Modells und der Vielfalt an zugrundeliegenden Systemen lassen sich umfangreiche Modellklassifikationen vornehmen. Wobei die Klassifikation nach dem Modellzweck in der Literatur unterschiedlich dargelegt ist. Werners (2006) unterteilt beispielsweise in Beschreibungs-, Erklärungs- und Prognosemodelle sowie Entscheidungsmodelle.<sup>6</sup> Da das gewählte Modell zur Abbildung eines Systems in engem Zusammenhang mit der Simulationemethode steht, ist in Tabelle 5.1 eine Auswahl an Modellklassifikationen zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Modellklassifikation (vgl. Bandte (2007), S.200 ff)

Merkmal	Ausprägung
Darstellungsform	Ikonische Modelle (Landkarte) Realmodelle (Windkanal) Verbalmodelle (Synonym) Formalmodelle (Programmiercode)
Modellzweck	Beschreibungsmodell Erklärungsmodell Prognosemodell
Zeitfortschritt/-stabilität	Statisches Modell Dynamisches Modell Diskrete Modelle Kontinuierliche Modelle
Lösungsverfahren	Analytisches Modell Heuristisches Modell
Folgerungsmethode	Deterministisches Modell Stochastisches Modell
Funktion	Lineare Modelle Nichtlineare Modelle

Der Begriff Simulation findet in der Literatur sehr vielfältig Verwendung. Zusammenfassend versteht man unter Simulation das Experimentieren mit einem dynamischen Modell, um Auskunft über das Systemverhalten zu erlangen. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) definiert Simulation wie folgt:

<sup>3</sup> Vgl. Kramer (1998), S.11 ff.

<sup>4</sup> Vgl. Werners (2006), S.248.

<sup>5</sup> Vgl. VDI (2000), S.3.

<sup>6</sup> Vgl. Werners (2006), S.3.

*“Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.”<sup>7</sup>*

Die Simulation beschränkte sich lange Zeit auf überwiegend technische Bereiche. Ein klassisches Simulationsproblem bestand in der Lösung aerodynamischer Probleme mittels Windkanal als reales Modell. Durch den Anstieg der Rechenleistung fand die Simulation nicht nur im technischen, sondern auch im wirtschaftlichen und sozialen Bereich Verbreitung. Die Simulation ermöglicht aufgrund ihrer Ergebnisse die Bewertung von Lösungsalternativen. Sie ist nicht selbstoptimierend, sondern ermöglicht durch Experimentieren die Auswahl günstiger Varianten und gibt Aufschluss über das Systemverhalten. Die Simulation findet vor allem unter folgenden Rahmenbedingungen Anwendung:<sup>8,9,10</sup>

- Analytische Methoden sind zu komplex oder aufwändig
- Analytische Methoden sind nicht verfügbar
- Experimente sind zu komplex
- Experimente sind zu kostspielig
- Experimente sind zu gefährlich
- Experimente sind zu zeitaufwändig
- Experimente haben irreversible Konsequenzen
- Experimente sind ethisch nicht vertretbar
- Experimente verstoßen gegen Gesetze

### 5.1.2 Methoden der Simulation

Aus dem breiten Spektrum an Problemen und Anwendungsmöglichkeiten hat sich eine Vielfalt an Methoden entwickelt. Entsprechend der Modellklassifikation in Tabelle 5.1 lässt sich in statische und dynamische Simulation differenzieren. Im Folgenden werden die Monte-Carlo-Simulation als statische Methode sowie die kontinuierliche, diskrete und hybride Simulation als dynamische Methoden der Simulation erläutert.

#### Monte-Carlo-Simulation

Unter Monte-Carlo-Simulation wird eine Reihe von Methoden zusammengefasst, die in der Lage sind, statische Probleme durch den Einsatz von Zufallszahlen zu lösen. Sie stellt vor allem bei Problemen, bei denen mehrere Zufallsvariablen aufeinander treffen, eine Alternative zu analytischen Lösungsverfahren dar.<sup>11</sup> Die Namensgebung dieser Methode führt auf die Casinostadt Monte Carlo und die Analogie zwischen Roulette und der Ziehung von Stichproben aus einer Menge zurück.<sup>12</sup>

---

<sup>7</sup> Vgl. VDI (2000), S.2.

<sup>8</sup> Vgl. Domschke/Drexel (2005), S.223.

<sup>9</sup> Vgl. Bandte (2007), S.217.

<sup>10</sup> Vgl. Wenzel (2000), S.6.

<sup>11</sup> Vgl. Sauerbier (1999), S.30.

<sup>12</sup> Vgl. Domschke/Drexel (2005), S.224.

## Kontinuierliche Simulation

Unter kontinuierlicher Simulation versteht man die Modellierung und Analyse dynamischer Systeme, deren Zustand und Zeit sich kontinuierlich ändern. Grundsätzlich werden solche Systeme durch Differentialgleichungssysteme formalisiert und mittels numerischen Integrators simuliert. Diese Art der Formalisierung wird als Differential Equation System Specification (DESS) bezeichnet.<sup>13</sup> Kontinuierliche Simulationsmodelle sind deterministisch, aufgrund der Komplexität wird von einer analytischen Lösung jedoch abgesehen. Anwendungsgebiete finden sich hauptsächlich auf den Gebieten der Elektro- und Kommunikationstechnik, Physik und Mechanik.<sup>14</sup>

## Diskrete Simulation

Charakteristisch für eine diskrete Simulation ist, dass eine Änderung der Zustandsvariablen des Systems nur zu diskreten Zeitpunkten möglich ist. In der diskreten Simulation lassen sich folgende Ansätze unterscheiden:

- Zeitgesteuerte Simulation
- Ereignisorientierte Simulation

Im Falle der zeitgesteuerten Simulation erfolgt eine Zustandsänderung zu diskreten Zeitpunkten. Die Simulationszeit wird sprunghaft um ein konstantes Inkrement erhöht, wodurch sich bei entsprechend kleinem Inkrement ein quasi-kontinuierlicher Charakter ergibt.<sup>15</sup> Modelle zur Analyse mittels zeitgesteuerter Simulation gehören zur Klasse der Discrete Time System Specification (DTSS)-Modelle und können mittels Differenzgleichungen beschrieben werden.<sup>16</sup>

Einen wesentlichen Vorteil bezüglich der Rechenzeit besitzt demgegenüber die ereignisorientierte Simulation. Die Simulationszeit wird hier nicht inkrementell erhöht, sondern bis zum nächsten Ereignis. Abbildung 5.1 zeigt den schematischen Ablauf diskreter ereignisorientierter Simulation. Die farbig dargestellten Ereignisse sind bereits verarbeitet und führten zur Terminierung der schwarz gekennzeichneten Ereignisse. Diese können zu diesem Zeitpunkt noch unbekannte Ereignisse (weiß gekennzeichnet) verursachen. Ereignisse sind in einer Ereigniskette gelistet, welche die Reihenfolge und den Zustand der Systemvariable beinhaltet, in der das Ereignis im Eventprozessor bearbeitet wird. Treten zwei Ereignisse zum selben Zeitpunkt auf, entscheidet die zugeteilte Priorität über den Vorrang. Zeigler et al. (2000) bezeichnen Formalismen der Klasse diskreter ereignisorientierter Modelle als Discrete Event System Specification (DEVS)-Formalismen.<sup>17,18,19</sup>

Wie in Tabelle 5.1 dargelegt, unterscheidet man deterministische und stochastische Modelle. Sind die Werte der Systemvariablen bekannt oder exakt ermittelbar, so handelt es sich um deterministische Simulation. Unterliegen eine oder mehrere Systemgrößen jedoch dem

---

<sup>13</sup> Vgl. Zeigler et al. (2000), S.6.

<sup>14</sup> Vgl. Domschke/Drexl (2005), S.225.

<sup>15</sup> Vgl. Wenzel (2000), S.8.

<sup>16</sup> Vgl. Zeigler et al. (2000), S.6.

<sup>17</sup> Vgl. Wenzel (2000), S.8.

<sup>18</sup> Vgl. Zeigler et al. (2000), S.6.

<sup>19</sup> Vgl. Junge (2007), S.41.

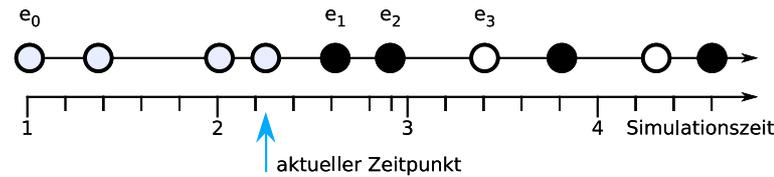


Abbildung 5.1: Schematischer Ablauf diskreter ereignisorientierter Simulation (vgl. Junge (2007), S.41)

Zufall, so spricht man von stochastischer Simulation.<sup>20</sup> Klassische Einsatzgebiete diskreter Simulation sind die Identifikation von Engpässen oder Auslegung von Kapazitäten in Warteschlangensystemen der Produktion, Logistik oder des Supply Chain Managements.<sup>21,22</sup>

### Hybride Simulation

Die diskrete bzw. kontinuierliche Modellierung von Systemen geht davon aus, dass ein System rein diskreter bzw. kontinuierlicher Natur ist. In vielen Fällen ist dies jedoch eine Abstraktion, die dem zweckdienlichen Einsatz des Modells widerspricht, da das reale System sowohl diskreter als auch kontinuierlicher Natur ist. Unter der Bezeichnung kombinierte oder hybride Simulation versteht man die Simulation teils diskreter und teils kontinuierlicher Modelle. Um den Ansprüchen einzelner Modellierungsformalismen genüge zu tun erfolgt die Modellierung des Systems in Submodellen, die entweder kontinuierlicher oder diskreter Natur sind.<sup>23</sup>

## 5.2 Aufbau einer Simulationsstudie

Aufgrund der Vielfalt an Simulationsarten und dem Belieben des Anwenders gibt es keinen allgemein gültigen Aufbau einer Simulationsstudie. Die Grundstruktur der Vorgehensweise ist jedoch in jeder Simulationsstudie gleich. Ein reales oder geplantes System wird abstrahiert und ein Simulationsmodell erstellt. Durch Experimentieren mit dem Simulationsmodell erhält man formale Ergebnisse. Durch die Interpretation der Ergebnisse können Schlussfolgerungen gezogen werden, die wiederum auf das reale oder geplante System anwendbar sind. Die Variation der Parameter ermöglicht die Ermittlung einer günstigen Lösung oder gibt Aufschluss über den Einfluss einzelner Parameter auf die Systemdynamik. Der prinzipielle Vorgang in einer Simulationsstudie ist in Abbildung 5.2 illustriert.<sup>24</sup>

Um den gewünschten Erfolg zu erzielen, sind im Ablauf einer Simulationsstudie eine Reihe von Zwischenschritten erforderlich, welche im Folgenden erläutert werden.

<sup>20</sup> Vgl. Biethahn et al. (1999), S.4.

<sup>21</sup> Vgl. Suhl/Mellouli (2006), S.14.

<sup>22</sup> Vgl. Bandte (2007), S.230.

<sup>23</sup> Vgl. Kerckhoffs et al. (1997), S.151 ff.

<sup>24</sup> Vgl. Wenzel (2000), S.5 ff.

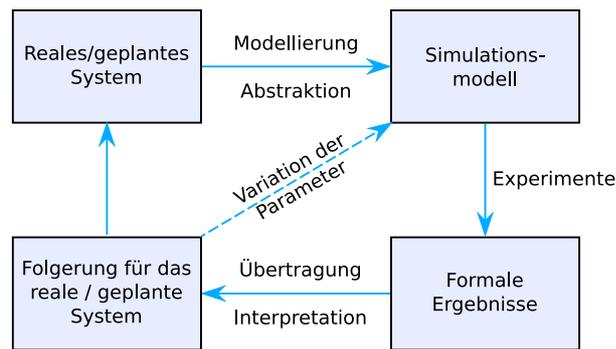


Abbildung 5.2: Durchführung einer Simulationsstudie (in Anlehnung an Wenzel (2000), S.5)

### Problem- und Zieldefinition

Die genaue Beschreibung des Problems und die Definition der Ziele und solcher, die es nicht sind, sind fundamental für den Erfolg der Simulationsstudie. Dies ist auch die Grundlage der Entscheidung bezüglich der Simulationswürdigkeit des Problems. Die Beurteilung erfolgt nach Kriterien wie Komplexität, Vielzahl von Einflüssen, Synchronisationsaspekt und Parallelitäten, Datenunsicherheit oder Unschärfe der Vorgaben. Ebenfalls zu berücksichtigen sind alternative bzw. analytische Lösungsmöglichkeiten.<sup>25,26</sup>

### Systemanalyse

Die Systemanalyse beinhaltet die Abgrenzung des relevanten Systems von der Umwelt, die Identifikation der Systemparameter sowie der abhängigen und unabhängigen Variablen und deren Relation zueinander. Des Weiteren sind die Systemelemente und deren Wechselwirkung zu ermitteln.<sup>27</sup>

### Konzeption

Das System wird gedanklich abstrahiert und entsprechend der Untersuchungsziele wird entschieden, welche Systemeigenschaften relevant und welche vernachlässigbar sind. Es erfolgt die eindeutige Zuordnung von Systemelementen zu Modellelementen. Das Ergebnis ist ein verbales und ein symbolisches Modell. Um ein valides Modell zu erhalten, ist es nötig, korrekte Informationen über das System zu erhalten. Zur Informationsgewinnung stehen vier potenzielle Quellen zur Verfügung:

- Dokumentationen
- Interviews, Expertenbefragung
- Beobachtungen
- Beteiligung, Mitwirkung

<sup>25</sup> Wenzel (2000), S.6, S.9.

<sup>26</sup> Kerckhoffs et al. (1997), S.39.

<sup>27</sup> Sauerbier (1999), S.11.

Für die grafische Darstellung des Modells finden beispielsweise Symbole, Grafen, Fluss- oder Prozessdiagramme oder die IDEF0-Methode Anwendung. Ein wichtiger Grundsatz der Modellierung lautet, das System so abstrakt wie möglich, aber so detailliert wie nötig, abzubilden. Nach Kerckhoffs et al. (1997) stehen zwei grundlegende Techniken der Abstraktion zur Verfügung:

- Reduktion
- Dekomposition

Die Vereinfachung oder Reduktion basiert darauf, ein Modell schrittweise zu verfeinern, bis die Auswirkung der Verfeinerung auf das Ergebnis vernachlässigbar ist. Im Zuge der Dekomposition wird das System so lange in Subsysteme unterteilt, bis der gewünschte Detaillierungsgrad erreicht ist.<sup>28</sup>

### Datenbasis

Die Datenbasis der Simulation stellt ein weiteres Glied in der Kette des Simulationsaufbaus dar, das den Erfolg der Simulationsstudie bestimmt. Tabelle 5.2 zeigt eine Auswahl der Daten, die für eine Materialflusssimulation erforderlich sind. Die Erhebung nicht vorhandener Daten ist mit großem Aufwand verbunden. Sind Daten nicht verfügbar, so muss oftmals auf Schätzungen zurückgegriffen werden. In vielen Fällen ist es zweckdienlicher, den Grad der Abstraktion zu erhöhen, als auf unrealistische Schätzungen zurückzugreifen.<sup>29,30</sup>

Tabelle 5.2: Auszug der erforderlichen Daten für eine Simulationsstudie (vgl. Kuhn et al. (1993), S.79)

Systemelement	erforderliche Daten
Fertigungseinrichtungen	Zykluszeiten Bearbeitungszeiten Kapazitäten
Produktionsdaten	Produktionsmengen Losgrößen Typenspektrum Typenverteilung Stücklisten
Ablauforganisation	Steuerungsstrategien Materialfluss Arbeitspläne
Ausfallszeiten	Standzeit von Werkzeugen Rüstzeiten Wartezeiten Störzeiten Arbeitspausen

---

<sup>28</sup> Vgl. Kerckhoffs et al. (1997), S.39 ff.

<sup>29</sup> Vgl. Kuhn et al. (1993), S.79.

<sup>30</sup> Vgl. Wenzel (2000), S.10.

## Modellierung

Um ein lauffähiges Modell zu schaffen, wird das konzeptionelle Modell in eine dem Simulator verständliche Sprache übersetzt. Auf dem Softwaremarkt gibt es ein umfangreiches Repertoire an Simulationssoftware, die diese Übersetzung auf unterschiedliche Weise unterstützen. Prinzipiell stehen grafische Modellierungswerkzeuge den Programmiersprachen gegenüber.<sup>31</sup>

## Verifikation

Die Verifikation ist die Gegenüberstellung von Modell und Modellspezifikationen. Sie ist die Qualitätskontrolle der Modellimplementierung und gewährleistet die korrekte Überführung des Konzepts in das Simulationsmodell (“building the model right”<sup>32</sup>). Nachdem die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei Unterdrückung der stochastischen Einflüsse (Festhalten der Zufallszahlen) festgestellt ist, eignen sich weiters folgende Methoden, um den Nachweis einer fehlerfreien Implementierung zu bringen:<sup>33</sup>

- **Structured Walk-Through:** Der Structured Walk-Through ist die zeilenweise Kontrolle des Programmcodes durch den Programmierer und gegebenenfalls die Rechtfertigung der Vorgehensweise gegenüber anderen Teammitgliedern, wodurch logische Programmierfehler aufgedeckt werden sollen.
- **Bottom-Up-Test (Modultest):** Beim Design des Simulationsmodells wird weitgehend ein Top-Down-Ansatz verwendet. Durch den Bottom-Up- oder Modultest wird die Programmfunktion vom einzelnen Modul aus überprüft. Durch Veränderung des Blickwinkels auf das Programm sollen Fehler transparent werden.
- **Tracing:** Tracing ist die laufende Ausgabe wichtiger Systemvariablen zur Überprüfung auf Unregelmäßigkeiten.
- **Profiler:** Profiler sind kleine Hilfsprogramme, die die Häufigkeit der Aufrufe und Laufzeiten von Unterprogrammen dokumentieren.
- **Vergleich mit Analytischen Modellen:** Ist für Teilprobleme des Simulationsmodells eine analytische Lösung möglich, so kann diese zur Verifikation des Simulationsmodells herangezogen werden.
- **Durchführung automatischer Konsistenzprüfungen:** Viele Variablen eines Simulationsmodells besitzen einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich ihrer Werte. Durch eine Konsistenzprüfung wird festgestellt, ob dieser Bereich eingehalten wird.
- **Verwendung grafischer Methoden:** Durch Visualisierung bzw. grafische Aufbereitung der Simulation ist eine optische Kontrolle des Simulationsablaufes möglich.

## Validierung

Nachdem die Verifikation sicherstellt, dass die Spezifikationen richtig umgesetzt wurden, kontrolliert die Validierung, ob die richtigen Spezifikationen festgelegt wurden (“building the

---

<sup>31</sup> Vgl. Kuhn et al. (1993), S.79.

<sup>32</sup> Balci (1988), zitiert aus Sauerbier (1999), S.12

<sup>33</sup> Vgl. Sauerbier (1999), S.105 ff.

right model”<sup>34</sup>). Es wird die Gültigkeit des Modells für den festgelegten Gültigkeitsbereich überprüft. Das Modell ist als Abbild des Realsystems geeignet, wenn die Abweichung von Simulation und Realität die Toleranz nicht überschreitet. Das Modell muss folgenden vier Gültigkeitskriterien entsprechen:<sup>35</sup>

- **Verhaltensgültigkeit:** Qualitative Übereinstimmung des dynamischen Verhaltens von Modell und Originalsystem
- **Strukturgültigkeit:** Übereinstimmung der Wirkstruktur zwischen Modell und Originalsystem
- **Empirische Gültigkeit:** Übereinstimmung der logischen Ergebnisse des Modells mit den empirischen Ergebnissen des Originalsystems
- **Anwendungsgültigkeit:** Übereinstimmung von Modellzweck und Anwenderanforderung mit dem Modell und der Simulationsmöglichkeit

Folgende Aufzählung zeigt eine Auswahl an Methoden der Validierung.<sup>36</sup>

- **Vergleich mit dem Realsystem:** Dies ist die am weitesten verbreitete Methode der Validierung und gewährleistet die empirische Gültigkeit des Modells. Die Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und der Realität dürfen die Toleranz nicht überschreiten.
- **Sensitivitätsanalyse:** Die Sensitivitätsanalyse lässt die Beurteilung der Modellreaktion bei Änderungen der Eingangsbedingungen zu. Somit sind die Verhaltensgültigkeit und die Stabilität des Modells überprüfbar.
- **Vergleich mit Annahmen und Theorien:** Ist das simulierte System nicht existent, so ist auf Annahmen und Theorien zurückzugreifen.
- **Vergleich mit analytischen Modellen:** Sind analytische Methoden verfügbar, so können diese zur Validierung des Simulationsmodells eingesetzt werden.
- **Vergleich mit Fremdsystemen:** Dient das Modell der Simulation eines geplanten Systems, existieren jedoch ähnliche Anlagen, so können diese ebenso zur Validierung herangezogen werden.
- **Einbeziehen von Experten:** Eine weitere Methode ist die Befragung von Experten (beispielsweise durch Delphi-Methode). Jedoch sind Aussagen jener, die unmittelbar an der Simulation beteiligt sind oder am Simulationsergebnis Anteil haben, kritisch zu betrachten.

## Versuchsplanung

Der Prozess der Simulation ist ein “trial and error”-Prozess. Durch Variation der Parameter sind alle Szenarien nachzustellen, die Aufschluss über die Fragestellung bieten. Im Rahmen der Simulation sind somit mehrere Simulationsläufe notwendig, wobei jeder Simulationslauf Zeitaufwand für den Anwender sowie Aufwand an Rechenzeit darstellt. Die Anzahl der relevanten Systemparameter hat hier wesentlichen Einfluss auf die Anzahl der Experimente. Um

---

<sup>34</sup> Balci (1988), zitiert aus Sauerbier (1999), S.12

<sup>35</sup> Vgl. Bossel (1992), S.36.

<sup>36</sup> Vgl. Sauerbier (1999), S.110 ff.

Tabelle 5.3: Klassifikation von Simulationsinstrumenten (vgl. Kuhn et al. (1993), S.288)

Ebene	Grundlage	Beispiel
0	Implementierungssprache	FORTRAN, PASCAL, C
1	Basiskomponenten	SIMULA, SMALLTALK
2	Komponenten spezifisch für Modellklassen	GPSS, SIMAN, SIMPRO
3	Komponenten spezifisch für Anwendungsbereich	GRAPHSIM, SIMPLE, DOSIMIS-3
4	Komponenten spezifisch für Teilgebiete eines Anwendungsbereiches	FAD, LASIM

den Aufwand möglichst gering zu halten, ist eine detaillierte Planung der Versuche vorzunehmen. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ist jedes Experiment mit einer hinreichenden Zahl an Wiederholungen durchzuführen, da es sich im Falle der diskreten, stochastischen Simulation um zufallsbehaftete Experimente handelt.<sup>37</sup>

### Interpretation

Zur Interpretation der Ergebnisse ist es erforderlich, die aus der Simulation gewonnenen Daten aufzubereiten. Dies kann tabellarisch erfolgen oder grafisch in Form von Kurven oder Histogrammen. Die aufbereiteten Daten geben Aufschluss über die grundsätzliche Systemdynamik und ermöglichen beispielsweise die Differenzierung zwischen terminierenden und nicht-terminierenden Systemen. Letztere lassen sich in stationäre und instationäre Systeme unterscheiden, wobei sich im Falle stationärer Systeme die Frage nach dem “steady-state” stellt. Des Weiteren ist die transiente Phase (Einschwingvorgang) bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen. Bevor aus den Ergebnissen der Simulation Folgerungen für das reale System geschlossen werden, sind diese unter Bedacht aller getroffenen Abstraktionen nochmals kritisch zu betrachten.<sup>38,39,40</sup>

## 5.3 Simulationssoftware

### 5.3.1 Klassifikation der Simulationsinstrumente

In der Literatur wird die Klassifikation von Simulationsinstrumenten häufig nach Ebenen vorgenommen. Simulationssoftware einer niederen Ebene zeichnet sich durch hohe Flexibilität und ein breites Anwendungsspektrum aus. Im Allgemeinen steigen mit der Ebene die Bedienungsfreundlichkeit und die Spezialisierung auf das Problem. Kuhn et al. (1993) trifft eine Unterteilung in vier Ebenen, welche in Tabelle 5.3 zusammengefasst sind.

Software der Ebene 0 weist keine simulationsspezifische Anpassungen auf. Auf Ebene 1 befindet sich Software, die wesentliche Eigenschaften eines Simulationsinstrumentes bereit stellt,

<sup>37</sup> Vgl. Kerckhoffs et al. (1997), S.44.

<sup>38</sup> Vgl. a. a. O., S.45.

<sup>39</sup> Vgl. Kuhn et al. (1993), S.82.

<sup>40</sup> Vgl. Sauerbier (1999), S.13 ff.

wie beispielsweise Klassenkonzepte oder Listenverwaltung. Hier sind unter anderem auch Implementierungssprachen wie  $C^{++}$  einzureihen. Auf Ebene 2 befinden sich die meisten Simulationsinstrumente. Software dieser Ebene zeichnet sich durch den beliebigen Anwendungsbereich aus. Ebene 3 beinhaltet Instrumente für spezielle Anwendungsbereiche (z.B.: Produktion und Logistik). Nach Kuhn et al. (1993) ist TAYLOR, Vorgänger der Simulationssoftware Incontrol Enterprise Dynamics (siehe Abschnitt 5.3.2), auf dieser Ebene anzusiedeln.<sup>41</sup> Simulationsinstrumente der Ebene 4 sind problemspezifisch auf Teilgebiete zugeschnitten.<sup>42</sup>

### 5.3.2 Incontrol Enterprise Dynamics

Die Implementierung des Simulationskonzepts aus Kapitel 7 wurde in der Simulationssoftware Incontrol Enterprise Dynamics (ED) vorgenommen. Zum besseren Verständnis der Implementierung wird an dieser Stelle ein Überblick über das Softwarepaket gegeben.

Das Unternehmen Incontrol Simulation Software B.V., mit Firmensitz in den Niederlanden, ist Anbieter von Simulationslösungen. Neben der Entwicklung und dem Vertrieb der Simulationssoftware ED bietet das Unternehmen weitere Services wie Training, Beratung und die Durchführung von Simulationsstudien an.

#### Einführung

ED ist ein ereignis- und objektorientiertes Softwarepaket zur Modellierung, Simulation, Visualisierung und Steuerung von diskreten, dynamischen Prozessen. Die Modellierung der Prozesse erfolgt im Allgemeinen grafisch mit Objekten, genannt Atome, welche in Standardbibliotheken zur Verfügung gestellt werden. Atome können materielle Objekte repräsentieren, wie beispielsweise Maschinen oder Transporteinrichtungen, aber auch nicht-materielle, wie Grafiken.<sup>43</sup>

Grundsätzlich ist ED vollständig in Atomen aufgebaut. Ein Atom besitzt vier Dimensionen, drei im Raum (x,y,z) und die Zeit. Jedes Atom kann andere Atome aufnehmen. Das Beispiel einer Maschine (*Server-Atom*), die ein Produkt aufnimmt (*Produkt-Atom*), illustriert dies besonders einfach. Es ist jedoch auch das Modell selbst ein Atom. Atome sind hierarchisch strukturiert. Beim Start des Programms wird das *Main-Atom* geladen, welches das einzige Atom ist, das nicht von einem anderen Atom aufgenommen werden kann. Üblicherweise hat das *Main-Atom* drei weitere Atome zum Inhalt, das *Application-Atom*, das *Library-Atom* und das *Modell-Atom*.<sup>44</sup> Abbildung 5.3 zeigt ED nach dem Öffnen mit der Menüleiste (oben), dem *Library-Tree* (links), dem Fenster *Modell-Layout* (Mitte), der Anzeige der Simulationszeit *Clock* (rechts, Mitte) und der *Run Control* (rechts unten).

Sind die vordefinierten Standard-Atome nicht ausreichend zur Modellierung des Simulationsmodells, so besteht die Möglichkeit, diese Standard-Atome mittels der Programmiersprache 4DScript an die individuellen Bedürfnisse anzupassen, oder auch neue Atome zu programmieren.

---

<sup>41</sup> Vgl. Kuhn et al. (1993), S.304.

<sup>42</sup> Vgl. Kuhn et al. (1993), S.288.

<sup>43</sup> Vgl. Incontrol (2006), S.6.

<sup>44</sup> Vgl. Pototschnig (2002), S.32.

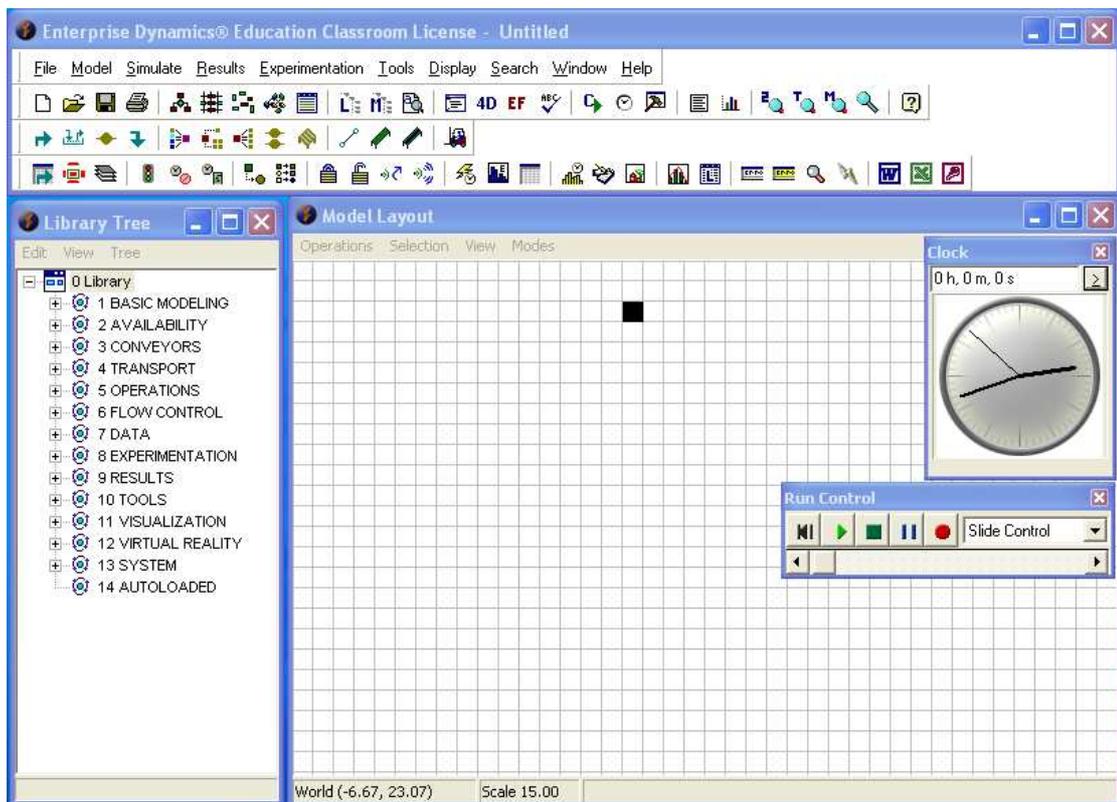


Abbildung 5.3: Oberfläche von Incontrol Enterprise Dynamics

## Modellierungsgrundlagen

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Modellierung in erster Linie durch Atome aus der Atombibliothek. Die Atombibliothek stellt ungefähr 100 Atome aus den Bereichen *Basic Modelling* (Quelle, Warteschlange, Bedienstation, Senke), *Availability*, *Conveyor* (Förderband), *Transport* (Gabelstapler) uvm. zur Verfügung. Im Folgenden sollen an einem einfachen Beispiel die Grundfunktionen erläutert werden. Abbildung 5.4 zeigt ein einfaches Warteschlangenmodell, bestehend aus folgenden Elementen:

- Quelle (“Source 1”): dient der Erzeugung von Produkt-Atomen;
- Warteschlange (“Queue 2”): dient der Zwischenlagerung von Produkt-Atomen;
- Bedienstation (“Server 3”): Produkt-Atome verweilen entsprechend der Bearbeitungszeit in einer Bedienstation;
- Senke (“Sink 4”): dient der Zerstörung von Produkt-Atomen;

Jedes Atom besitzt Ein- und Ausgangskanäle (*Channels*) sowie einen Zentralkanal (*Central Channel*). Über Ein- und Ausgangskanäle wird der Materialfluss bewerkstelligt. Der Zentralkanal dient zum Informationsaustausch. Im einfachen Warteschlangenbeispiel erzeugt die Quelle, entsprechend der definierten Zwischenankunftszeit, Produkte, und schickt diese durch Kanal 1 an die Warteschlange. Ist die Bedienstation verfügbar, so schickt die Warteschlange das Produkt unmittelbar an die Bedienstation weiter, andernfalls verweilt es in der Warteschlange, bis die Bedienstation verfügbar ist. Die Produkte verweilen in der Bedienstation entsprechend einer definierten Bearbeitungszeit und verlassen diese anschließend wieder durch den Kanal 1. Die Senke dient der Vernichtung der Produkte.

Jedes Atom besitzt eine bestimmte Charakteristik. Die wichtigsten Merkmale sind folgende:

- Identifikation und Beschreibung: Name, ID, Farbe, Icon, Mutter
- Display settings: Definition der Animation
- Kanäle: Ein- und Ausgangskanäle, Zentralkanal
- Verhalten: Reaktion auf Ereignisse (z.B.: Verlassen eines Atoms)
- Attribute: beeinflussen Verhalten (z.B.: Zwischenankunftszeit, Bedienzeit,...)
- Tabellen: Jedes Atom beinhaltet eine Tabelle mit beliebiger Zeilen- und Spaltenzahl
- Spartial: Definition von Position, Größe, Geschwindigkeit etc.
- Labels: Felder zur Mitgabe von Information an das Atom

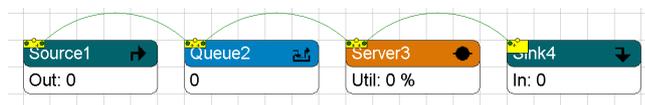


Abbildung 5.4: Einfaches Warteschlangenmodell: Quelle-Warteschlange-Bedienstation-Senke

Der *Atom-Editor*, dargestellt in Abbildung 5.5, dient der Manipulation der Atomeigenschaften. Er bietet umfangreiche Möglichkeiten der Veränderung von Bezeichnung, Attributen, Funktionen, Visualisierung uvm. Des Weiteren bietet der *Atom-Editor* auf der Seite *Events* die Möglichkeit, den 4DScript-Code vordefinierter Ereignisse zu verändern bzw. neue Routinen zu programmieren.

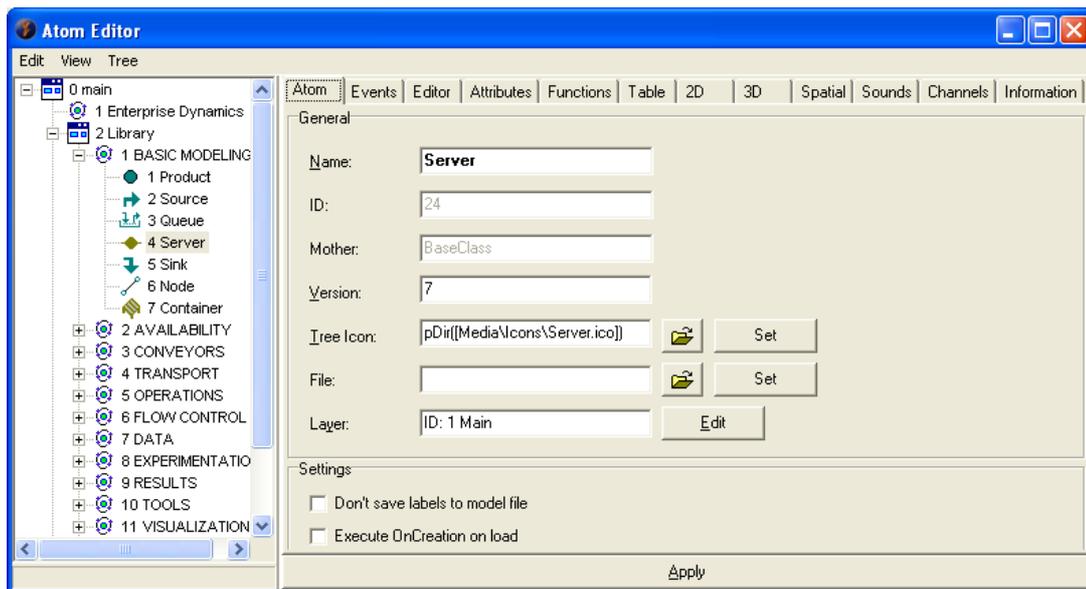


Abbildung 5.5: Atom-Editor

## Simulation

Der Start eines einfachen Simulationslaufes kann durch das Bedienfenster *Run-Control* (siehe Abbildung 5.3, rechts unten) oder über das Menü *Simulate* der Menüleiste initiiert werden. Die Simulationsgeschwindigkeit wird ebenso über die *Run-Control* gesteuert. Wird über das Menü *Simulate* die Laufzeit der Simulation nicht eigens fixiert, so läuft diese, bis die Schaltfläche *Stop* betätigt wird. Im Fenster *Clock* (siehe Abbildung 5.3, rechts, Mitte) wird die aktuelle Simulationszeit wiedergegeben. In der Atombibliothek existiert weiters das *Experiment-Atom*, welches der Automatisierung von Versuchen dient. Es ermöglicht die Steuerung der Simulationszeit, der Einschwingphase und der Anzahl der Wiederholungen. Die Simulationsläufe können visuell in 2D- oder auch 3D-Ansicht mitverfolgt werden. Um die Simulationszeit zu verkürzen, besteht die Möglichkeit, jegliche Visualisierung und Interaktion zwischen Software und Anwender zu unterbinden (Befehl: *FastRun*).

## Ergebnisse

Zur Analyse der Modelldynamik ist das Verfolgen und Messen von Modellparametern unverzichtbar. ED bietet hierfür eine Reihe von vordefinierten Methoden. Folgende Methoden sollen exemplarisch erläutert werden:<sup>45</sup>

- direkt im Atom dargestellte Informationen
- Monitor
- Reports
- Grafiken

<sup>45</sup> Vgl. Löscher (2002), S.24.

Die Information, die direkt im Atom dargestellt ist, ist atomspezifisch festgelegt. So zeigt eine Quelle beispielsweise die Anzahl der bereits erzeugten Atome und die Senke jene der vernichteten. Eine Warteschlange visualisiert den aktuellen Inhalt und eine Bedienstation die Auslastung (siehe Abbildung 5.6).

Der Monitor zeigt den Verlauf eines bestimmten Modellparameters des Atoms grafisch an, dessen Zentralkanal mit dem Eingang des Monitor-Atoms verbunden ist. Abbildung 5.6 stellt den Verlauf des Inhalts der Warteschlange und ein Menü mit den auswählbaren Parametern dar.

Die Auswahl der Schaltfläche *Summary Report* des Menüs *Results* erstellt einen Bericht mit folgenden Parametern:

- Aktueller und durchschnittlicher Inhalt jedes Atoms
- Anzahl der eingetroffenen und verlassenen Atome zum aktuellen Zeitpunkt
- Durchschnittliche Verweilzeit jedes Atoms

Die Auswahl der Schaltfläche *Graphs* des Menüs *Results* veranlasst die grafische Darstellung von Variablen des Modells. Zur Dokumentation dieser Daten ist die Aktivierung der Option *General history* im Menü *Simulate - History* und die Auswahl der gewünschten Atome erforderlich. Für weitere Informationen über die Möglichkeiten und die Bedienung von ED sei auf das Tutorial Incontrol (2006) verwiesen.

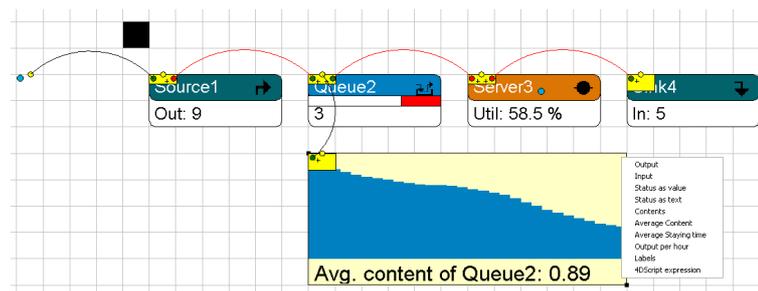


Abbildung 5.6: Einfaches Warteschlangenmodell mit Monitor und Optionen

## 5.4 Einsatzmöglichkeiten in der Produktionsplanung und -steuerung

Die Möglichkeiten der Anwendung von Simulation in der PPS sind nahezu so umfangreich wie deren Aufgaben selbst. Für die PPS sind unter anderem folgende Bereiche unternehmerischer Tätigkeit von Interesse:

- Unternehmensplanung
- Layoutplanung
- Materialflussplanung

### 5.4.1 Unternehmensplanung

Die Unternehmensplanung und auch betriebliche Planung werfen ein breites Band unterschiedlicher Fragestellungen auf. Auf strategischer Ebene stellen sich hauptsächlich Probleme der Strukturplanung. Auf taktischer Ebene bestehen im Wesentlichen mittelfristige Probleme der Produktions- und Anlagenplanung und auf operativer Ebene welche bezüglich der Produktionssteuerung.

Für die Simulation auf strategischer Ebene sind Modelle im Einsatz, welche die Unternehmensstruktur bzw. Teile dieser und den Informations- und Materialfluss zwischen den Strukturelementen abbilden. Die zentrale Fragestellung richtet sich grundsätzlich nach der vorrangigen Investition und der Auswirkung von Strukturänderungen im Unternehmen. Durch Simulation besteht die Möglichkeit, Aufschluss über folgende klassische Fragestellungen zu gewinnen:

- Welche Grenzleistung hat die Anlagenkonfiguration?
- Welche Auswirkungen hat das Schichtmodell auf das Zusammenspiel zwischen Produktion, Transport und Versand?
- Welche Auswirkungen hat die Standortverlagerung einzelner Maschinen auf die angeforderten Transportleistungen und den Pufferbedarf?
- Welche Auswirkungen hat die Veränderung des Produktmixes?

Auf taktischer Ebene beinhalten Simulationsmodelle eine Abbildung einzelner Unternehmensbereiche. Ein denkbarer Einsatz besteht beispielsweise in der Abbildung des Planungs- und Produktionsprozesses mit der zentralen Fragestellung nach der Qualität der vorhandenen Auftragsbildung, Kapazitätsplanung, Auftragsterminierung oder Auftragsfreigabe. Als Beispiele für Experimente können die Variation eines Parameters der Fertigungssteuerung, die Variation des Losgrößenbestimmungsverfahrens oder die Variation der Fertigungsstruktur genannt werden.

Auf operativer Ebene sind in der Literatur häufig konkrete Fragestellungen der Fertigungssteuerung Thema einer Simulationsstudie. Im Zuge der simulationsgestützten Feinplanung durch elektronische Fertigungsleitstände findet die Simulation täglich Verwendung in Produktionsbetrieben. Die Simulation auf operativer Ebene beschäftigt sich nur noch geringfügig mit klassischen "Was wäre wenn..."-Fragen, sondern richtet sich gezielt nach der Frage der Optimierung der Auslastung, der Durchlaufzeit oder der Bestände durch Variation von Produktionsreihenfolgen oder Losgrößen.<sup>46</sup>

### 5.4.2 Layoutplanung

Simulation findet in der Planung des Fabriklayouts häufig Anwendung zur Auslegung von Informations- und Materialflüssen und der Planung und Steuerung automatisierter Bereiche. Die Neuerrichtung einer Produktionsanlage stellt einen außerordentlichen finanziellen Aufwand dar. Planungsfehler können in diesem Zusammenhang einen erheblichen finanziellen

---

<sup>46</sup> Vgl. Kuhn et al. (1993), S.7.

Schaden verursachen. Aus diesem Grund wird die Simulation als Instrument der Entscheidungsunterstützung eingesetzt, um beispielsweise Kapazitäten von Transport- oder Förderanlagen richtig auszulegen bzw. Engpasskapazitäten vor Inbetriebnahme zu identifizieren. Neben den Einsatzbereichen der Fertigung, der Montage und des Lagers findet die Simulation auch in indirekten Bereichen wie in der Energieversorgung sowie bei der Planung von Sozialräumen und Büros Anwendung. Im Allgemeinen dient die Simulation im Zuge der Layoutplanung dazu, Fehler aufzudecken bevor daraus Schaden entstehen kann.<sup>47,48</sup>

### 5.4.3 Materialflussplanung

Seit dem Beginn der Arbeitsteilung im Zeitalter der Industrialisierung werden Produktionssysteme mit einem zunehmenden Transportaufkommen sowie steigender Komplexität belastet. Dies stellt hohe Anforderungen an die verwendeten Transportsysteme und deren Steuerung. Die Dimensionierung solch komplexer Materialflusssysteme mit analytischen Methoden scheidet einerseits an den theoretischen Voraussetzungen, welche in der Praxis nicht vorhanden sind, sowie an der Komplexität selbst. Dies gilt besonders für Dynamikuntersuchungen des Materialflusses. Tabelle 5.4 zeigt die Einsatzgebiete der Materialflusssimulation nach Kuhn et al. (1993).

Tabelle 5.4: Einsatzgebiete der Materialflusssimulation (in Anlehnung an Kuhn et al. (1993), S.77)

Planungsstufe	Simulationsergebnisse	Bezeichnung
Vorplanung	Test von Produktionsstrategien	Struktursimulation
	Distributionsstrategien Ermittlung von Bestandsverläufen	
Grobplanung	Machbarkeitsstudien	Grobsimulation
	Test grundlegender Steuerungsstrategien	
	Layoutvarianten Fördertechnikauswahl usw.	
Feinplanung	Test detaillierter Betriebsstrategien	Feinsimulation
	Optimierung des Betriebsmitteleinsatzes	
Betrieb	Übernahme von Steuerungsstrategien	Operativsimulation
	Inbetriebnahmestrategien	
	Softwaretest Reihenfolgeoptimierung	

---

<sup>47</sup> Vgl. Matyas (2001), S.134.

<sup>48</sup> Vgl. Kuhn et al. (1993), S.43.

# 6 Produktionsplanung und -steuerung bei Lasselsberger, a.s.

Zum besseren Verständnis des Vorgehens im Zuge der Simulationsstudie in Kapitel 7, wird in diesem Kapitel ein Überblick über das Konzept der Produktionsplanung und -steuerung der Lasselsberger, a.s. gegeben.

Der Aufbau des PPS-Konzepts der Lasselsberger, a.s. entspricht dem MRPII-Konzept (siehe Abschnitt 4.4.2) und somit einem klassisch hierarchischen Modell, wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben. Nach der Charakterisierung des Betriebstyps (Abschnitt 6.1) folgt eine exemplarische Aufstellung der Funktionen, Zuständigkeiten und Merkmale des PPS-Konzepts der Lasselsberger, a.s. Das Hauptaugenmerk dieser Studie richtet sich auf die operative Ebene, dennoch soll an dieser Stelle auch eine Übersicht aus strategischem und taktischem Blickwinkel gegeben werden.

## 6.1 Betriebstyp der Lasselsberger, a.s.

Abbildung 6.1 zeigt die Charakterisierung des Betriebstyps der Lasselsberger, a.s. anhand eines morphologischen Kastens (vgl. Abschnitt 3). Im Folgenden werden ausgewählte Charakteristika erläutert.

Da die Bestellmengen in der Branche des Handels mit keramischen Verkleidungen zu gering sind, um direkt einen Produktionsauftrag auszulösen, und der Markt keine Aggregation von Bestellungen zu einem rentablen Fertigungslos erlaubt, erfolgt die Produktion auf Lager. Lasselsberger, a.s. bietet bei Bestellungen in ausreichendem Umfang jedoch die Produktion eigener Kundenserien an. Das Erzeugnisspektrum umfasst Standardprodukte (beispielsweise weiße Wandfliesen), welche ohne Variation produziert werden und nicht dem üblichen Produktlebenszyklus unterliegen (vgl. Abschnitt 7.2.5), sowie Großserien, die in verschiedenen Designvarianten hergestellt werden. Der Fertigungstyp entspricht einem Großserien- und Massenfertiger. Die Herstellung des Primärbedarfs erfolgt auf Produktionslinien, die durch Fließbänder und FTS gekoppelt sind. Die Fertigungsablaufart kommt daher einer Fließfertigung gleich.

## 6.2 Strategische Planung

Der strategischen Produktionsplanung obliegt die langfristige Planung von Produktionsstandorten und -kapazitäten zur Erreichung der Ziele entsprechend der Unternehmensstrategie. Dies beinhaltet die geografische Verdichtung von Produktionsstandorten zur Minimierung

Merkmale	Merkmalsausprägung				
Auftragsauslösungsart	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen	Produktion auf Bestellung mit Rahmenaufträgen	kundenanonyme Vorproduktion/ Endproduktion auf Auftrag	Produktion auf Lager	
Erzeugnispektrum	Erzeugnisse nach Kundenspezifikation	typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten	
Erzeugnisstruktur	mehnteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur		mehnteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur		geringteilige Erzeugnisse
Ermittlung des Bedarfs	bedarfsorientiert auf Erzeugnisebene	erwartungs- u. bedarfsorient. auf Komponentenebene	erwartungsorientiert auf Komponentenebene	erwartungsorientiert auf Erzeugnisebene	verbrauchsorientiert auf Erzeugnisebene
Auslösung des Sekundärbedarfs	auftragsorientiert		teils auftragsorientiert/ teils periodenorientiert		periodenorientiert
Beschaffungsart	weitgehend Fremdbezug		Fremdbezug in größerem Umfang		Fremdbezug unbedeutend
Bevorratung	keine Bevorratung von Bedarfspositionen	Bevorratung von Bedarfspositionen auf unteren Strukturebenen	Bevorratung von Bedarfspositionen auf oberen Strukturebenen	Bevorratung von Erzeugnissen	
Fertigungsart	Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung	
Fertigungsablaufart	Werkstattfertigung	Insselfertigung	Reihenfertigung	Fließfertigung	
Montageablaufart	Baustellenmontage	Gruppenmontage	Reihenmontage	Fließmontage	
Fertigungsstruktur	Fertigung mit geringem Strukturierungsgrad		Fertigung mit mittlerem Strukturierungsgrad		Fertigung mit hohem Strukturierungsgrad
Änderungseinfluss des Kunden	Änderungseinflüsse in größerem Umfang		Änderungseinflüsse gelegentlich		Änderungseinflüsse unbedeutend

Abbildung 6.1: Charakterisierung des Betriebstyps der Lasselsberger, a.s. mittels morphologischen Kastens

nicht wertschöpfender Tätigkeiten sowie von Zwischen- und Endlagerflächen, die Restrukturierung der Produktion zur Verbesserung produktionslogistischer Abläufe und den Erwerb, den Ausbau oder die Neuerrichtung von Produktionsstätten und -kapazitäten. Im Planungsprozess ist die Leitung jeder Abteilung involviert. Als Entscheidungsträger treten der Vorstand und das Management ein. Der Horizont der strategischen Produktionsplanung der Lasselsberger, a.s. liegt bei drei bis fünf Jahren.

### 6.3 Taktische Planung

Grundlage der taktischen Produktionsplanung ist eine vom Verkauf jährlich durchgeführte Prognose des Absatzpotenzials. Die Differenzierung des Absatzes erfolgt nach Land und Materialgruppe<sup>1</sup>. Zum geografischen Markt der Lasselsberger, a.s. zählen neben der Tschechischen Republik noch 40 weitere Länder im europäischen Raum. Die zeitliche Auflösung der Prognose erfolgt in Monaten. Das Absatzpotenzial wird als Fläche in Quadratmeter sowie als finanzielles Potenzial in Tschechischen Kronen ermittelt.

In weiterer Folge wird der Jahresbedarf den zur Verfügung stehenden Kapazitäten gegenübergestellt. Im Zuge der Produktionsprogrammplanung und Grobkapazitätsplanung wird der Produktionsplan jeder Produktionslinie für das ganze Jahr erstellt. Auf dieser Planungsebene sind absetzbare Produkte zu Materialgruppen aggregiert. Die zeitliche Detaillierung von einem Monat erweist sich als ausreichend. Ein vierteljährlicher Vergleich zwischen tatsächlich abgesetzten Produktmengen (IST-Absatz) und Jahresplan (SOLL-Absatz) entscheidet über das Intervall, in dem diese Planung rollierend durchgeführt wird (vgl. Abschnitt 2.5.1). Ist keine signifikante Abweichung vom Jahresplan feststellbar, so ist eine neuerliche Absatzprognose im Intervall von einem halben Jahr vorgesehen, andernfalls wird die Absatzprognose vierteljährlich durchgeführt. Von dieser Planung wird unter anderem die Zuordnung von Produkten zu Produktionslinien beeinflusst sowie die Planung von Reinigungs- und Reparaturperioden, ebenso wie die Urlaubsplanung der Belegschaft.

### 6.4 Operative Planung und Steuerung

Die Materialgruppen und Produkte der Lasselsberger, a.s. stehen in enger Beziehung zueinander. Einerseits besteht zwischen den Produkten eine hohe Substituierbarkeit, andererseits weisen sie eine hohe technologische Abhängigkeit auf, da verschiedene Produkte und Materialgruppen auf derselben Produktionslinie gefertigt werden können. Aus diesem Grund setzt die operative Produktionsplanung und -steuerung einen weitreichenden Überblick über eine Vielzahl von Produkten, Materialgruppen und Produktionslinien voraus, weshalb sie überwiegend von zentraler Stelle ausgeführt wird.

Auf dieser Planungsebene sind die Produktreihenfolge und die Dauer der Produktion jedes Loses für jede Linie zu planen, wobei über die Produktionsdauer die Losgröße gesteuert wird. Lasselsberger, a.s. beschäftigt neun Planer, wobei jedem Planer spezielle Produktionslinien und somit ein spezielles Produktportfolio zugeteilt ist. Der Planer erstellt wöchentlich, rollierend (siehe Abschnitt 2.5.1), für jede Produktionslinie einen Produktionsplan für einen

---

<sup>1</sup> Aggregation von Produkten gleicher Merkmale (siehe Abschnitt 7.2.1)

Zeitraum von vier Wochen. Der Fixierungshorizont beträgt eine Woche, wodurch der Produktionsplan der ersten Planungswoche nicht mehr verändert werden kann. Der Produktionsplan der zweiten und dritten Woche wird durch einen Net-Change (siehe Abschnitt 2.5.2) an geänderte Bedarfsanforderungen angepasst und um eine neue, vierte Planungswoche ergänzt.

Die Planung der Reihenfolge erfolgt im Allgemeinen nach der Lagerreichweite<sup>2</sup> und der Höhe der Reservierungen. Nach Eingang einer Anfrage im Verkauf wird die geforderte Menge im Lager reserviert. Ist die geforderte Menge eines Produkts nicht auf Lager, so bezieht sich die Reservierung auf künftig zu fertigende Mengen des Produkts. Der Planer ist gefordert, die Bedarfscharakteristik seiner Produkte gut zu kennen, und steht in engem Kontakt mit Verkauf, Marketing und Produktion.

Die Anschaffung und der Betrieb einer Produktionslinie zur Fliesenproduktion ist sehr kapitalintensiv, während das Produkt selbst, die einzelne Fliese, im Vergleich von geringem Wert ist. Daher werden Pufferbestände in Kauf genommen, um die maximale Auslastung der Produktionslinie zu gewährleisten. Da jeder Rüstvorgang Kapazitätseinbußen verursacht, muss dieser zum optimalen Zeitpunkt und so schnell wie möglich ablaufen. Da dies sehr guter Kenntnisse der Produktionslogistik bedarf, erfolgt die Steuerung des genauen Rüstzeitpunktes und -ablaufs dezentral durch den Produktionsleiter.

---

<sup>2</sup> Quotient aus Lagerbestand zu Lagerabgang (vgl. Wiendahl (1989), S.304)

# 7 Simulationsstudie der PPS bei Lasselsberger, a.s.

Kapitel 7 beinhaltet die Dokumentation einer Studie zur Simulation der operativen Produktionsplanung und -steuerung der Lasselsberger, a.s. In Abschnitt 7.1 sind die Problemstellung erläutert und die Ziele der Studie festgelegt. Abschnitt 7.2 beschreibt den im Rahmen der Studie betrachteten Systemausschnitt der Lasselsberger, a.s. Die erhobenen Informationen im Zuge der Studie stammen, falls nicht anders angegeben, von Herrn Pavel Vokáč, Leiter der Produktionsplanung der Lasselsberger, a.s., oder aus persönlichen Erhebungen vor Ort. Abschnitt 7.3 enthält das Modellkonzept zur Simulation der Produktionsplanung, der Produktion und des Vertriebs der Lasselsberger, a.s. Das konzeptionelle Modell wurde in einem Pilotmodell im Simulationswerkzeug Incontrol Enterprise Dynamics implementiert und wird in Abschnitt 7.4 erläutert. Abschnitt 7.5 dokumentiert Verifikation und Validierung des Simulationsmodells und Abschnitt 7.6 zeigt den Versuchsplan.

## 7.1 Problemdefinition und Ziele

Das zentrale Problem der Produktionsplanung bei Lasselsberger, a.s. besteht in der Antwort auf die Frage: “In welcher Reihenfolge müssen welche Produkte in welcher Menge hergestellt werden, um den Bedarf des Kunden zu einem akzeptablen Preis decken zu können?” Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, enthält das aktive Produktportfolio der Lasselsberger, a.s. über 3.000 Produktvarianten, wobei jährlich neue Serien das Portfolio erweitern und Produkte, die am Ende ihres Lebenszykluses sind, aus dem aktiven Portfolio ausscheiden. Des Weiteren wird in Klassen unterschiedlicher Helligkeit und Größe (Kaliber) des selben Produktes differenziert. Somit sind im Endproduktlager der Lasselsberger, a.s. mehr als 20.000 Chargenartikel geführt. Zur Produktion dieser Artikel stehen 23 Produktionslinien zur Verfügung. Jede der Produktionslinien eignet sich durch entsprechenden Rüstaufwand zur Fertigung mehrerer Produkte. Diese Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten von Produkt und Produktionsanlage unter der Nebenbedingung minimaler Fehlbestände und maximaler Auslastung verleihen dem Planungsproblem ein hohes Maß an Komplexität.

Inhalt dieser Studie ist die Erstellung eines Konzepts zur Analyse von Planungsstrategien für die Fliesenproduktion der Lasselsberger, a.s. und dessen Umsetzung in einem Pilotmodell zur Simulation. Des Weiteren sollen allgemeine Erkenntnisse über die Abbildung und Automatisierung der Planungsprozesse gewonnen werden. Die Ziele der Studie seien wie folgt definiert:

- ein Konzept einer Simulationsstudie zum Zweck der Findung und Bewertung von Produktionsplanungsstrategien für die Fliesenproduktion,

- ein Simulationsmodell, welches zur Implementierung beliebiger Planungsstrategien geeignet ist,
- die Beschränkung der Studie auf Planung, Erstellung und Absatz von Primärbedarf

Diese Ziele beinhalten nicht

- die Erstellung eines Simulationswerkzeuges, welches zur Substitution eines Planers eingesetzt werden kann,
- die Findung konkreter Handlungsalternativen zur Verbesserung der Produktionsplanung,
- die Erstellung eines Produktionsplans, der im realen System angewendet werden kann,
- die Berücksichtigung von Prozessen, die im Zusammenhang mit dem Sekundärbedarf stehen (beispielsweise die Beschaffung und Erstellung von Rohstoffen, Pulver, Glasur o.ä.)

## 7.2 System

Innerhalb der Systemabgrenzung wurden die Subsysteme *Produktionsplanung*, *Produktion*, *Lager* und *Kommissionierung und Vertrieb* als für die Studie relevante Teilsysteme identifiziert. Abbildung 7.1 dokumentiert die Beziehung, in der die Subsysteme zueinander stehen. Die Modellierungsmethode entspricht dem Integration Definition for Function Modelling (IDEF0)-Standard, welcher im Anhang, Abschnitt A.5, ausgewiesen ist. Die eintretenden und austretenden gerichteten Grafen sind als Schnittstellen zu anderen Bereichen des Unternehmens zu verstehen. Der Eingang *Bestellung* sowie der Ausgang *Absatz* entsprechen auch den Grenzen des Gesamtsystems Lasselsberger, a.s. und stellen die Verbindung zum Kunden dar. *Pulver*, *Glasur* und *Paste* sind materieller Input und entsprechen dem Output der Sekundärbedarfsproduktion. Der Eingang *Lebenszyklus, sonstige Planungsparameter* stammt aus firmeninternen Studien und Analysen. Die Eingänge  $L_iW_j$  stellen Produktionslinien als Resource dar, während die Bezeichnung  $L_{Wk}$  Lager kennzeichnet. Folgend sind Elemente und Prozesse des Teilsystems erläutert.

### 7.2.1 Produkt: Fliese

Lasselsberger, a.s. produziert keramische Wand- und Bodenbeläge und vertreibt diese unter den Marken RAKO und LB OBJECT. Das Produktsortiment der Marke RAKO umfasst Komplettlösungen im Bereich der Wohnkeramik, wie Fliesen für Bäder, Küchen und Böden. Die Marke LB OBJECT beinhaltet Systemlösungen des Architekturprogramms. Keramiken dieser Marke bieten spezielle Eigenschaften wie hochbelastbare oder rutschhemmende Oberflächen.

Anhand der Differenzierung nach Quantität in der Verwendung unterscheidet man in Flächenware und Kommissionierware. Flächenware wird, aufgrund flächendeckender Anwendung, in großen Verpackungseinheiten ( $1,0$  bis  $1,5\text{ m}^2$  pro Verpackungseinheit) sowie palettiert vertrieben. Hierzu zählen:

- Bodenfliesen



- Wandfliesen

Kommissionierware findet im Allgemeinen keine flächendeckende Anwendung in keramisch verkleideten Flächen und wird aus diesem Grund in kleinen Verpackungseinheiten (üblicherweise kleiner  $1\text{ m}^2$  pro Verpackungseinheit) vertrieben. Hierzu zählen:

- Dekorfliesen (Einlagen, Bordüren, Reliefbordüren, etc.)
- Mosaikfliesen

Eine weitere Klassifizierung des Produktportfolios lässt sich anhand der Verfügbarkeitsgarantie der Produkte treffen. Lasselsberger garantiert die Verfügbarkeit des Sortiments innerhalb eines angegebenen Zeitraums. Tabelle 7.1 zeigt die Klassifizierung der Produkte und den Zeitraum der Verfügbarkeitsgarantie.

Tabelle 7.1: Klassifizierung der Produkte nach der Verfügbarkeitsgarantie

Kennzeichnung	Verfügbar
A	innerhalb 10 Werkstage
B	innerhalb 4 Wochen
C	gegen Bestellung

Die Identifikation der Produkte erfolgt anhand eines 18-stelligen Kennzahlensystems, dargestellt in Tabelle 7.2. Die Elemente sechs bis 13 entsprechen der Katalognummer. Den Elementen fünf und 14 ist derzeit kein Zweck zugeordnet. Produkte gleichen Typs und gleichen Formats werden zur Materialgruppe aggregiert. Tabelle 7.3 zeigt die Erklärung der Materialgruppennummer. Der Beispielgruppe VCWA2020 gehören alle keramischen (C) Wandfliesen (WA) aus Eigenfertigung (V) mit dem Format 20x20 an.

Tabelle 7.2: Produktkodierung der Lasselsberger, a.s. (Abk.: PG...glasierte Kante, Div...Division, Oberf...Oberfläche, Verp...Verpackung, Qual...Qualität)

Katalognummer																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Div	Serie			x	Typ	Oberf	Format	Farbe			x	Verp	PG	Qual			

Folgend ist der allgemeine Aufbau einer fertigen Fliese erläutert. Eine Standardboden- oder -wandfliese besitzt einen Grundkörper, den Scherben. Scherben können koloriert oder naturbelassen sein sowie eine flache oder strukturierte Oberfläche besitzen. Die Reliefbordüre, aus der Gruppe der Dekorfliesen, besitzt einen profilierten Scherben. Man unterscheidet glasierte und unglasierte Fliesen, wobei glasierte Keramiken sich weiters anhand einer glänzenden oder matten Oberfläche differenzieren lassen. Auf die Glasur sind Farbpasten in verschiedenen Farben aufgetragen.

### 7.2.2 Produktionsplanung

Die Aufgabe der Produktionsplanung übernehmen bei Lasselsberger, a.s. neun Angestellte, auf welche das Produktportfolio und die zu planenden Produktionslinien aufgeteilt sind. Jedes Produkt weist eine individuelle Bedarfscharakteristik auf. Die Planung durch eine Person

Tabelle 7.3: Beschreibung der Materialgruppe

	Beschreibung	Beispiel
1	Eigen-/Fremdfertigung	V
2	Produktart	C
3	Verwendung	WA
4		20
5	Format	20

zeichnet sich vor allem in der individuellen Behandlung des Produkts sowie durch kreative Problemlösung aus. Die Qualität der Planung ist hierbei stark von der Erfahrung und den Fähigkeiten des Planers abhängig und unterliegt somit Schwankungen. Die Forderung nach konstanter, hoher Planungsqualität führt zur Suche nach Möglichkeiten, den Planungsprozess zu automatisieren. Im Folgenden wird auf den Ablauf der Planung eingegangen. Das zugehörige Prozessdiagramm ist in Abbildung 7.2 dargestellt.

- **Schritt 1: Produktliste erstellen**

Zu Beginn jedes Planungslaufes wird eine Liste der zu planenden Produkte aus den Daten des ERP-Systems der Lasselsberger, a.s. erstellt.

- **Schritt 2: Nach Reichweite sortieren**

Das primäre Kriterium zur Planung der Produktionsreihenfolge ist die Lagerreichweite. Ist die Reichweite eines Produktes kurz, so erhält es hohe Priorität zur Produktion. Als sekundäres Entscheidungskriterium dient die Reservierung von Produkten.

- **Schritt 3: Planung absprechen**

Des Weiteren wird die Produktreihenfolge von Maßnahmen des Marketings und Tätigkeit des Verkaufs beeinflusst. Daher erfolgt eine Absprache mit diesen Abteilungen.

- **Schritt 4: Produktreihenfolge festlegen**

Nach den abteilungsinternen Prioritätsregeln und der Berücksichtigung von Marketing und Verkauf legt der Planer die Produktionsreihenfolge fest.

- **Schritt 5: Produktionsmenge festlegen**

Anschließend an die Festlegung der Produktionsreihenfolge ist die Produktionsmenge des Loses zu bestimmen. Aus Gründen der Umrüststeuerung, welche dem Produktionsleiter obliegt, wird die Produktionsmenge über Richtsätze in Tagen angegeben. Die Losgröße stellt einen Zielkonflikt zwischen Lagerbestand und Auslastung dar. Aus ökonomischer Sicht sowie aus technologischer Erfahrung hat sich eine Produktionsdauer von zwei Tagen als günstig erwiesen, fallweise ist jedoch auch eine Dauer von mehr als einer Woche möglich.

- **Schritt 6: Entwurf diskutieren**

Liegt der Entwurf des Produktionsplans vor, so wird Rücksprache mit dem Produktionsleiter gehalten. Werden vom Produktionsleiter Änderungsvorschläge eingebracht, so ist der Planungsvorgang ab Schritt 4 zu wiederholen.

- **Schritt 7: Produktionsplan fixieren**

Liegen keine technologischen Einwände des Produktionsleiters vor, so wird der Plan entsprechend dem Fixierungshorizont von einer Woche fixiert.

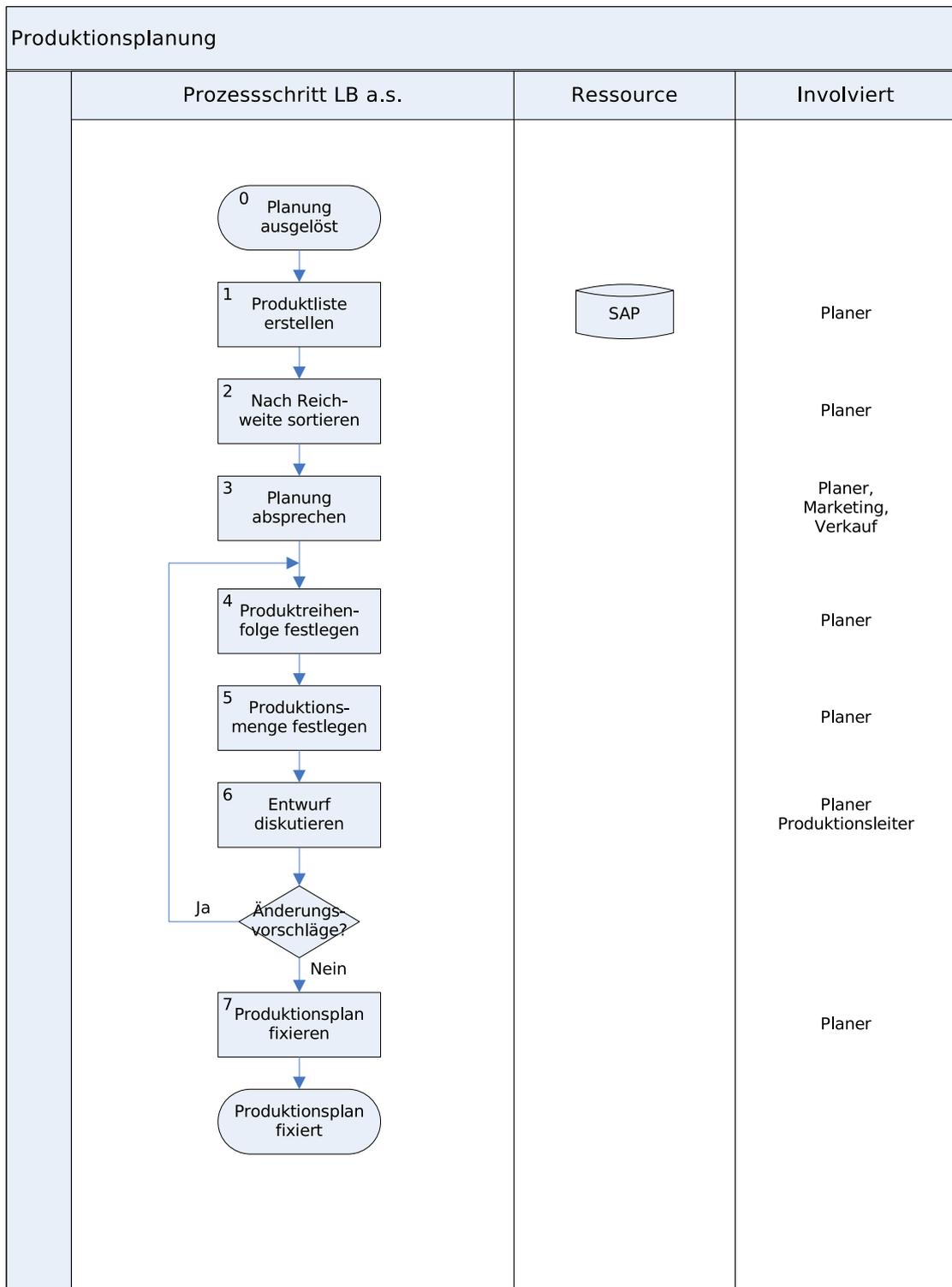


Abbildung 7.2: Prozessdiagramm Produktionsplanung

### 7.2.3 Produktion von Wand- und Bodenfliesen

Bevor die Prozesse der Primärbedarfsplanung vom Pulver zur fertigen Fliese erläutert werden, wird an dieser Stelle auf die Erstellung des Sekundärbedarfs Pulver und Glasur eingegangen. Die Rohstoffe Kieselerde, Kalkstein, Kaolin und Ton werden aus dem Rohstofflager entnommen und gemahlen. Entsprechend der Rezeptur sind die Rohstoffe mit Wasser zu einem flüssigen Gemisch anzurühren. Das gesiebte Gemisch wird bei ca.  $600^{\circ}\text{C}$  getrocknet und zu einem Pulver verarbeitet, welches als Ausgangsmaterial des Scherbens dient. Ausgangsmaterial der Glasur sind Fritte, ein glasiges Granulat bestehend aus Kieselerde, Feldspat und Flussmittel, das mit Kaolin gemahlen wird. Abhängig vom Fertigprodukt werden der Glasur Farbkomponenten oder Materialien, welche die Oberfläche glänzend oder matt erscheinen lassen, hinzugefügt. Gelöst in Wasser erfolgt eine achtstündige Verweilzeit in der Mischtrommel. Um die Separation der Rohstoffe zu vermeiden, muss die gelagerte Glasur fortgehend gerührt werden.

Das Prozessdiagramm der Produktion einfacher Boden- oder Wandfliesen ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Die Herstellung einer einfachen Boden- oder Wandfliese besitzt einen linearen Ablauf und wird in folgenden Schritten durchgeführt.

- **Schritt 1: Pressen**

Der pulvrige Grundstoff wird in einer Presse zum Scherben gepresst.

- **Schritt 2: Trocknen**

Nach anschließender Trocknung bei ca.  $110^{\circ}\text{C}$  folgt das Glasieren des Scherbens.

- **Schritt 3: Glasieren / Drucken**

Im Prozessschritt *Glasieren / Drucken* wird der Scherben mit Wasser befeuchtet und es werden zwei Schichten Glasur aufgetragen. Anschließend folgt die Reinigung der Kanten. Die Glasur schließt mit dem Kolorieren der Oberfläche durch Farbpasten ab. Dies erfolgt mittels rotierender Walzen oder durch Siebdruck. Die drei Prozessschritte Pressen, Trocknen und Glasieren sind zeitlich aufeinander abgestimmt. Der Materialfluss ist durch ein Fließband gekoppelt. Auf die Glasur folgt die Zwischenlagerung in Pufferwagen, welche mittels fahrerlosen Transportsystems (FTS) zum Ofen befördert werden.

- **Schritt 4: Brennen**

Der Transport durch den Ofen (Ofenlänge: 44 bis 105 m), welcher den Engpass im Produktionsprozess darstellt, erfolgt mittels Bandförderung. Die Dauer des Brennvorganges differenziert sich nach der Größe und den Eigenschaften der Fliese. Tabelle 7.4 enthält die Produktionskapazitäten des Werks Rako 3. Eine kurzfristige Abschaltung des Ofens ist nicht möglich, da die hitzebeständige Verkleidung des Innenraumes Schaden erleiden würde.

- **Schritt 5: Sortieren**

Auf den Brand folgen die Trennung des Ausschusses und das Sortieren in zwei Qualitätsstufen. Aus Firmenangaben ist bekannt, dass von der Presse bis zur Sortieranlage ca. 7% Ausschuss anfallen. 95% der Restmenge erfüllen die Ansprüche von Ware erster Qualität, die übrigen 5% entsprechen zweiter Qualität. Des Weiteren erfolgt eine Differenzierung in Klassen unterschiedlicher Größe (Kaliber) und Helligkeit.



- **Schritt 6: Verpacken**

Im Prozessschritt Verpacken werden die Keramiken in Karton verpackt und palettiert. Jede Packung wird mit Produktnummer, Qualität und Charge kodiert.

- **Schritt 7: Lagerung**

Abschließend erfolgt die Einlagerung in das produktionsnahe Lager mittels Gabelstapler.

Die Produktionslinien werden in zwei Schichten zu je acht Stunden betrieben. Nur die Öfen werden im Dreischichtbetrieb geführt und in der Nachtschicht aus einem Puffer beschickt, der tagsüber angelegt wird. Da sich das Konzept in Abschnitt 7.3 auf die Produktion von Wandfliesen beschränkt, wird auf eine weitere Dokumentation der Herstellung von Dekorfliesen und Reliefbordüren an dieser Stelle verzichtet und auf den Anhang Abschnitt A.1 verwiesen.

Tabelle 7.4: Ofenkapazität Rako 3 im Jahr 2007

Linie	Materialgruppe	Kapazität ( $m^2$ /Zyklus)	Zyklus- dauer (min)	Theoretische Bruttoproduk- tionskapazität ( $m^2$ /Tag)	Festgelegte Bruttoproduk- tionskapazität 2007 ( $m^2$ /Jahr)
1	VCWA4525	226	54	6 029	509 322
	VCWA2020	199	41	6 973	400 000
	VCWA3325	268	47	8 200	1 250 000
2	VCWA2015	203	47	6 207	0
	VCWA4020	275	49	8 090	616 746
	VCWA3325	268	47	8 200	1 750 490
3	VCWA2015	248	47	7 587	674 074
	VCWA1515	248	41	8 710	84 634
	VCWA2020	250	41	8 766	304 064
	VCWA2520	330	41	11 590	1 457 791
	VCWA3325	306	54	8 157	263 000
	VCWA2520	330	41	11 590	0

Die Steuerung des Rüstprozesses obliegt dem Produktionsleiter. Der Umrüstvorgang wird überwiegend in der ersten Schicht durchgeführt, da hierfür Fachpersonal nötig ist, deren Überstunden zusätzliche Kosten verursachen. Zu Beginn des Vorganges wird die Presse umgerüstet. Der Ablauf und die Dauer hängen von Format und Oberflächenstruktur der Fliese ab. Das Rüsten der Trocknungsanlage ist im Wesentlichen vom Volumen des Scherbens und somit vom Format abhängig. Die Änderung des Fliesenformates hat Auswirkungen auf die gesamte Produktionslinie und verursacht somit an jeder Anlage Zeitaufwand. Die Anlage zum Glasieren muss bei jeder Änderung der Farbe gereinigt werden. Die Dauer hängt vor allem von der Farbe der folgenden Keramik ab.

Nachdem der Puffer vor dem Ofen aufgebraucht ist und das letzte Produkt des Loses gebrannt wurde, erfolgt das Rüsten des Ofens. Es ist eine produktspezifische Temperaturkurve einzustellen, welche unter anderem davon abhängt, ob die Fliese glänzend oder matt ist. Die Rüstzeit der Anlage zum Sortieren und Verpacken ist grundsätzlich an das Format des folgenden Produkts gebunden.

## 7.2.4 Lagerung und Kommissionierung

Zur Zeit erfolgt die Lagerung und Kommissionierung ausschließlich dezentral. Jedes Werk der Lasselsberger, a.s. verfügt über ein eigenes Primärbedarfslager, welches auch als Kommissionier- und Auslieferungslager Verwendung findet. Da eine detaillierte Beschreibung von Lagerung und Kommissionierung im Folgenden keine größere Relevanz besitzt, wird auf weitere Ausführungen an dieser Stelle verzichtet.

## 7.2.5 Vertrieb

Inhalt dieses Abschnitts ist die Beschreibung der Absatzcharakteristika des Produktsortiments von Lasselsberger, a.s. Der Verkaufsprozesses wird hier nicht näher erläutert, da er für die weiteren Ausführungen irrelevant ist.

Die globale Absatzcharakteristik des Produktsortiments der Lasselsberger, a.s. weist saisonale Schwankungen auf. Das Absatzhoch in der warmen und trockenen Jahreszeit ist im Allgemeinen auf die höhere Bautätigkeit im Außenbereich zurückzuführen. Der Absatzrückgang in der kalten und feuchten Jahreszeit beruht neben den ungünstigen klimatischen Bedingungen für die Arbeit im Freien auch auf der geringeren Anzahl an Werkstagen bzw. auf der Weihnachtsurlaubszeit. Abbildung 7.4 illustriert die Charakteristik der globalen Jahresabsatzschwankungen. Diese verursacht einen Überschuss an Produktionskapazität im Winter und Frühling (Aufbau des Lagers) und einen Kapazitätsengpass im Sommer und Herbst (Abbau des Lagers). Von der Produktionsplanung ist damit entsprechender Weitblick gefordert, denn reicht die gelagerte Menge von Produkten zu Engpasszeiten nicht aus, so sinkt der Absatz auf die Produktionskapazität ab.

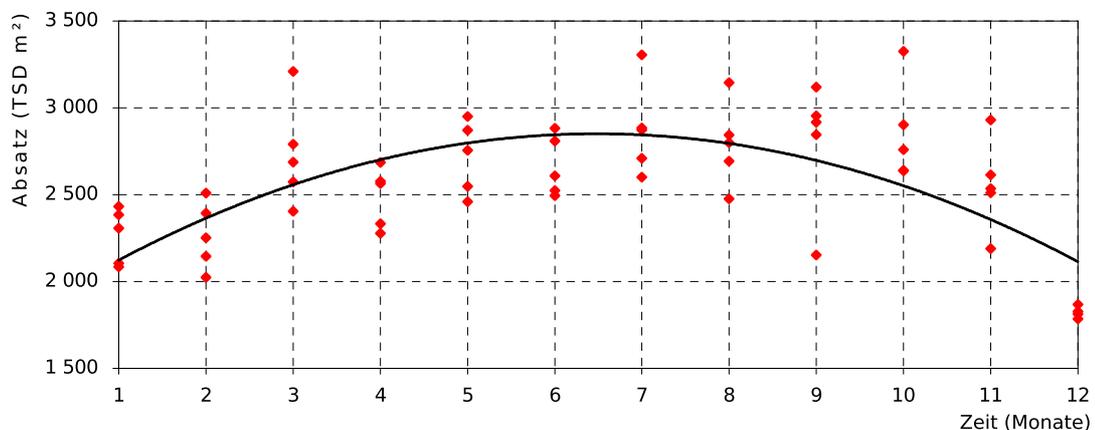


Abbildung 7.4: Globale Absatzcharakteristik des Sortiments von Lasselsberger, a.s.

Das Produktsortiment der Lasselsberger, a.s. kann anhand der Absatzcharakteristik in zwei Gruppen unterteilt werden, welche sich jedoch nicht scharf abgrenzen lassen. Produkte der wetterunabhängigen Anwendung zeigen wenig bis keinen saisonalen Effekt (siehe Abbildung 7.5a). Produkte mit Hauptanwendungsgebiet im Außenbereich besitzen, wie im vorangehenden Absatz beschrieben, eine saisonale Charakteristik (siehe Abbildung 7.5b). Der Lebenszyklus keramischer Verkleidungen dauert in etwa fünf bis sieben Jahre.

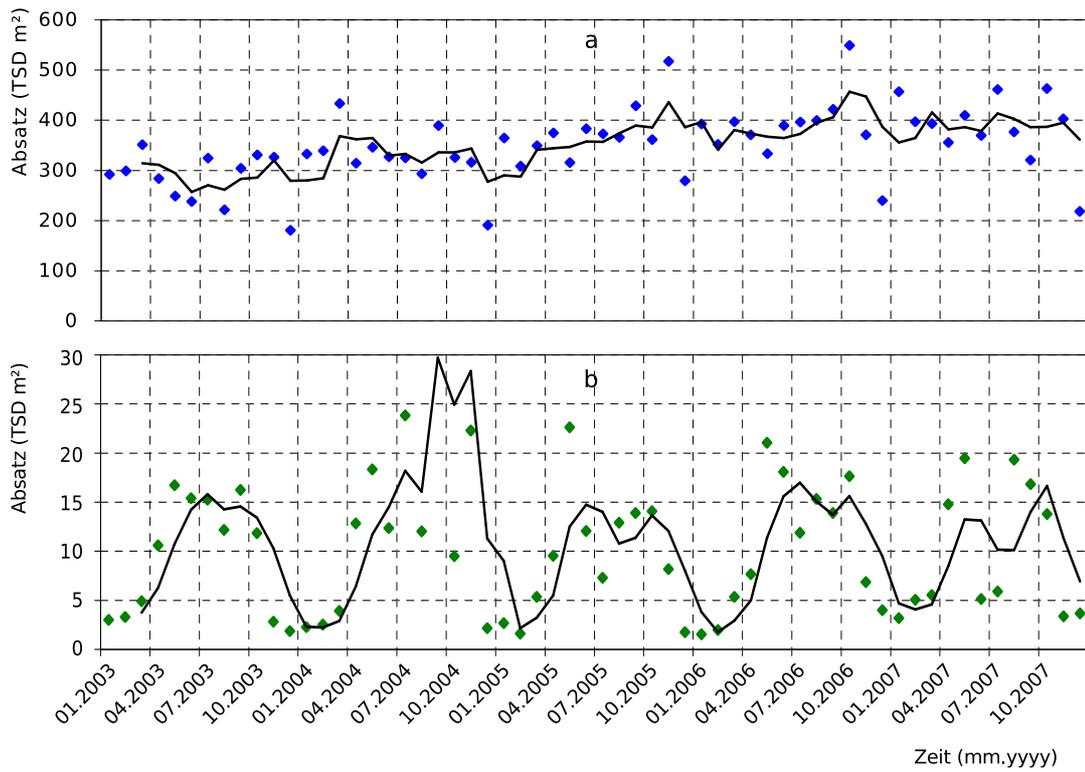


Abbildung 7.5: Typischer Absatz von Produkten ohne saisonalen Effekt (a) und mit saisonalem Effekt (b)

## 7.3 Konzept

Vorliegendes Konzept basiert auf der Systemanalyse des Abschnitts 7.2 und dient der Implementierung in ein diskretes Simulationsmodell. Inhalt des Konzepts ist die Abbildung des unter Abschnitt 7.2 dokumentierten Teilsystems in ein Modell zur Beurteilung unterschiedlicher Produktionsplanungsstrategien sowie die Abschätzung von Möglichkeiten und Problemen simulationsgestützter Produktionsplanung bei Lasselsberger, a.s. Folgend sind die allgemeinen Rahmenbedingungen und Abstraktionen des Konzepts punktuell zusammengefasst.

- Vernachlässigung der Interdependenzen zwischen den Produktionslinien durch Reduktion der berücksichtigten Linien auf Linie 1 des Werks Rako 3
- Vernachlässigung der Sekundärbedarfsbeschaffung unter der Annahme unendlich verfügbarer Mengen
- Referenzjahr 2007 (Alle dem Modell zugrundeliegenden Daten beziehen sich auf das Kalenderjahr 2007.)
- Beschränkung des Produktportfolios auf Wandfliesen
- Erstellung eines Produktportfolios (siehe Anhang Tabelle A.1) auf Basis des aktiven Portfolios 2007 und der geplanten Kapazitäten aus Tabelle 7.4, Linie 1
- Vernachlässigung der Auftragszusammensetzung zugunsten eines wöchentlich kumulierten Absatzes

Abbildung 7.6 zeigt die grafische Darstellung des Modellkonzepts. Es sei darauf hingewiesen, dass die Eingänge *Absatzvorgabe*, *sonstige Planungsparameter* und *Planungsstrategie* nicht als Verbindung zu anderen Unternehmensbereichen, wie in Abbildung 7.1, anzusehen sind, sondern als Parameter der Simulation, welche vom Bediener beeinflussbar sind.

### 7.3.1 Produktionsplanung

Das Submodell *Produktionsplanung* (Abbildung 7.6, A1) bildet den Vorgang der Reihenfolge- und Mengenplanung ab. Input des Prozesses ist der Bedarf an keramischer Verkleidung, der im Submodell *Lagerung und Vertrieb* erzeugt wird. Da der Bedarf aus dem Lager gedeckt wird, löst dieser nicht unmittelbar einen Produktionsauftrag aus, sondern stößt die Planung an. Der Planungsvorgang wird zu Beginn jeder Woche für das Produktportfolio (siehe Tabelle A.1 des Anhangs) durchgeführt. Der Produktionsplan der aktuellen Woche ist fixiert und wird nicht mehr verändert (Fixierungshorizont: eine Woche). Zur Steuerung des Planungsvorganges stehen die Parameter aus Tabelle 7.5 zur Verfügung. Wöchentlich aktualisierte Bestände, Lagerreichweiten, Absätze, Reservierungen und Fehlmengen werden durch das Submodell *Lagerung und Vertrieb* bereitgestellt. Entsprechend der Planungsstrategie werden diese Informationen im Produktionsplan umgesetzt, welcher als Steuerungseingang im Submodell *Produktion* fungiert.

### 7.3.2 Produktion

Das Submodell *Produktion* (Abbildung 7.6, A2) beschränkt sich auf eine Produktionslinie, die auf Basis der Produktionslinie 1 des Werks Rako 3 abgebildet ist. Das Produktportfolio

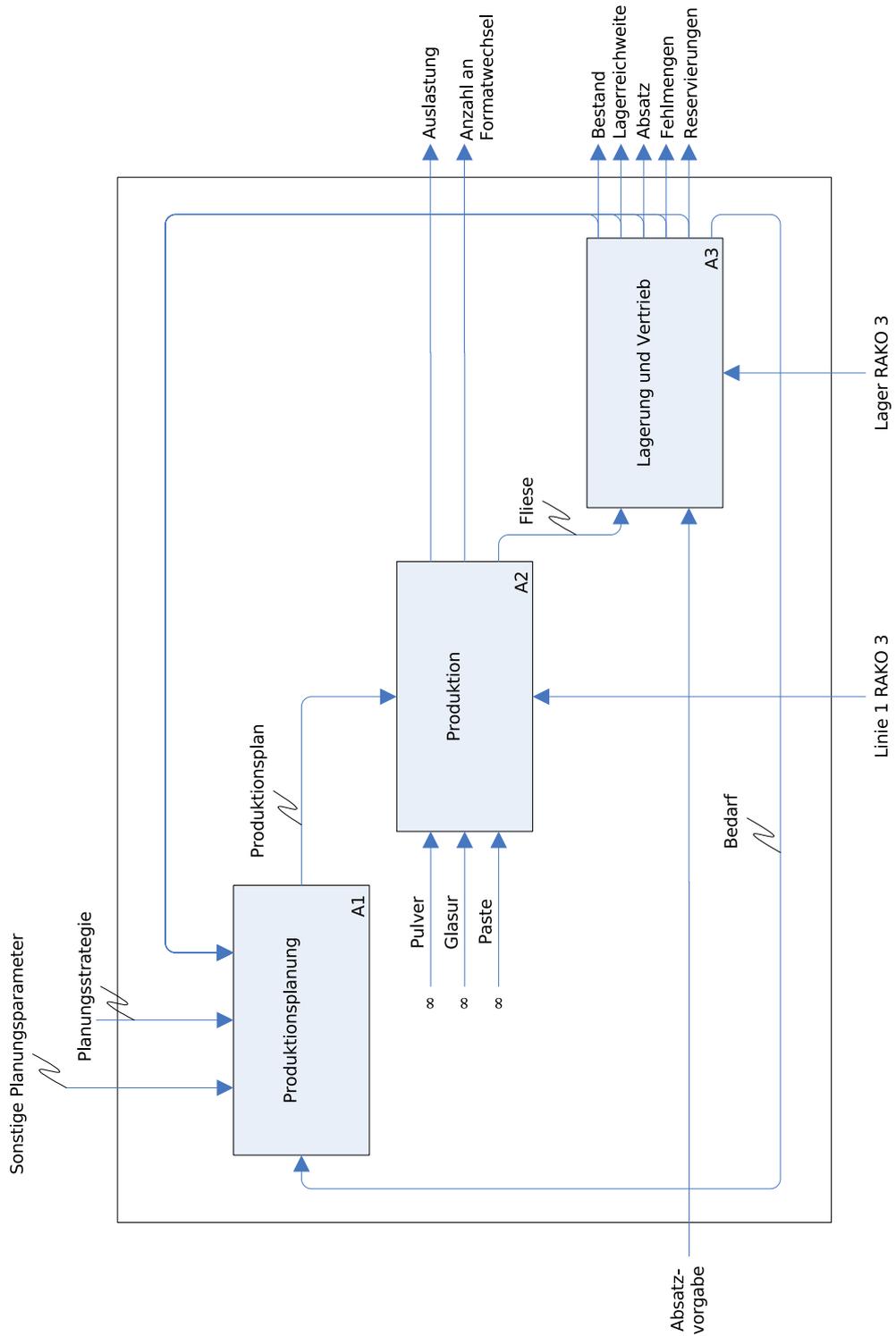


Abbildung 7.6: Grafische Darstellung des Modellkonzeptes

Tabelle 7.5: Produktionsplanungsparameter (Abk.: lfd...laufend)

Dynamische Parameter (wöchentlich aktualisiert)	Statische Parameter (sonstige Planungsparameter)
Bestand Qualität I	Format
Bestand Qualität II	Farbe
Kumulierter Absatz des lfd. Jahres	Farbgruppe
Kumulierte Fehlmengen des lfd. Jahres	Oberfläche
Lagerreichweite	Struktur
Reservierung	Klassifizierung nach Paretoanalyse (2006)
	Klassifizierung nach Verfügbarkeitsgarantie

der Linie umfasst Wandfliesen der Materialgruppen VCWA4525, VCWA2020 und VCWA3325 (vgl. Tabelle 7.4). Die Produktionslinie weist daher, wie aus Abbildung 7.3 ersichtlich, einen linearen Aufbau auf und besteht aus einer Presse, einer Trocknungsanlage, einer Anlage zum Glasieren des Scherbens, einem Ofen, und einer Anlage zum Sortieren und Verpacken. Der Ausschuss von der Presse bis zur Sortieranlage wird mit 7% binomialverteilt approximiert. In der Sortieranlage werden erste und zweite Qualität getrennt, wobei 95% (binomialverteilt) der Produktionsmenge erster Qualität entsprechen (Produktionsmenge exkl. Ausschuss entsprechen 100%).

Die Eingangsmaterialien Pulver, Glasur und Paste finden keine explizite Berücksichtigung und werden als ausreichend verfügbar angenommen. Der Output des Produktionsprozesses, die Fliese, dient als Input für das Submodell *Lagerung und Vertrieb*. Die Ausgänge *Auslastung* und *Anzahl an Formatwechsel* dienen als Output der Simulation zur Beurteilung der Planungsstrategie.

Tabelle 7.6: Servicezeiten der Anlagen der Produktionslinie (Angaben in  $\text{sec}/\text{m}^2$ , \* Schätzwerte)

Materialgruppe	Presse*	Trocknung*	Glasur*	Ofen	Sortierung & Verpackung*
VCWA4525	9,00	9,00	9,00	14,33	9,00
VCWA2020	7,80	7,80	7,80	12,39	7,80
VCWA3325	6,60	6,60	6,60	10,54	6,60

Tabelle 7.6 zeigt die Bedienzeiten der Maschinen und Anlagen der Produktionslinie. Der Materialfluss zwischen Presse, Trocknung und Glasur ist durch ein Fließband gekoppelt, aus diesem Grund sind auch die Bedienzeiten aufeinander abgestimmt. Die Bedienzeit umfasst die Bearbeitungszeit der Maschine und den Transport bis zur nachfolgenden Anlage. Der Ofen stellt die Engpasskapazität dar und wird im Drei-Schicht-Betrieb geführt, alle übrigen Anlagen im Zwei-Schicht-Betrieb. Der Materialfluss des Ofens ist durch vor- und nachgelagerte Puffer von den übrigen Anlagen der Linie entkoppelt. Die Bedienzeit des Ofens  $t_{Fi}$  errechnet sich nach Gleichung (7.1), wobei  $t_B$  die Betriebszeit des Ofens darstellt, welcher 24 Stunden täglich läuft. Die theoretische Bruttokapazität  $C_{Bi}$  des Ofens ist in Tabelle 7.4 ersichtlich. Das Sortieren und Verpacken wird als ein Produktionsschritt betrachtet.

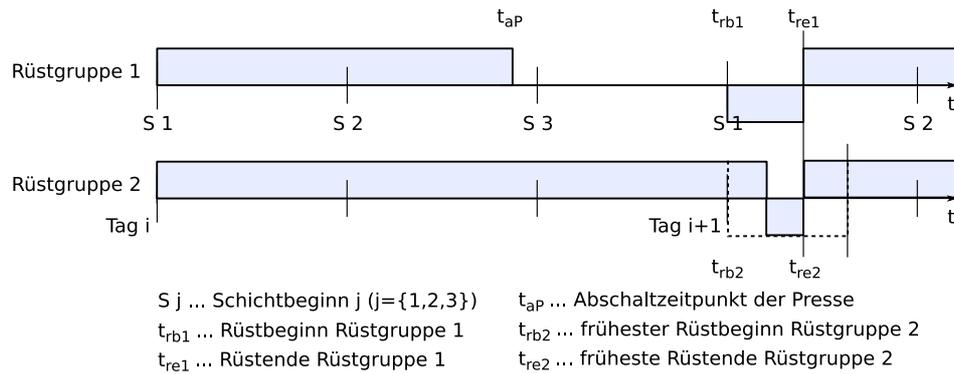


Abbildung 7.7: Steuerdiagramm des Rüstvorganges (Rüstgruppe 1: Presse, Trocknungsanlage, Anlage zum Glasieren, Rüstgruppe 2: Ofen)

$$t_{Fi} = \frac{t_B}{C_{Bi}} \quad (7.1)$$

Der Rüstvorgang der Produktionslinie ist in Abbildung 7.7 schematisch abgebildet. Der Rüstvorgang der Rüstgruppe 1 (Presse, Trocknungsanlage, Anlage zum Glasieren) beginnt jedenfalls zu Beginn der ersten Schicht ( $t_{rb1}$ ). Der Ofen (Rüstgruppe 2) wird umgerüstet, sobald das letzte Produkt des Produktionsloses gebrannt ist. Ist die Rüstdauer des Ofens größer als die der Rüstgruppe 1, so sollte der Rüstvorgang beider Gruppen zum Beginn der ersten Schicht starten (Abbildung 7.7, strichlierte Linie). Ist die Rüstdauer des Ofens kleiner als die der Rüstgruppe 1, so sollte der Rüstbeginn des Ofens so gewählt werden, dass beide Rüstgruppen zeitgleich wieder betriebsbereit sind. Keinesfalls sollte der Ofen jedoch früher betriebsbereit sein als alle übrigen Maschinen der Linie, da dies die Auslastung der Engpasskapazität Ofen mindern würde. Der Rüstzeitpunkt des Ofens wird über die Größe des Puffers vor dem Ofen gesteuert. Die gepufferte Menge ungebrannter Fliesen zu Beginn der dritten Schicht muss so groß sein, dass der Ofen während der Nachtschicht und während des Rüstvorganges der Rüstgruppe 1 nicht leer läuft. Auf die Puffergröße kann durch den Abschaltzeitpunkt  $t_{aP}$  der Presse in der zweiten Schicht Einfluss genommen werden. Die Bedingungen an die Steuerung des Umrüstvorganges, wie durch Abbildung 7.7 illustriert, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Rüstbeginn Rüstgruppe 2 gleich oder nach Rüstbeginn Rüstgruppe 1:  $t_{rb2} \geq t_{rb1}$
- Rüstende Rüstgruppe 2 gleich oder nach Rüstende Rüstgruppe 1:  $t_{re2} \geq t_{re1}$

Da auf die Erhebung der Rüstzeiten verzichtet werden musste, sind diese durch Schätzungen zu approximieren. Das Schema, nach dem die Schätzungen durchgeführt wurden, ist dem Anhang Abschnitt A.3 zu entnehmen.

### 7.3.3 Lagerung und Vertrieb

Die Subsysteme *Lagerung und Kommissionierung* und *Vertrieb* der Lasselsberger, a.s. sind durch das Submodell *Lagerung und Vertrieb* (Abbildung 7.6, A3) abgebildet. Der Zugang *Fliese* bildet die Verbindung der Submodelle *Produktion* und *Lagerung und Vertrieb*. Der

Absatz ist als wöchentlich aggregierter Abgang aus dem Lager abstrahiert. Die Zusammensetzung einzelner Bestellungen findet keine Berücksichtigung, aus diesem Grund ist auch die Modellierung des Kommissionierprozesses nicht erforderlich.

Die Bestellungen werden durch den wöchentlichen Absatz des Jahres 2007 abstrahiert und sind in Form einer Liste vorgegeben. Zum Ende jeder simulierten Woche ist der Absatz aus dem Lager abzufassen. Ist die geforderte Menge nicht im Lager, so wird der fehlende Anteil vorerst als Fehlmengenge verbucht. Lasselsberger, a.s. gibt eine Verfügbarkeitsgarantie entsprechend der Produktklassifikation ersichtlich in Tabelle 7.1. Aus diesem Grund wird überprüft, ob Fehlmengen revidiert und innerhalb des Zeitraums der Verfügbarkeitsgarantie aus dem Lager abgebucht werden können. Tabelle 7.7 enthält die im Modell verwendeten Zeiträume der Verfügbarkeitsgarantie.

Tabelle 7.7: Zeiträume der Verfügbarkeitsgarantie

Kennzeichnung	Verfügbar...
A	innerhalb 2 Wochen
B	innerhalb 4 Wochen
C	innerhalb 8 Wochen

Das Submodell *Lagerung und Vertrieb* beinhaltet weiters die Bestandsführung, die Berechnung der Lagerreichweite und die Aktualisierung der Reservierungen. Die Lagerreichweite<sup>1</sup>

$$RW = \frac{s}{\bar{x}}, \quad (7.2)$$

wobei  $s$  dem disponiblen Bestand und  $\bar{x}$  dem durchschnittlichen Lagerabgang entspricht. Der Lagerabgang  $\bar{x}$  wird bei Lasselsberger, a.s. über  $n = 3$  Monate gemittelt und errechnet sich wie folgt:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{t-j}. \quad (7.3)$$

$x_{t-j}$  entspricht dem Abgang in der Periode  $t - j$ . Die Reservierung errechnet sich aus der Summe des Absatzes der beiden folgenden Wochen und den Fehlbeständen innerhalb der Verfügbarkeitsgarantie. Der Absatz der beiden folgenden Wochen kann aufgrund von Anfragen von Kunden als bekannt angenommen werden.

## 7.4 Simulationsmodell - Implementierung in Enterprise Dynamics

Zur Implementierung des Konzepts aus Abschnitt 7.3 in ein Simulationsmodell wurde das Softwarepaket Enterprise Dynamics (ED) verwendet. Während das Produktionsmodell sowie das Modell der Lagerung und des Vertriebs vollständig in ED implementiert sind, ist die Produktionsplanung nur teilweise in ED realisiert. Die Strategie zur Reihenfolgeplanung

<sup>1</sup> Vgl. Wiendahl (1989), S.304.

wurde in Microsoft (MS) Excel umgesetzt. Abbildung 7.8 enthält die grafische Darstellung des Modells aus ED. Das Simulationsmodell gliedert sich in die drei Submodelle *Produktionsplanung*, *Produktion* und *Lagerung und Vertrieb*. Jedes Submodell gliedert sich in einen Daten- und einen Simulationsteil, wobei sich der Datenteil durch die grauen Atome mit der Aufschrift “Table” vom Simulationsteil unterscheiden lässt.

#### 7.4.1 Modellinitialisierung

Zu Beginn jedes Simulationslaufes ist das Modell zu initialisieren. Dies erfolgt mit Hilfe des Graphical User Interface (GUI) *Fliesenproduktion* (siehe Abschnitt 7.4.5). Im Rahmen der Initialisierung werden der vorgegebene Absatz, der Anfangslagerbestand und der Produktionsplan der ersten Woche sowie Rüstzeiten, Bedienzeiten und sonstige Planungsparameter aus Textdateien importiert und in Tabellen gespeichert. Die Verwaltung der Basisdaten in Textdateien wurde gewählt, um eine anwenderfreundliche Manipulation zu ermöglichen. Textdateien (mit dem Postfix csv) entsprechen einem allgemein gültigen Standard und können durch beliebige Programme, wie zum Beispiel durch MS Excel, bearbeitet werden.

Des Weiteren werden die Tabellen *Fehlmengen*, *Reichweite*, *Reservierungen*, *LagerHist* und *ResHist* mit Null-Werten initialisiert. Tabelle 7.8 enthält eine Beschreibung aller Tabellen des Modells. Die Funktionen zur Initialisierung des Simulationsmodells sind im *Controller-Atom* (siehe Abbildung 7.8, Quadrat mit der Markierung “c”) kodiert.

Tabelle 7.8: Tabellen des Simulationsmodells

Tabellenbenennung	Beschreibung
PlanParam	Planungsparameter, vor Reihenfolgeplanung (siehe Tabelle 7.5)
PlanParam2	Planungsparameter, nach Reihenfolgeplanung
PParam	Servicezeiten der Bedienstationen
ruestvorBN	Rüstzeiten der Rüstgruppe 1 (Presse, Trocknung, Glasur)
ruestBN	Rüstzeiten der Rüstgruppe 2 (Ofen)
ruestnBN	Rüstzeiten der Rüstgruppe 3 (Sortierung, Verpacken)
Lager	Primärbedarfslager
LagerHist	Wöchentliche Dokumentation der Lagerdaten
Reservierungen	Reservierungen an Primärbedarf
ResHist	Wöchentliche Dokumentation der Reservierungen
Absatz	Wöchentlich vorgegebene Absatzmengen
Fehlmengen	Fehlmengen an Primärbedarf
Reichweite	Lagerreichweite
bn	Dokumentation der Betriebs- und Rüstzeiten des Ofens
vbn	Dokumentation der Betriebs- und Rüstzeiten der Rüstgruppe 1

#### 7.4.2 Produktionsplanung

Jede simulierte Woche beginnt mit dem Planungsereignis. Abbildung A.5 des Anhangs enthält ein Flussdiagramm des Planungsablaufes. Dieser Ablauf ist im Atom *Controller PP* in der Programmiersprache 4DScript kodiert. Vorbereitend auf die Planung werden die statischen Planungsparameter der Tabelle *PlanParam* mit den aktuellen Daten der Tabellen *Lager*,

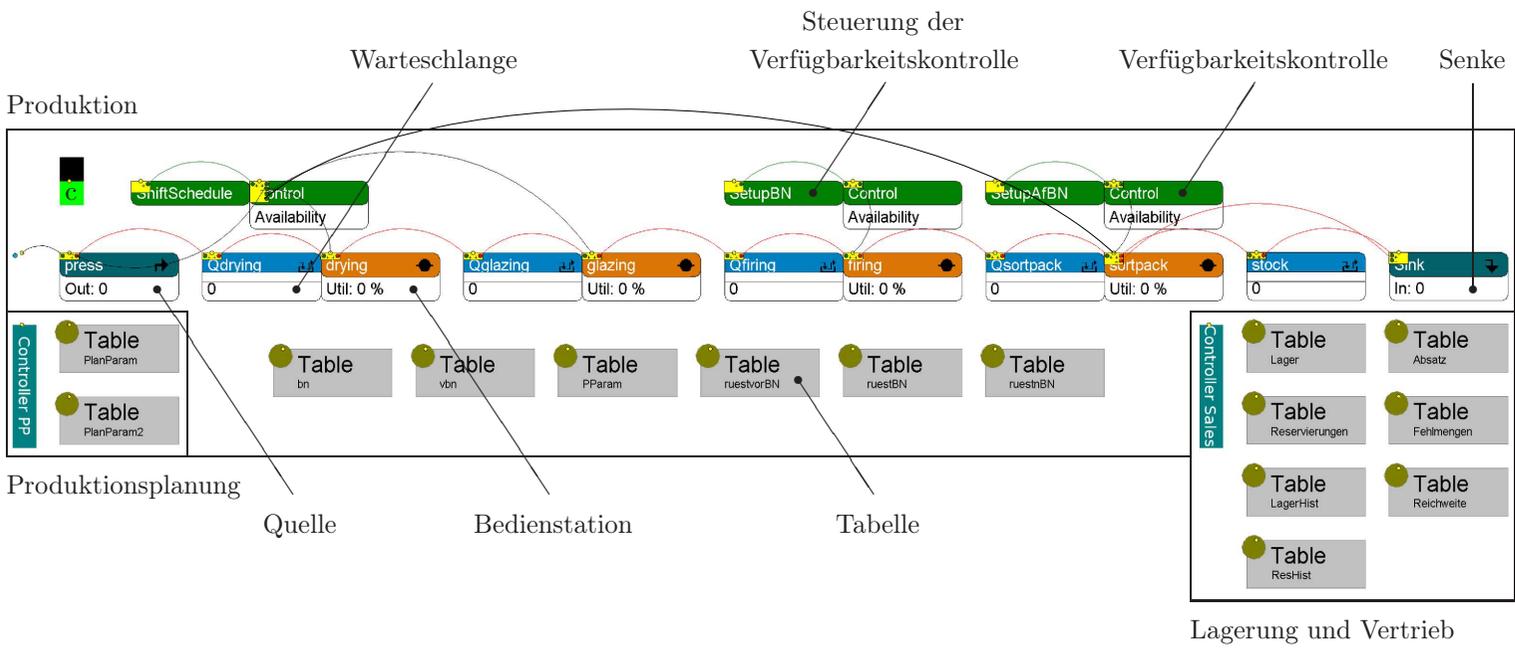


Abbildung 7.8: Simulationsmodell in Enterprise Dynamics

*Absatz, Fehlmengen, Lagerreichweite* und *Reservierungen* für jedes Produkt aus *PlanParam* ergänzt. Nach der Terminierung des nächsten Planungslaufes im Intervall einer Woche (168 Stunden) folgen die Ereignisse:

- Produktionsplan fixieren
- Reihenfolgeplanung auslösen
- Mengenplanung auslösen

Die Produktionsmenge wird in Produktionstagen geplant. Durch die Fixierung des Produktionsplans, welcher in der Tabelle des Atoms *press* enthalten ist, werden Änderungen bis zum Fixierungshorizont von einer Woche (min. 7 Tage) verhindert.

Da die Möglichkeiten der Handhabung und Sortierung von Listen in ED begrenzt sind, wurde die Strategie der Reihenfolgeplanung mittels Visual Basic for Applications (VBA) in MS Excel implementiert. Die Liste der Planungsparameter aus *PlanParam* wird aus ED in eine Textdatei exportiert. Anschließend erfolgt der Aufruf des VBA-Macros in MS Excel. Das Macro endet mit dem erneuten Export der Produktliste in die Textdatei. Die Reihenfolgeplanung schließt mit dem Import der Textdatei in die Tabelle *PlanParam2* ab.

### Implementierung der Reihenfolgeplanung in MS Excel

ED verfügt über eine Dynamic Data Exchange (DDE)-Schnittstelle zur Kommunikation mit MS Excel. Zu diesem Zeitpunkt scheint diese jedoch für längere Simulationsläufe aufgrund Instabilität ungeeignet. Daher wird auf Textdateien als Kommunikationsschnittstelle zurückgegriffen. Das Macro weist folgenden Aufbau auf:

- Tabellenbereinigung: Entfernen alter Planungsdaten
- Datenimport: Importieren aktueller Planungsdaten aus der Textdatei
- Reihenfolgeplanung: Umsetzung individueller Strategien zur Reihenfolgeplanung
- Datenexport: Exportieren der Produktreihenfolge in die Textdatei

Auf den Aufbau der getesteten Strategien zur Reihenfolge- und Mengenplanung wird in Abschnitt 7.6 eingegangen.

## 7.4.3 Produktion

### Modellaufbau

Der Modellaufbau der Produktionslinie, wie aus Abbildung 7.8 ersichtlich, setzt sich aus der Quelle *press* und den Bedienstationen *drying*, *glazing*, *firing* und *sortpack* zusammen. Da die Servicezeiten der Bedienstationen die Transportzeiten enthalten, wurde auf die Modellierung der Fließbänder verzichtet. Die Abstimmung der Quelle *press* und der Bedienstationen *drying* und *glazing* gewährleistet einen kontinuierlichen Materialfluss ohne die Anhäufung von Pufferbeständen, da die Bedienzeiten konstant sind. Dennoch wurde auf eine Modellierung der Warteschlangen *Qdrying* und *Qglazing* nicht verzichtet, da sie die Anwendungsflexibilität

des Modells im Falle komplexerer Produktionsstrukturen (beispielsweise die Dekorfliesenproduktion) erhöhen.

Die Warteschlange  $Q_{firing}$  dient einerseits als Puffer für die Nachtschicht, andererseits zur Entkoppelung der Rüstgruppen 1 (*press, drying, glazing*) und 2 (*firing*) während des Rüstprozesses und damit einer höheren Auslastung des Ofens.  $Q_{sortpack}$  dient in gleicher Weise der Entkoppelung der Rüstgruppen 2 und 3 (*sortpack*). Das Atom *stock* ist die Abstraktion des Lagerverwalters im Realsystem und erhöht den Bestand des Lagers. Da mit der Lagerung von Produkt-Atomen während der Simulation ein starker Verbrauch an Rechenleistung einhergehen würde, wird der Lagerbestand lediglich in der Tabelle *Lager* dokumentiert und das Produkt-Atom selbst im Atom *sink* zerstört.

### Press

Das Atom *press* führt beim Zurücksetzen (Event: *OnReset*) des Simulationsmodells folgende Programmschritte durch:

- Initialisierung aller globalen Variablen des Submodells *Produktion*
- Setzen der Bedienzeiten des ersten Produkts auf dem Produktionsplan
- Terminierung der Steuerung des Schichtzählers
- Terminierung der Steuerung zur Berechnung des Beginns der nächsten 1. Schicht
- Terminierung der Steuerung zur Berechnung des Beginns der nächsten 3. Schicht
- Erzeugen des ersten Produkt-Atoms

Nachdem das Produkt-Atom die Presse verlassen hat, wird das Ereignis *OnExited* ausgelöst. Ist nach Erhöhung des Produktionsmengen Zählers der Auftrag laut Plan erfüllt, so wird die Markierung für das letzte Produkt des Loses am aktuellen Produkt-Atom aktiv gesetzt und der Betrieb der Presse eingestellt. Ist der Produktionsauftrag nicht erfüllt, ist jedoch der aktuelle auch der letzte Produktionstag, so folgt die Schätzung der Rüstzeiten auf das nächste Produkt. Da in diesem Pilotmodell die Rüstzeit als konstant angenommen und die Verteilung vernachlässigt wird, entspricht die Schätzung den Werten der Tabellen *ruestvorBN* und *ruestBN*.

Am letzten Produktionstag wird der Betrieb der Presse eingestellt, sobald der Puffer des Ofens ausreicht, um die Auslastung des Ofens in der Nachtschicht und während des Rüstvorganges der Rüstgruppe 1 (sollte die Rüstzeit des Ofens kleiner sein als die der Rüstgruppe 1) zu gewährleisten. Diese Bedingung ist durch Ungleichung 7.4 ausgedrückt, wobei  $t_{Fi}$  die Bedienzeit des Ofens,  $q_{Fi}$  die Länge der Warteschlange,  $t_{S1}$  der Zeitpunkt des Beginns der ersten Schicht,  $t_{R1}$  und  $t_{R2}$  die Rüstzeiten der Rüstgruppen 1 und 2 und  $t$  der aktuelle Zeitpunkt sind. Ist die Bedingung erfüllt, so wird der Produktionsstart als Impuls zur Auslösung des Rüstvorganges für den Beginn der ersten Schicht festgelegt und der Betrieb der Presse gestoppt. Ist der aktuelle Tag nicht der letzte Produktionstag oder der Puffer nicht ausreichend, so wird die Erzeugung des nächsten Produkt-Atoms eingeleitet. Die Steuerung der Presse ist in Abbildung A.6 des Anhangs grafisch dargestellt.

$$t_{Fi}q_{Fi} \geq t_{S1} + \max\{0, t_{R1} - t_{R2}\} - t \quad (7.4)$$

## Arbeitsschichten

Die Steuerung der Arbeitsschichten erfolgt durch die Atome *ShiftSchedule*, Tochter des Atoms *Time Schedule Availability* aus der Atombibliothek von ED und *AvailControl*, Tochteratom von *Availability Control* (dargestellt in Abbildung 7.9). Das Atom *ShiftSchedule* enthält eine Liste mit Zeitintervallen und den dazugehörigen Zustand der Verfügbarkeit. Der Ausgang dieses Atoms ist mit dem Eingang der *Availability Control* verbunden. Der *Central Channel* aller Atome, deren Verfügbarkeit entsprechend der Liste in *ShiftSchedule* gesteuert werden soll, ist mit einem Ausgang der *Availability Control* verbunden. Die zwei Positionen der Liste bewirken 16 Stunden Verfügbarkeit, gefolgt von acht Stunden, in denen die betroffenen Atome nicht verfügbar sind. Die globale Variable *ShiftCounter* differenziert jedoch in drei Schichten, wobei jede Schicht eine Dauer von acht Stunden besitzt.

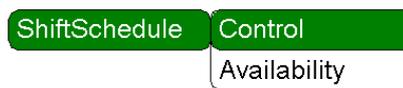


Abbildung 7.9: Atome *Availability Control* und *Time Schedule Availability* zur Steuerung der Arbeitsschichten

## Rüstvorgang

Die Auslösung des Rüstvorgangs der Rüstgruppe 1 erfolgt durch eine Nachricht des Atoms *glazing* an das Atom *press*. Diese Nachricht wird gesendet, sobald ein Produkt-Atom, dessen Label *lastP* aktiv ist, das Atom *glazing* verlassen hat. Nach der Dokumentation der tatsächlich hergestellten Fliesenfläche werden die Rüstzeit und die Bedienzeit des neuen Produktes ermittelt. Die Einleitung des Produktionsstartes erfolgt, sobald die Rüstzeit verstrichen ist. Dauert der Rüstvorgang bis in die dritte Schicht, so wird die Verfügbarkeit der Maschinen indiziert, die Presse startet jedoch erst zu Beginn der ersten Schicht. Ist das Rüsten in der ersten oder zweiten Schicht beendet, so folgt der unmittelbare Start der Presse. Der Rüstvorgang der Rüstgruppe 1 ist in Abbildung A.7 des Anhangs grafisch dargestellt.

Das Umrüsten des Ofens wird ebenfalls ausgelöst, sobald das letzte Produkt-Atom (Label *lastP* aktiv) des Ofens den Ofen verlassen hat. Die Auslösung erfolgt durch das Ereignis *Event 10* des Atoms *firing*. Die Verfügbarkeit des Ofens wird durch die Atome *SetupBN* und *AvailBN* gesteuert. Eine Adaptierung der Programmierung von *SetupBN* ermöglicht die Steuerung mittels Nachrichten. Das *Event 10* übermittelt eine Nachricht an *SetupBN*, wodurch die Verfügbarkeit des Ofens nicht mehr gegeben ist. Nach Festlegung der Rüst- und Bedienzeiten erfolgt die Terminierung des Produktionsstarts. Ist die Rüstzeit verstrichen, wird der Produktionsstart eingeleitet (*Event 11*) und der Ofen, durch die Übermittlung einer weiteren Nachricht an *SetupBN*, wieder in Betrieb genommen. Der Rüstprozess des Ofens ist in Abbildung A.8 des Anhangs grafisch dargestellt.

Der Rüstvorgang der Rüstgruppe 3 (Anlage zum Sortieren und Verpacken) entspricht dem des Ofens mit dem Unterschied, dass wie bei Rüstgruppe 1 nach dem Umrüsten die Produktion nur in Schicht 1 oder 2 sofort wieder aufgenommen wird, andernfalls erst wieder zu Beginn der ersten Schicht.

## Detailierungsgrad

Der Detaillierungsgrad des Produktionsmodells besitzt einen erheblichen Einfluss auf die Rechenzeit der Simulation. Von der Definition eines Produkt-Atoms als eine Fliese ist aus diesem Grund abzusehen. Die Basiseinheit für den Produktionsprozess ist daher  $1\text{ m}^2$  Fliesenfläche. Um eine zweckdienliche Rechenzeit pro Simulationslauf zu gewährleisten, ist jedes Produkt-Atom mit der Wertigkeit des Aggregationsparameters  $k = 10$  definiert. Die Generierung eines Produkt-Atoms bedeutet somit die Fertigung von  $10\text{ m}^2$  Fliesenfläche. Die Bedienzeiten aus Tabelle *PParam* sind für den Einsatz in der entsprechenden Bedienstation mit dem Aggregationsparameter zu multiplizieren. Für eine parallele Simulation einer größeren Anzahl an Produktionslinien ist der Aggregationsparameter entsprechend zu erhöhen. Die zeitliche Detaillierung der Submodelle *Produktionsplanung* und *Lagerung und Vertrieb* wurde mit einer Woche festgelegt.

### 7.4.4 Lagerung und Vertrieb

Um die Datenbasis für den ersten Planungslauf zu schaffen, erfolgt durch das Ereignis *On-Reset* beim Zurücksetzen erstmals die Berechnung von Lagerreichweite und Reservierung für jedes Produkt der Tabelle *Lager*. Des Weiteren wird eine Schleife ausgelöst, welche jede Woche (168 Stunden) den Absatz aus dem Lager verbucht, die Lagerreichweite errechnet, die Reservierungen ermittelt sowie Lagerstand und Reservierung dokumentiert. Diese Vorgänge werden im Folgenden erläutert.

Jede Simulationswoche endet mit der Verbuchung des Absatzes der vergangenen Woche, welcher durch die Tabelle *Absatz* vorgegeben ist und auf realen Absätzen des Jahres 2007 basiert. Die Tabelle *Absatz* enthält 70 Wocheneinträge, wobei die ersten zwölf lediglich zur Berechnung der Lagerreichweite dienen und nicht simuliert werden und weitere sechs Wochen als Einschwingphase vorgesehen sind. Die auswertbare Simulationsdauer ist mit 52 Wochen angesetzt. Der Lagerstand des Produktes  $i$  am Ende der Woche  $t$  errechnet sich zu

$$s_{t,i} = \begin{cases} s_{t-1,i} - x_{t,i} & \text{für } s_{t-1,i} > x_{t,i}, \\ 0 & \text{für } s_{t-1,i} \leq x_{t,i}, \end{cases} \quad (7.5)$$

wobei  $s_{t-1,i}$  der Bestand des Produktes  $i$  am Ende der Vorwoche und  $x_{t,i}$  der Absatz des Produktes  $i$  der aktuellen Woche laut Absatzliste ist. Ist der Absatz höher als die verfügbare Lagermenge, so wird die fehlende Menge vorerst in der Tabelle *Fehlmengen* verbucht. Der Fehlbestand des Produktes  $i$

$$f_{t,i} = \begin{cases} x_{t,i} - s_{t-1,i} & \text{für } s_{t-1,i} < x_{t,i}, \\ 0 & \text{für } s_{t-1,i} \geq x_{t,i}. \end{cases} \quad (7.6)$$

Des Weiteren erfolgt eine Überprüfung, ob Fehlbestände innerhalb der Verfügbarkeitsgarantie, laut Tabelle 7.7, revidiert und aus der Tabelle *Lager* abgebucht werden können (siehe Abschnitt 7.3.3, Lagerung und Vertrieb).

Die Lagerreichweite des Produktes  $i$  in Periode  $t$  entspricht

$$RW_{t,i} = \frac{s_{t,i} + \bar{p}_{t+1,i}}{\frac{4}{12} \sum_{j=0}^{11} x_{t-j,i}}, \quad (7.7)$$

wobei  $s_{t,i}$  der Lagerstand des Produktes  $i$  in Periode  $t$  und  $\bar{p}_{t+1,i}$  die innerhalb des Fixierungshorizonts (Woche  $t + 1$ ) bereits eingeplante Produktionsmenge des Produktes  $i$  ist. Die genaue Produktionsmenge  $p_{t+1,i}$  ist aufgrund der unterschiedlichen Rüstzeiten nicht ermittelbar, aus diesem Grund wird für den Schätzer  $\bar{p}_{t+1,i}$  auf die Richtsätze in Tabelle 7.9 zurückgegriffen. Die Richtsätze entsprechen dem Median der produzierten Fliesenfläche aus diversen Simulationsläufen.

Tabelle 7.9: Richtsätze für geplante Produktionsmengen (in  $m^2$ )

Produktionsmenge (Tage)	Format		
	20x20	33x25	45x25
1	4390	5720	3810
2	11360	13930	10180
3	18330	22130	16210

Zur Berechnung des durchschnittlichen Lagerabgangs  $\bar{x}$  (siehe Gleichung 7.2) wird der Absatz  $x_{t,i}$  der letzten zwölf Wochen (drei Monate) des Produktes  $i$  herangezogen, wobei die Lagerreichweite  $RW_{t,i}$  in Monaten (ein Monat wird approximiert durch vier Wochen) angegeben wird (siehe Gleichung 7.2 und Gleichung 7.3). Die Reservierung des Produktes  $i$

$$r_{t,i} = x_{t+1,i} + x_{t+2,i} + \sum_{j=0}^{m-1} f_{t-j,i} \quad \text{für } m = \{2, 4, 8\}, \quad (7.8)$$

wobei  $m$  der Verfügbarkeitsgarantie entspricht,  $x_{t+1,i}$  und  $x_{t+2,i}$  dem Absatz der beiden folgenden Wochen und  $f_{t-j,i}$  den Fehlmengen des Produktes  $i$  zum Zeitpunkt  $t - j$  (siehe Abschnitt 7.3.3, Lagerung und Vertrieb).

#### 7.4.5 Benutzeroberfläche: Fliesenproduktion

Die grafische Benutzeroberfläche aus Abbildung 7.10 erleichtert die Bedienung des Simulationsmodells, da es einige Standardfunktionen auf Knopfdruck ermöglicht. Die Schaltfläche *Prepare* dient zur Herstellung der Betriebsbereitschaft des Simulationsmodells. Es werden alle Daten der Tabellen importiert bzw. initiiert sowie das Ereignis *OnReset* jedes Atoms terminiert. *Sim 1 Y* führt einen Simulationslauf von der Simulationsdauer eines Jahres und der Einschwingdauer von sechs Wochen aus. Der Simulationslauf wird mit maximaler Geschwindigkeit ohne visuelle Ausgabe während der Simulation durchgeführt.

*Import All* importiert alle Daten, ohne das Modell betriebsbereit zu setzen. *Import INIT* initialisiert die Tabellen *Fehlmengen*, *LagerHist*, *Reservierungen* und *ResHist* mit dem Wert Null und importiert die Initiaallagerstände in Tabelle *Lager*. *Import Absatz* lädt die Absatzdaten, *Import PP* den Produktionsplan der ersten Woche und *Import Param* importiert die Rüstzeiten, Bedienzeiten und Planungsparameter. Des Weiteren stehen zwei Schaltflächen

zur Verwertung der Simulationsergebnisse zur Verfügung. *Export Results* transferiert die Tabellen *Absatz*, *Fehlmengen*, *LagerHist*, *Reichweite* und *ResHist* sowie den Produktionsplan aus dem Atom *press* nach MS Access. *Einzelausw* exportiert diese Tabellen nach MS Excel.



Abbildung 7.10: Benutzeroberfläche: Fliesenproduktion

## 7.5 Verifikation und Validierung

### 7.5.1 Verifikation

Im Zuge der Verifikation des Simulationsmodells wurden Untersuchungen vorgenommen, welche den Schluss auf eine fehlerfreie Implementierung des Modells zulassen. Im Folgenden sind diese Untersuchungen erläutert.

Wie aus Abbildung A.5 des Anhangs erkennbar, werden vorbereitend auf die Planung die wöchentlich aktualisierten Daten aus dem Bereich *Sales* übernommen. Um die fehlerfreie Übernahme der Daten zu überprüfen, wurde ein Vergleich der Tabellen *Lager*, *Fehlmengen*, *Reservierungen* und *Reichweite* mit den Daten aus *PlanParam* vorgenommen. Es konnte keine Abweichung festgestellt werden. Des Weiteren wurde ein Vergleich der Tabelle *PlanParam* und der Daten in MS Excel sowie der Tabelle *PlanParam2* vorgenommen, um einen fehlerfreien Datentransfer im Zuge der Reihenfolgeplanung zu gewährleisten.

Während eines Simulationslaufes wurde die Zeit dokumentiert, in der jede Rüstgruppe verfügbar oder nicht verfügbar war oder umgerüstet wurde. Dies ermöglicht die Kontrolle der Produktionsdauer und der Rüstdauer. Tabelle 7.10 zeigt einen Auszug der Rüstzeitkontrolle des Ofens, in der die während der Simulation erfassten Rüstzeiten (Spalte: *lt. Sim*) den Rüstzeiten laut Plan (Spalte: *lt. Plan*) gegenübergestellt sind. In gleicher Weise wurden Vergleiche der Rüstgruppen 1 und 3 sowie der Produktionsdauer durchgeführt. Es konnte keine Abweichung vom Sollwert festgestellt werden.

Tabelle 7.11 zeigt die Berechnung der produzierten Menge von Fliesen erster Qualität für eine Auswahl von fünf Produkten. Im Produktionsplan wird die von der Presse hergestellte Menge für jedes Produkt dokumentiert (Produktionsmenge brutto). Eine Hilfsroutine zählt den Ausschuss während des Verifikationslaufes. Somit lässt sich die Nettoproduktionsmenge errechnen. Zieht man von der Nettoproduktionsmenge die auf Lager liegende Menge von Produkten zweiter Qualität ab, so erhält man die Produktionsmenge erster Qualität.

Tabelle 7.10: Verifikation des Rüstprozesses (Abk.: lt. Sim...ermittelt durch Simulation, lt. Plan...laut Plan)

Produkt		Simulationszeit (h)		Rüstzeit (h)		Abweichung	
von	auf	Rüstbeginn	Rüstende	lt. Sim	lt. Plan	h	%
WATKB125	WARKA266	49,1	53,6	4,5	4,5	0,0	0,0
WARKA266	WARKA268	96,1	99,6	3,5	3,5	0,0	0,0
WARKA268	WATKB145	144,1	149,6	5,5	5,5	0,0	0,0
WATKB145	WARKB104	168,1	172,6	4,5	4,5	0,0	0,0
WARKB104	WAA1N132	216,1	223,6	7,5	7,5	0,0	0,0

Aus Tabelle 7.12 ist ebenfalls die Berechnung der Produktionsmenge erster Qualität für die gleiche Auswahl an Produkten ersichtlich. Hier erfolgt die Berechnung jedoch über die Lagerbilanz<sup>2</sup>. Vergleicht man die Spalten *Qualität I* aus Tabelle 7.11 und Tabelle 7.12, so ist keine Abweichung feststellbar. Dies ist ein Indiz für eine fehlerfreie Berechnung der Lagerbewegungen, der Fehlmengen und deren Dokumentation sowie für eine korrekte Verteilung von Ausschuss, Produkten erster und zweiter Qualität. Auch für die Reservierung und die Lagerreichweite wurde eine analytische Kontrolle in MS Excel durchgeführt, die keine signifikanten Abweichungen vom Sollwert zeigen.

Tabelle 7.11: Verifikation des Simulationsmodells; Teil 1 (Abk.: Prod...Produktionsmenge)

Produkt	Prod brutto		Ausschuss		Prod netto		Qualität II		Qualität I	
	$m^2$	%	$m^2$	%	$m^2$	%	$m^2$	%	$m^2$	%
WATKB145	37920	100,0	2650	7,0	35270	100,0	1490	4,2	33780	95,8
WATKA011	59350	100,0	4340	7,3	55010	100,0	3120	5,7	51890	94,3
WARKA006	88670	100,0	6100	6,9	82570	100,0	3950	4,8	78620	95,2
WATKB079	39970	100,0	2780	7,0	37190	100,0	1890	5,1	35300	94,9
WARKB008	7010	100,0	430	6,1	6580	100,0	520	7,9	6060	92,1

Tabelle 7.12: Verifikation des Simulationsmodells; Teil 2 (Abk.: Endbst...Endbestand, Anfangsbst...Anfangsbestand)

Produkt	Endbst	Anfangsbst	Absatz	Fehlmengen	Qualität I	Abweichung	
	$m^2$	$m^2$	$m^2$	$m^2$	$m^2$	$m^2$	%
WATKB145	4812	8176	40879	3735	33780	0,0	0,0
WATKA011	17236	8055	45128	2419	51890	0,0	0,0
WARKA006	49059	6669	37253	1023	78620	0,0	0,0
WATKB079	10120	5967	31523	376	35300	0,0	0,0
WARKB008	5412	3442	18859	14769	6060	0,0	0,0

Des Weiteren wurden die Zufallszahlen fixiert, um die Reproduzierbarkeit des Simulationslaufes zu gewährleisten. Der Vergleich der Tabellen aus dem Submodell *Sales* (siehe Abbildung 7.8) der beiden Simulationsläufe zeigt keine signifikante Abweichung.

Abschließend erfolgte ein Structured Walk-Through (siehe Abschnitt 5.2, Verifikation), in dem jede Codezeile kritisch hinterfragt wurde. Es konnte keine Unschlüssigkeit in der Pro-

<sup>2</sup> Gegenüberstellung von Zu- und Abgängen des Lagers

grammierung festgestellt werden. Auch die visuelle Kontrolle durch die Animation der Simulation zeigt keine Auffälligkeiten.

### 7.5.2 Validierung

Der Vergleich mit dem Realsystem ist eine verbreitete Methode der Validierung. In diesem Modell ist sie jedoch nur sehr begrenzt anwendbar, da die Interdependenzen zwischen den Produktionslinien nicht berücksichtigt werden und nur eine Produktionslinie im Modell abgebildet ist. Somit ist es auch nicht möglich, einen realen Produktionsplan im Zuge der Validierung zu simulieren. Aus diesem Grund werden zur Validierung des Simulationsmodells die Sensitivitätsanalyse, Annahmen und Theorien sowie der allgemeine Vergleich mit dem Realsystem herangezogen.

Zur Verhaltensvalidierung wurden drei Simulationsläufe mit niedriger, mittlerer und hoher Produktionsdauer je Produktionslos durchgeführt. Als niedrig gilt ein Produktionstag, zwei Tage entsprechen mittlerer und drei Produktionstage je Los hoher Produktionsdauer. Die Ergebnisse der Simulationsläufe sind in Tabelle 7.13 zusammengefasst. Entsprechend den Erwartungen ist bei niedriger Produktionsdauer der Einfluss der Rüstzeit auf die Auslastung sehr groß. Dies führt zu hohen Fehlmengen und kontinuierlich fallendem Lagerstand (siehe Abbildung 7.11) ebenso wie zu fallender Lagerreichweite (siehe Abbildung 7.12).

Tabelle 7.13: Verhaltensvalidierung durch Variation der Produktionsmenge je Los

Produktionsdauer ( <i>qualitativ</i> )	niedrig	mittel	hoch
Produktionsdauer ( <i>Tage</i> )	1	2	3
Auslastung des Ofens (%)	67,3	84,8	89,7
Fehlmengen ( $m^2$ )	219 004	186 748	285 383
Steigung Lagerrend ( $m^2/Woche$ )	-5 300	1 800	6 100
Reichweite Median ( <i>Monate</i> )	0,51	1,37	0,46

Die Produktionsdauer von zwei Tagen pro Produktionslos zeigt ein besseres Verhältnis von Rüstzeit zu Produktionszeit. Dies zeigt sich in einer höheren Auslastung bei fallenden Fehlmengen. Der Lagerstand tendiert leicht zu steigen trotz vorhandener Fehlmengen. Dies ist ein Indiz für Probleme in der Reihenfolgeplanung oder einen zu niedrigen Pufferbestand im Lager.

Eine hohe Produktionsdauer je Los von drei Tagen führt einerseits zu einer guten Auslastung von ca. 90%, andererseits ist die Produktion nicht flexibel genug, um der Nachfrage einzelner Produkte nachzukommen. Dies führt zu einem erheblichen Anstieg der Fehlmengen bei stark steigendem Gesamtlagerstand. Der qualitative Verlauf von Gesamtlagerstand und Lagerreichweite entsprechen den Erwartungen und sind in Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12 grafisch dargestellt.

Nach Firmenangaben ist die Auslastung des Ofens der realen Produktionslinie mindestens 90%. Diese Auslastung wird im Simulationsmodell nur unter der Duldung erheblicher Fehlmengen und ohne Berücksichtigung sekundärer Planungsparameter, wie beispielsweise die Minimierung der Rüstzeit oder der Anzahl an Formatwechsel, erreicht. Die Auslastung in der Simulation liegt bei etwa 85%. Reale Fehlmengen aufgrund von Kapazitätsengpässen sind nur sehr schwierig abschätzbar, da nur eingegangene Aufträge erfasst werden können.

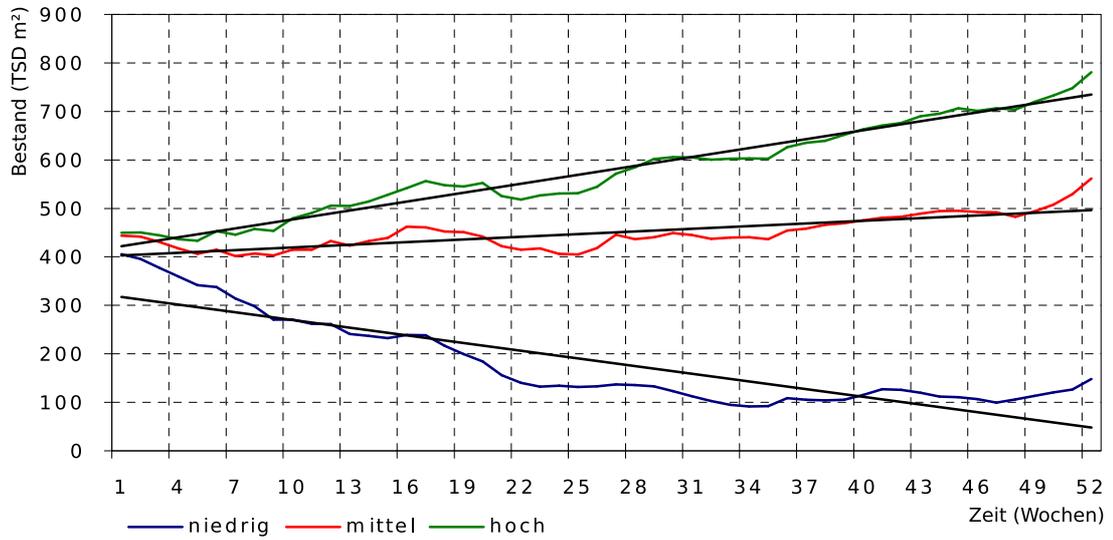


Abbildung 7.11: Simulationslauf Validierung: Gesamtlagerstand über die Zeit; Produktionsdauer: niedrig, mittel, hoch

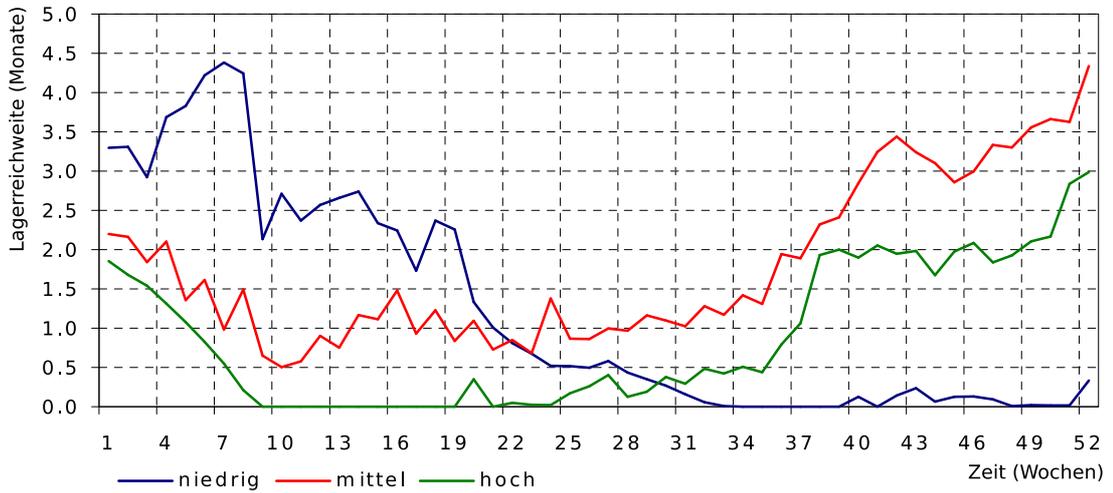


Abbildung 7.12: Simulationslauf Validierung: Lagerreichweite (Median) über die Zeit; Produktionsdauer: niedrig, mittel, hoch

Fehlbestände der Simulation beziehen sich daher auf jene Absätze, die im realen System zur Gänze erfüllt werden konnten.

Dieser Performanceunterschied stellt einerseits die empirische Gültigkeit des Modells in Frage, wird andererseits jedoch bewusst in Kauf genommen, da auf eine Datenerhebung der Rüstzeiten verzichtet und auf Schätzwerte zurückgegriffen wurde. Die strukturellen Abstraktionen und der Verzicht auf die Datenerhebung verhindern somit den Schluss auf ein strukturell und empirisch gültiges Modell.

Da das qualitative Verhalten des Modells den Beobachtungen des Realsystems entspricht und somit die Erwartungen erfüllt sowie die Aufgabenstellung in Abschnitt 7.1 keine quantitativen Schlüsse fordert, wird zu diesem Zeitpunkt auf eine Remodellierung verzichtet und die Versuchsdurchführung fortgesetzt.

## 7.6 Versuchsplanung

Dieser Abschnitt beinhaltet eine Beschreibung der geplanten Versuche mit dem Simulationsmodell. Tabelle 7.14 zeigt eine Zusammenfassung der Versuchsreihen und die Parameter der einzelnen Simulationsläufe. Um Aufschluss über stochastische Einflüsse (Trennung von Ausschuss, Trennung zwischen erster und zweiter Qualität) zu gewinnen, werden zehn Wiederholungen jedes Simulationslaufes durchgeführt. Jeder Simulationslauf hat eine Dauer von 58 Wochen, wobei sechs Wochen als Einschwingperiode vorgesehen sind und nicht in die Auswertung eingehen.

Die Lagerreichweite und die Reservierung erteilen jedem Produkt ein Maß an Priorität zur Produktion. Die Gewichtung der beiden Kriterien wird über die Klassifikation der Lagerreichweite bewirkt. In der ersten Versuchsreihe werden fünf Simulationsläufe durchgeführt, wobei in Simulationslauf 1 keine Klassifikation der Lagerreichweite vorgenommen wird (Tabelle 7.14, I: 0). In den weiteren Simulationsläufen wird in eine, zwei, vier und acht Wochen klassifiziert (Tabelle 7.14, I: 1, 2, 4, 8). Nach Sortierung der Produkte nach den Klassen der Lagerreichweite erfolgt innerhalb der Klasse eine Sortierung nach der Reservierung. Die Produktionsmenge wird nach der Verfügbarkeitsgarantie geplant, wobei A-Produkte drei Tage produziert werden, B-Produkte zwei Tage und C-Produkte einen Tag. Der Initiaallagerstand zu Beginn der Simulation beträgt 20% des Jahresabsatzes 2007.

Die zweite Versuchsreihe stellt zwei Strategien mit jeweils drei verschiedenen Taktiken der Mengenplanung gegenüber. Eine Strategie ist die Planung anhand der Verfügbarkeitsgarantieklassifikation (Simulationsläufe L1 bis L3). Strategie 2, implementiert in den Simulationsläufen L3 bis L6, ist die Planung nach einer Pareto-Klassifikation (siehe Anhang, Abschnitt A.2). Unter Taktik ist die unterschiedliche Produktionsdauer eines Loses jeder Produktklasse zu verstehen. Die unterschiedlichen Taktiken der Simulationsläufe sind in Tabelle 7.14, rechte Seite der Spalte *Menge*, festgehalten.

Versuchsreihe 3 soll die Auswirkungen der Variation des Initiaallagerstandes auf das Simulationsmodell zeigen. Es werden sechs Simulationsläufe mit einem Lagerstand zu Beginn jedes Laufes von 0%, 15%, 20%, 25%, 30% bzw. 40% des Jahresabsatzes 2007 durchgeführt.

Tabelle 7.14: Versuchsplan (Abk.: Verfügbarkeit...Klassifikation nach Verfügbarkeitsgarantie)

Versuchsreihe	Simulationslauf	Reihenfolge		Menge	Initiallagerstand				
		I	II						
1	L1	<b>Lagerreichweite</b>	<b>0</b>	Reservierung	1	Verfügbarkeit	A-B-C:3-2-1	Absatz 2007	20%
	L2		<b>1</b>						
	L3		<b>2</b>						
	L4		<b>4</b>						
	L5		<b>8</b>						
2	L1	Lagerreichweite	4	Reservierung	1	Pareto- Verfügbar- Klassifikation	A-B-C:4-2-1	Absatz 2007	20%
	L2						A-B-C:3-2-1		
	L3						A-B-C:3-2-2		
	L4						A-B-C:4-2-1		
	L5						A-B-C:3-2-1		
	L6						A-B-C:3-2-2		
3	L1	Lagerreichweite	4	Reservierung	1	Verfügbarkeit	A-B-C:3-2-1	<b>Absatz 2007</b>	0%
	L2								15%
	L3								20%
	L4								25%
	L5								30%
	L6								40%

## 8 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der durchgeführten Versuche dokumentiert. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich das aus der Simulation gewonnene Datenmaterial lediglich zum qualitativen Schluss eignet. Die Ergebnisse sind quantitativ nicht auf das Realsystem übertragbar (siehe Abschnitt 7.5.2).

### 8.1 Versuchsreihe 1: Gewichtung der Planungskennzahlen

Die Versuchsreihe zeigt, dass sich für die Reihenfolgeplanung eine Strategie, die Lagerreichweite und Reservierung kombiniert, als günstiger erweist, als eine Planung, die nur auf einer der beiden Kennzahlen beruht. Abbildung 8.1 zeigt dies anhand der Summe nachgefragter Mengen, die nicht erfüllt werden konnten. Bei einer Klassenweite der Lagerreichweite von null Wochen erfolgt de facto keine Sortierung nach Reservierungen. Ist die Klassenweite so groß, dass alle Produkte in einer Klasse sind, so wird die Lagerreichweite vernachlässigt und nur nach den Reservierungen sortiert. Die Trendkurve (Polynom dritter Ordnung) zeigt ein Minimum der Fehlmengen bei einer Klassenweite von ca. 2,5 Wochen.

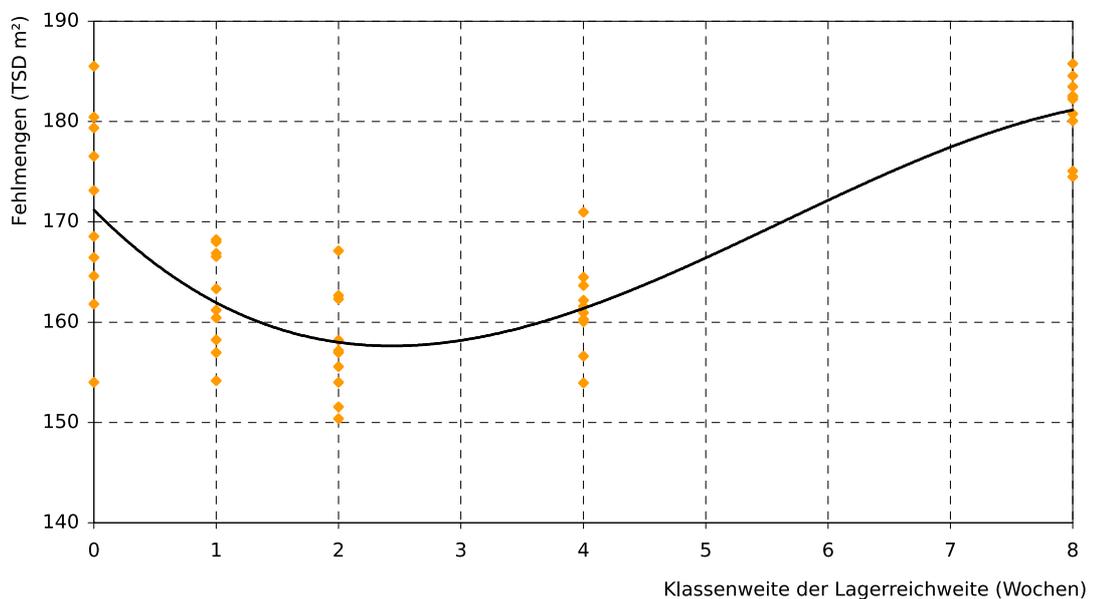


Abbildung 8.1: Versuchsreihe 1; Fehlmengen über Klassenweite der Lagerreichweite

## 8.2 Versuchsreihe 2: Strategien der Mengenplanung

Wie aus Tabelle 7.14 ersichtlich, wurde für die Simulationsläufe L1 bis L3 die Planung nach der Verfügbarkeitsgarantie der Produkte angewendet, und für die Simulationsläufe L4 bis L6 die Planung nach der Pareto-Klassifikation. Des Weiteren weisen die Simulationsläufe L1 und L4, L2 und L5 sowie L3 und L6 die gleiche Taktik der Mengenplanung auf.

Vergleicht man gleiche Taktiken beider Strategien, so sieht man aus Abbildung 8.2a, dass die Fehlmengen im Falle einer Planung nach Pareto-Klassifikation geringer sind. Die Taktik der Produktionsdauer von drei Tagen für A-Produkte, zwei Tagen für B-Produkte und einem Tag für C-Produkte weist das Minimum an Fehlmengen auf (Simulationslauf L5).

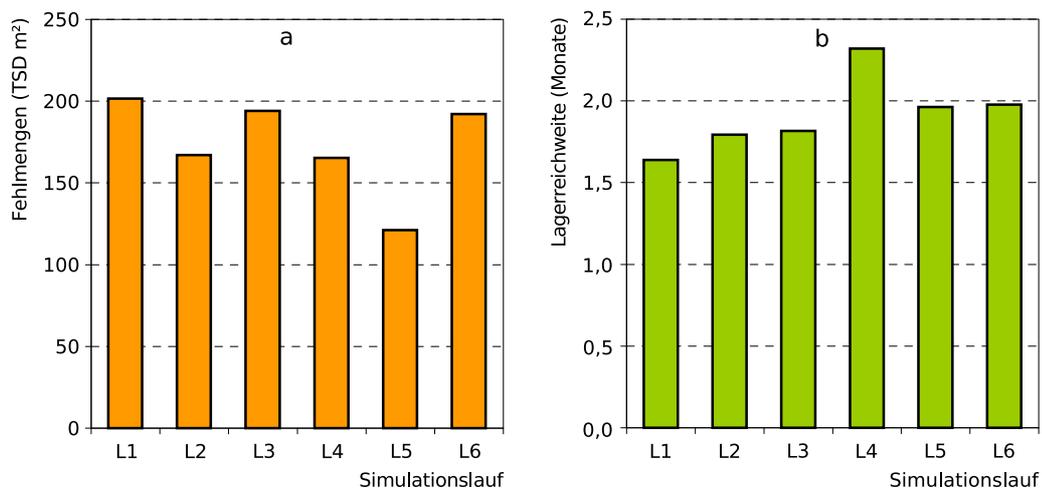


Abbildung 8.2: Versuchsreihe 2: Fehlmengen (a) und Lagerreichweite (b) der Simulationsläufe 1-6 (Median)

Abbildung 8.2b zeigt den Median der Lagerreichweite aller Beobachtungen. Es ist ersichtlich, dass diese in den Simulationsläufen L4 bis L6 höher ist als in L1 bis L3. Dies spricht ebenfalls für eine Planung nach der Pareto-Klassifikation, denn je höher die Lagerreichweite, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Nachfrage nicht erfüllt werden kann bzw. je höher die Lagerreichweite, desto mehr Potenzial bietet sich zur Reduktion der Bestände. Bei Betrachtung der Abbildungen 8.2 ist zu beachten, dass es sich um globale Daten handelt, die das ganze Produktportfolio umfassen. Sie geben keinen Aufschluss über die Planungsqualität einzelner Produkte.

Die Auslastung des Ofens hängt im Wesentlichen von der Produktionsdauer jedes Produktes ab. Abbildung 8.3 zeigt Maxima in den Simulationsläufen L3 und L6. Aus der Sicht der Auslastung der Produktionslinie erweist sich daher die dreitägige Produktion von A-Produkten sowie die zweitägige Produktion von B- und C-Produkten als günstig.

Es zeigt sich, dass die Planung nach Pareto-Klassifikation der Planung nach der Verfügbarkeitsgarantie vorzuziehen ist. Da kostenkalkulatorische Beurteilungskriterien nicht zur Verfügung stehen und somit der Wert der Auslastung nicht quantifiziert werden kann, empfiehlt sich aufgrund der hohen Lagerreichweite sowie der geringeren Fehlmengen die dreitägige Produktion von A-Produkten, die zweitägige Produktion von B-Produkten und die eintägige Produktion von C-Produkten.

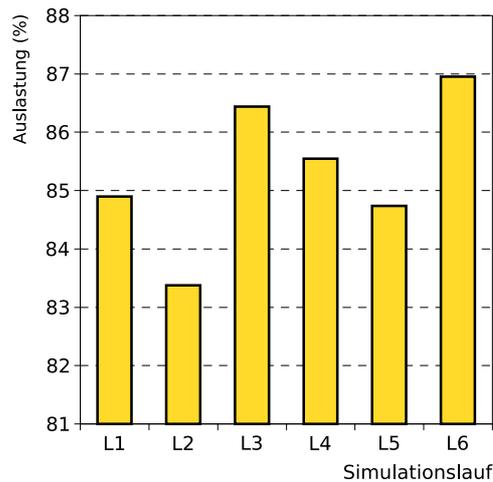


Abbildung 8.3: Versuchsreihe 2: Auslastung des Ofens der Simulationsläufe 1-6 (Median)

### 8.3 Versuchsreihe 3: Einfluss des Initiallagerstandes

Abbildung 8.4a zeigt, dass die Fehlmengen mit abnehmendem Initiallagerstand kontinuierlich zunehmen. Dies bedeutet, die Flexibilität von Planung und Produktion ist zu gering zur Synchronisation von Angebot und Nachfrage. Der Bedarf wird aus dem Lager gedeckt und Angebot und Nachfrage somit entkoppelt. Abbildung 8.4b zeigt die zunehmende Lagerreichweite mit steigendem Initiallagerstand. Die Abbildungen 8.4a und b verdeutlichen die Kernaussage des JiT-Konzepts, welche besagt, dass Bestände zu Intransparenz von Prozessen führen und Fehler verdecken (siehe 4.4.2, JiT).

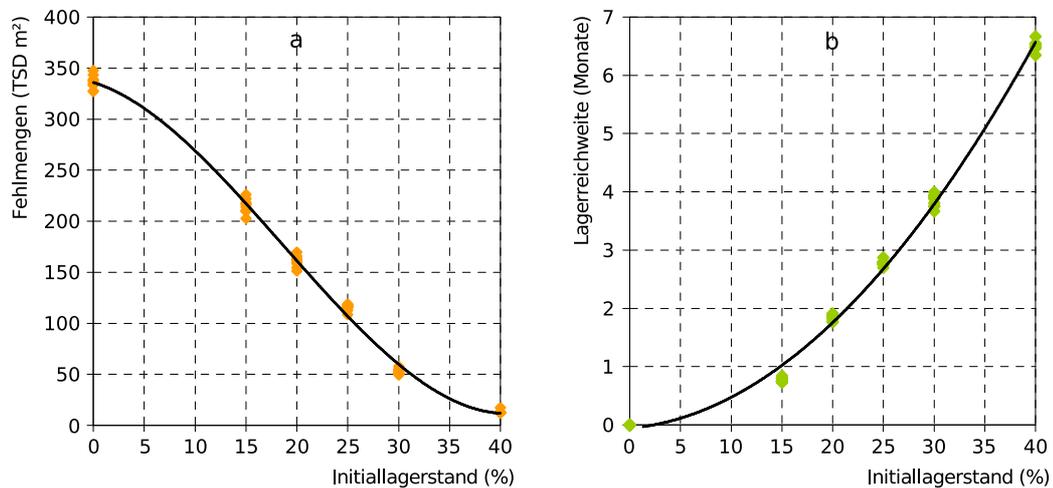


Abbildung 8.4: Versuchsreihe 3: Fehlmengen (a) und Lagerreichweite (b) über den Initiallagerstand (in Prozent vom Absatz 2007)

## 8.4 Einzelbetrachtungen

Dieser Abschnitt beinhaltet eine kritische Betrachtung des Planungsalgorithmus am Beispiel einzelner Produkte. Zur Veranschaulichung werden die Produkte WAAKA022 und WAAKB104 herangezogen. Der zugrundeliegende Simulationslauf wurde mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Reihenfolgeplanung: Reihung nach Klassen der Lagerreichweite (Klassenweite: 4 Wochen); Sortierung nach Reservierungen
- Mengenplanung: Planung der Produktionsdauer nach Klassen der Verfügbarkeitsgarantie (A-Produkte: 3 Produktionstage, B-Produkte: 2 Produktionstage, C-Produkte: 1 Produktionstag)
- Initillagerstand: 20% des Jahresabsatzes 2007
- Einschwingdauer: 6 Wochen
- Simulationszeit: 58 Wochen (inkl. 6 Wochen Einschwingphase)

Abbildung 8.5 zeigt den Verlauf des Lagerbestandes beider Produkte. WAAKB104 ist ein klassischer Vertreter von Produkten mit hohem Absatz und hoher Verfügbarkeitsgarantie (A-Produkt). Das Produkt weist einen Jahresabsatz von  $169.430 m^2$  auf. Im Zuge des Simulationslaufes konnten keine Fehlmengen dokumentiert werden. Das Produkt wurde in 14 Auflagen zu Produktionslosen von drei Tagen produziert. Das Produkt WAAKA022 stellt ein Produkt mittlerer Verfügbarkeitsgarantie dar (B-Produkt). Der Absatz des Jahres 2007 betrug  $13.193 m^2$ . Der Simulationslauf zeigt eine Produktion in einmaliger Auflage zu zwei Tagen. 48% der nachgefragten Menge konnten nicht befriedigt werden.

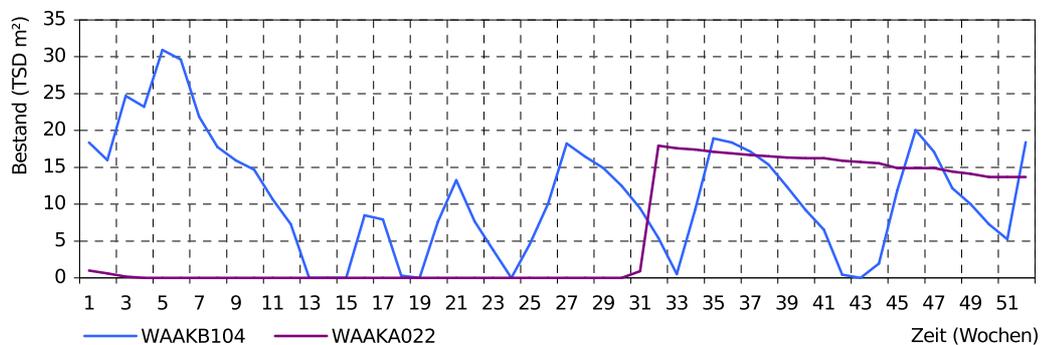


Abbildung 8.5: Verlauf des Lagerbestandes

Durch die vergleichsweise niedrige Nachfragemenge des Produktes WAAKA022 konnte die Menge an Reservierungen innerhalb der Verfügbarkeitsgarantie nicht so hoch ansteigen, um ausreichende Priorität gegenüber Produkten mit hohen Absatzmengen zu erreichen. Das Produkt WAAKB104 hingegen erlangt durch die Absatzhöhe eine hohe Priorität. Die Mengenplanung sieht jedoch keine längere Produktionsdauer als drei Tage vor, daraus folgen häufige Umrüstvorgänge und Kapazitätseinbußen. Wird der Planungsalgorithmus dahingehend adaptiert, dass WAAKB104 in größeren Losen und geringerer Häufigkeit produziert wird, so wird damit ein höherer Pufferbestand im Lager nötig.

## 9 Resümee

Trotz eines scheinbar einfachen Produktionsablaufes weist das System der Planung, der Produktion und des Vertriebs keramischer Verkleidungen hohe Komplexität auf. Grund hierfür sind Substitutionsmöglichkeiten der Fertigungsanlagen untereinander, die Vielzahl an Produkten und deren Varianten sowie die Anzahl an Produktionslinien.

Das MRPII-Konzept stellt ein geeignetes Hilfsmittel zur Modellierung der PPS der Lasselsberger, a.s. dar, da es die Komplexität des Problems durch Zerlegung in hierarchisch gekoppelte Teilprobleme zulässt. Da das System wenig Potenzial zur kurzfristigen Kapazitätsanpassung bietet und gegenüber Nachfrageschwankungen ein rigides Verhalten zeigt, eignen sich Konzepte der Lean-Philosophie, wie beispielsweise JiT, nur bedingt für den Einsatz bei Lasselsberger, a.s.

Die Methode der Simulation bietet umfangreiche Möglichkeiten der Systemanalyse. Das Pilotmodell aus Kapitel 7 zeigt eine kleine Auswahl an möglichen Fragestellungen. Es erlaubt beispielsweise das gezielte Experimentieren, um günstige Parameter wie die Gewichtung zwischen den Planungsparametern der Reihenfolgeplanung zu ermitteln. Des Weiteren können auch umfangreiche Strategien getestet und “Was wäre wenn...?”-Szenarien verfolgt werden. Bereits das spielerische Experimentieren mit Parametern, wie beispielsweise dem Initiallagerstand, kann Aufschluss über die Systemdynamik geben.

Das Simulationsmodell aus Kapitel 7 eignet sich grundsätzlich zur qualitativen Verhaltensanalyse des Realsystems. Die quantitativen Ergebnisse sind jedoch aufgrund nicht verfügbaren Datenmaterials und der getroffenen Abstraktionen nicht auf das Realsystem übertragbar (siehe Abschnitt 7.5.2). Dies schließt jedoch eine simulationsgestützte PPS bei Lasselsberger, a.s. nicht aus. Es zeigen sich prinzipiell drei Möglichkeiten der Simulationsunterstützung:

- Vergangenheitsorientierte Simulation (ex-post)
- Zukunftsorientierte Simulation (ex-ante)
- Selbstoptimierende Simulation

Vergangenheitsorientierte Simulation kann zur Beurteilung von Strategien und zur Identifikation von Parametern dienen. Ein zukunftsorientiertes Modell bedarf der Ergänzung um ein geeignetes Prognosemodell und ermöglicht die Eignungsüberprüfung von Produktionsplänen. In beiden Fällen besteht die Möglichkeit, das gesamte System im Simulationsmodell abzubilden oder Schnittstellen zum Realsystem, beispielsweise zum Planer (man-in-the-loop) oder zum PPS-System (hardware-in-the-loop), herzustellen. Selbstoptimierende Systeme dienen der Erstellung einer möglichst idealen Produktionsreihenfolge und -menge über einen definierten Planungszeitraum und bedürfen einer umfassenden Abbildung des Systems, inklusive Planer.

Die Herausforderungen einer aussagekräftigen Simulation bestehen jedenfalls darin, die Prozesse der Planung, Produktion und des Absatzes hinreichend genau abzubilden sowie die

Berücksichtigung individueller Ausnahmen der Standardprozesse. Möglicherweise ist für die Simulation der Produktionsplanung die Identifikation der Engpässe für das Produktionsmodell bereits ausreichend. Das Pilotmodell aus Kapitel 7 zeigt, dass die Abbildung des Planers im Simulationsmodell durch einen einfachen Sortier- und Mengenplanungsalgorithmus unzureichend ist (für das verwendete Produktportfolio, ersichtlich im Anhang, Abschnitt A.2). Der Planer bezieht bei der Erstellung des Produktionsplanes eine Menge an produktspezifischen Informationen, die in elektronischer Form nicht zur Verfügung stehen oder deren Berücksichtigung sehr aufwändig ist, mit ein. Die detaillierte Erfassung der erforderlichen Daten (Bedien-, Rüst- und Ausfallszeiten) ist ebenso unvermeidlich für eine aussagekräftige Simulation.

Trotz des Aufwandes und der Herausforderung ist die Methode der Simulation für die PPS im Zeitalter der Automatisierung nicht aus dem Blickfeld zu verlieren.

# A Anhang

## A.1 Weitere Prozesse

### A.1.1 Produktionsprozess von Dekorfliesen

Folgend sind die Prozessschritte zur Herstellung von keramischen Verkleidungen aus dem Dekorsegment erläutert. Das zugehörige Prozessdiagramm ist in Abbildung A.1 dargestellt.

- **Schritt 1: Lagerentnahme**

Als Basis für die Herstellung von Dekorfliesen finden Fliesen für Boden- oder Wandverkleidung Anwendung. Diese werden aus dem Fertiglager entnommen.

- **Schritt 2.1: Kleben**

Eine Möglichkeit der Erstellung von Dekorfliesen besteht in der Beklebung mit Aufklebern. Das Motiv ist auf eine Folie gedruckt, wird im Wasser von dieser gelöst und von Hand auf die Fliese transferiert.

- **Schritt 2.2: Siebdrucken**

Alternativ zur Dekoration mit Aufkleber besteht die Möglichkeit des Siebdruckes. Jede Siebdruckanlage ist in der Lage, Muster in einer Farbe zu drucken, wobei die Fliese bis zu sieben Anlagen in Folge durchlaufen kann. Ebenso ist das Bedrucken mit Glasgranulat oder Metallen möglich.

- **Schritt 2.3: Sonstige Anwendungen**

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten der Dekoration keramischer Verkleidung, unter anderem das Bedrucken mittels eines speziellen Druckers, dem Kerajet. Der Kerajet sprüht, ähnlich einem Tintenstrahldrucker, Farbe aus Patronen auf die Oberfläche der Fliese.

- **Schritt 3: Brennen**

Anschließend an die Dekoration durch Bekleben mit Aufkleber, Siebdruck oder Bedrucken mittels Kerajet muss die Keramik gebrannt werden. Es besteht die Möglichkeit der Dekoration in mehreren Schichten. Zu diesem Zweck können die Prozessschritte 2.2 und 2.3 wiederholt werden. Jede Wiederholung erfordert einen erneuten Brennvorgang.

- **Schritt 4: Kooperation: Kleben**

Die Dekoration von Fliesen erfolgt teils durch Dritte. Die Lieferung in Kooperation gefertigter Dekorfliesen erfolgt entweder unsortiert oder bereits vertriebsfertig. Wird die Ware unsortiert geliefert, so folgen die Prozessschritte 7, Sortieren, und 8, Verpacken.

- **Schritt 5: Schneiden**

Befindet sich mehr als eine Fliese auf der Grundfliese, so werden diese unter Wasserkühlung getrennt. Andernfalls sind Prozessschritt 5 und 6 zu überspringen.

- **Schritt 6: Trocknen**

Nach dem Trennen der Bordüren erfolgt die Trocknung der Keramik im Ofen.

- **Schritt 7: Sortieren**

Im Sortiervorgang werden die Fliesen nach Größe (Kaliber) und Helligkeit getrennt. Da die Kosten der Dekorfliesenproduktion höher sind als die von Wand- und Bodenfliesen, existiert kein relevanter Markt für Dekorfliesen zweiter Qualität. Aus diesem Grund ist der Anteil des Ausschusses bei der Herstellung von Dekorfliesen um den Anteil zweiter Qualität höher.

- **Schritt 8: Verpacken**

Abschließend erfolgt die Verpackung und Palettierung der Fertigware.

### A.1.2 Produktionsprozess von Reliefbordüren

Im Folgenden ist die Herstellung einer weiteren Produktgruppe des Dekorsegments, der Reliefbordüren, erläutert. Abbildung A.2 zeigt das Prozessdiagramm der Herstellung von Reliefbordüren.

- **Schritt 1: Pressen**

Anders als herkömmliche Dekorfliesen sind Reliefbordüren aus profilierten Scherben hergestellt, welche eigens gepresst werden.

- **Schritt 2: Trocknen**

Anschließend an die Presse folgt die Reduktion des Feuchtigkeitsgehalts in der Trocknungsanlage.

- **Schritt 3: Brennen (Erster Brand)**

Im Unterschied zu Standardfliesen, die nur einmal gebrannt werden, ist bei diesem Herstellungsverfahren nach dem Pressen und Trocknen ein Brand des unglasierten Scherbens erforderlich, der "erste Brand".

- **Schritt 4: Glasieren**

Das Glasieren der Reliefbordüre gleicht dem Glasieren einer Standardfliese (siehe Abschnitt 7.2.3). Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

- **Schritte 5 - 10**

Die folgende Dekoration (Prozessschritte 5.1, 5.2, 5.3), Drucken in Kooperation (Prozessschritt 6), das Brennen (Prozessschritt 7), Sortierung (Prozessschritt 8) und Verpackung (Prozessschritt 9) sowie die Lagerung der Endprodukte (Prozessschritt 10) gleichen dem Prozess der Herstellung allgemeiner Dekorfliesen. Der Prozess unterscheidet sich lediglich durch eine fehlende Schleife, in der Siebdruck und das Drucken mittels Kerajet wiederholt werden.

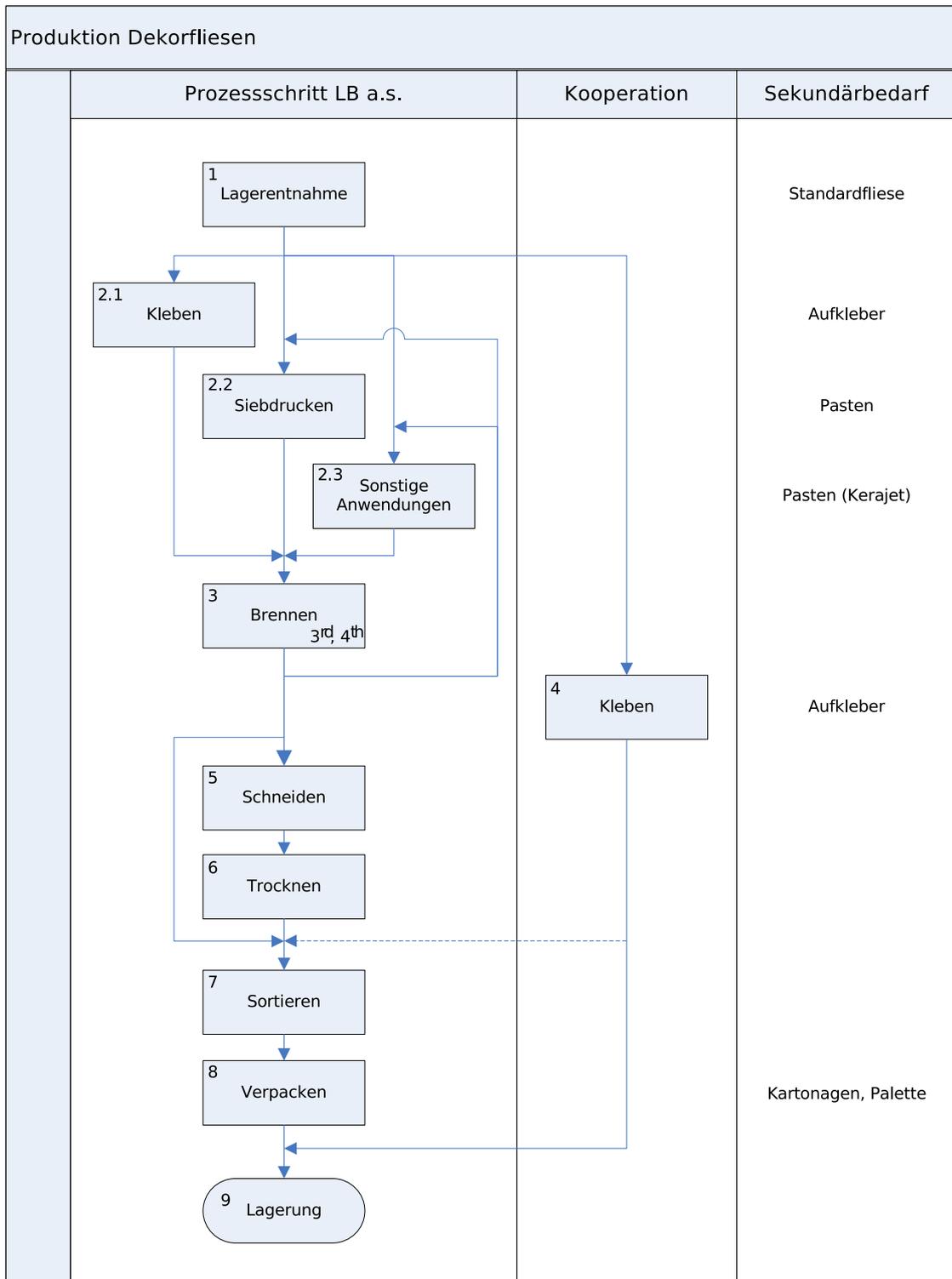


Abbildung A.1: Prozessdiagramm einer Dekorfliese

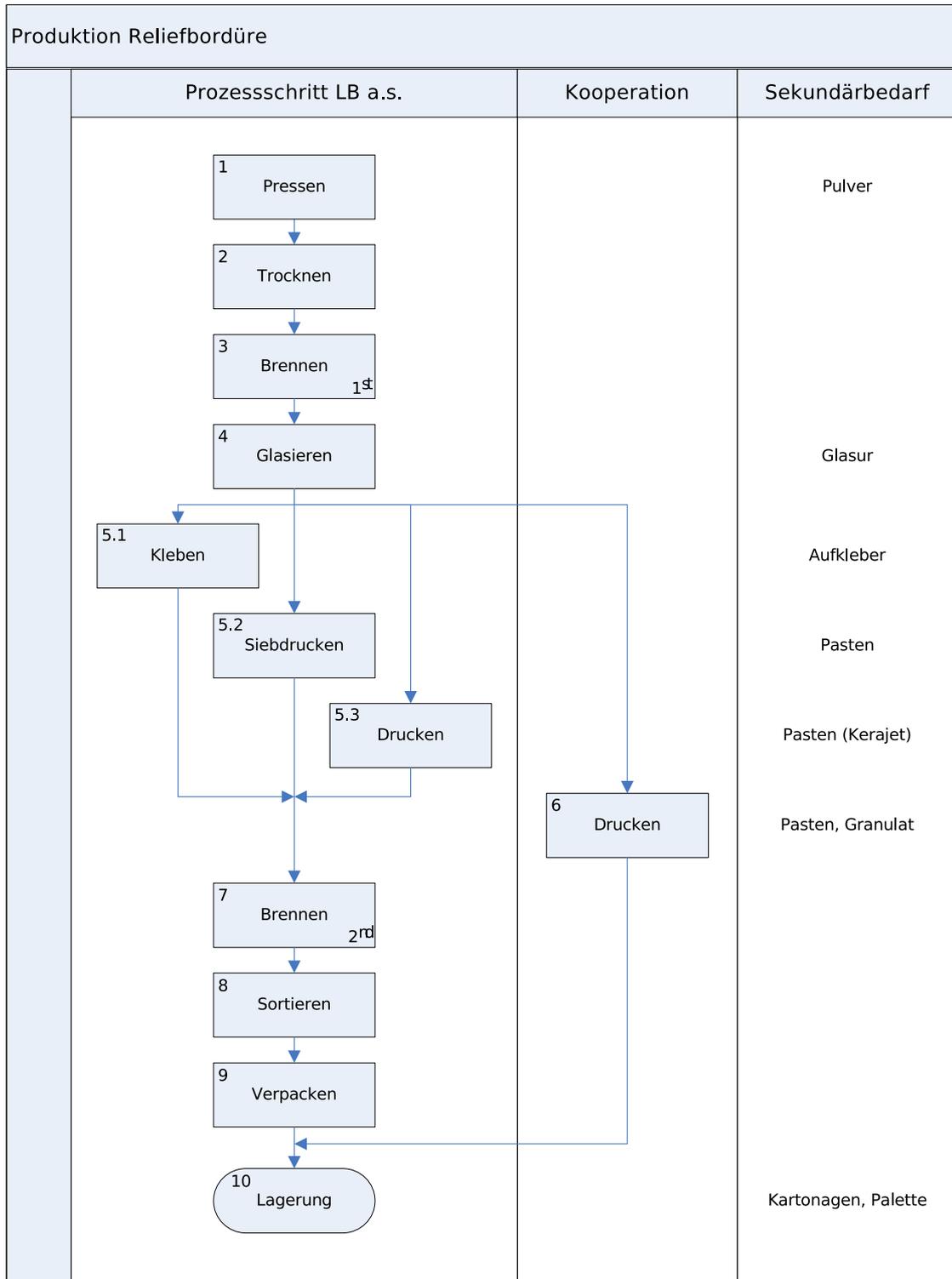


Abbildung A.2: Prozessdiagramm einer Reliefbordüre

## A.2 Produktportfolio und Planungsparameter

Das Produktportfolio der modellierten Produktionslinie entspricht einem Auszug aus dem Produktportfolio des Werks Rako 3. Die Zusammensetzung erfolgte anhand der geplanten Kapazitäten aus Tabelle 7.4. Tabelle A.1 beinhaltet eine Übersicht über das Produktportfolio sowie eine Aufstellung der zur Verfügung stehenden Planungsparameter und deren Ausprägung. Die Spalte *ABC* beinhaltet eine Klassifizierung nach einer ABC-Analyse<sup>1</sup> des Absatzes aller im modellierten Portfolio befindlichen Wandfliesen. Wie aus Abbildung A.3 ersichtlich, fallen 63% des Absatzes auf 20% der Produkte (A-Produkte). Weitere 30% der Produkte verursachen 27% des Absatzes (B-Produkte) und die übrigen 50% der Produkte verursachen nur 10% des Absatzes.

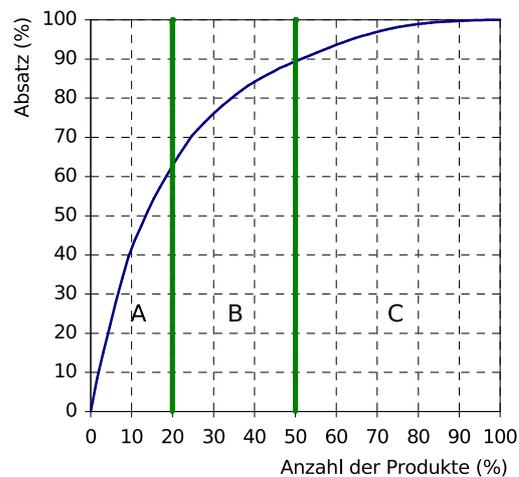


Abbildung A.3: Lorenzkurve der Pareto-Klassifikation des modellierten Produktportfolios

<sup>1</sup> Verfahren zur Strukturanalyse von Daten (siehe Abschnitt A.6)

Tabelle A.1: Produktportfolio-Planungsparameter 1 (Abk.: Nr... laufende Nummer, Str...Struktur, Pareto...Klassifizierung nach Paretoanalyse, Verf...Klassifizierung nach Verfügbarkeitsgarantie, F...Struktur: flach, R...Struktur: strukturiert, g...Oberfläche: glänzend, m...Oberfläche: matt, n...Oberfläche: neutral)

Nr	Produkt	Beschreibung	Format	Farbe	Farb- gruppe	Ober- fläche	Str	ABC	Verf
1	WAA21000	Amelia white glossy 200x200x6,5	20x20	weiß	1	g	F	A	C
2	WARKA266	INDIA M17 white matt 25x33	33x25	weiß	1	m	R	A	A
3	WAAKB000	549453 KE 25x33 Concept white gls.	33x25	weiß	1	g	F	A	B
4	WAAKB104	549454 KE 25x33 Concept white matt	33x25	weiß	1	m	F	A	B
5	WARKA268	INDIA orange matt 25x33	33x25	orange	3	m	R	A	A
6	WARKB000	549455 KE Concept white. gl undul.	33x25	weiß	1	g	R	A	B
7	WAA21104	wall tile UNI white m. COLOR LINE	20x20	weiß	1	m	F	A	C
8	WAA1N132	COLOR ONE l. beige m. 198x198x6,5	20x20	beige	2	m	F	A	B
9	WATKB070	ARDE l. orange m. 25x33	33x25	orange	3	m	F	A	A
10	WATKB125	ELECTRA yellow glossy 25x33	33x25	gelb	3	g	F	A	A
11	WARKB104	white matt undulate 25x33	33x25	weiß	1	m	R	A	B
12	WAA1N135	ColorONE l. grey matt 198x198x6,5	20x20	grau	3	m	F	A	B
13	WARKA006	FUTURA MH1 white matt 25x33	33x25	weiß	1	m	R	A	B
14	WAAP3000	Wall tile white glossy 25x45	45x25	weiß	1	g	F	B	B
15	WAR21000	wall tile UNI white undulated glossy	20x20	weiß	1	g	R	B	C
16	WAAP3104	Wall tile white matt 25x45	45x25	weiß	1	m	F	B	B
17	WATP3030	SALSA white glossy 25x45	45x25	weiß	1	g	F	B	A
18	WARKA071	SAMBA yellow matt 25x33	33x25	gelb	3	m	R	B	A
19	WARP3002	ASIA 2 l. beige 25x45	45x25	beige	2	n	R	B	A
20	WATKA011	COMPARISON light beige 33x25	33x25	beige	2	n	F	B	B
21	WATKB079	FORUM wall tile beige matt 25x33	33x25	beige	2	m	F	B	C
22	WARP3001	ASIA 1 l. beige 25x45	45x25	beige	2	n	R	B	A
23	WARKB001	ELEGANCE white glossy 25x33	33x25	weiß	1	g	R	B	C
24	WAA1N035	COLOR ONE l. grey gl. 198x198x6,5	20x20	grau	3	g	F	B	B
25	WATP3034	SALSA green glossy 25x45	45x25	grün	3	g	F	B	A
26	WATP3010	EUROPA beige 25x45	45x25	beige	2	n	F	B	B

Nr	Produkt	Beschreibung	Format	Farbe	Farb- gruppe	Ober- fläche	Str	ABC	Verf
27	WATP3031	SALSA yellow glossy 25x45	45x25	gelb	3	g	F	B	A
28	WAA1N032	ColorONE l. beige gl. 198x198x6,5	20x20	beige	2	g	F	B	B
29	WATKB098	UNIVERSAL grey glossy 33x25	33x25	grau	3	g	F	B	B
30	WATKB110	STUCCO light orange 33x25	33x25	orange	3	n	F	B	C
31	WAAKA022	BLANKA M12 l. blue matt 25x33	33x25	blau	2	m	F	B	A
32	WAA1N046	COLOR ONE grey gl. 198x198x6,5	20x20	grau	3	g	F	B	B
33	WARKB006	ALLEGRO l. blue glossy 25x33	33x25	blau	2	g	R	B	A
34	WAAKA024	BLANKA M15 l. yellow matt 25x33	33x25	gelb	3	m	F	C	A
35	WARKB008	ALLEGRO d. blue gl. 25x33	33x25	blau	2	g	R	C	A
36	WARKB005	ALLEGRO red gl. 25x33	33x25	rot	3	g	R	C	A
37	WATP3032	SALSA red glossy 25x45	45x25	rot	3	g	F	C	A
38	WATKB126	ELECTRA brick glossy 25x33	33x25	rot	3	g	F	C	A
39	WARKB007	ALLEGRO blue gl. 25x33	33x25	blau	2	g	R	C	A
40	WAAKA023	BLANKA M14 l. green matt 25x33	33x25	grün	3	m	F	C	A
41	WAAKA026	BLANKA M21 d.blue matt 25x33	33x25	blau	2	m	F	C	A
42	WATP3002	AUSTRALIA rose 25x45	45x25	rosa	3	n	F	C	B
43	WATP3033	SALSA wine glossy 25x45	45x25	weiß	1	g	F	C	A
44	WAA1N280	ColorONE l. orange m. 198x198x6,5	20x20	orange	3	m	F	C	B
45	WATKB100	UNIVERSAL grey matt 33x25	33x25	grau	3	m	F	C	B
46	WAA1N220	ColorONE l. yellow m. 198x198x6,5	20x20	gelb	3	m	F	C	B
47	WATP3016	PROGETTO l. beige matt 25x45	45x25	beige	2	m	F	C	C
48	WAA1N541	ColorONE blue matt 198x198x6,5	20x20	blau	2	m	F	C	B
49	WATKA034	REGINA dark brick 25x33	33x25	rot	3	n	F	C	C
50	WATP3012	UNIVERSAL grey 45x25	45x25	grau	3	n	F	C	C
51	WATP3003	AUSTRALIA green 25x45	45x25	grün	3	n	F	C	B
52	WAA1N110	ColorONE l. yellow gl. 198x198x6,5	20x20	gelb	3	g	F	C	B
53	WATP3011	AFRICA white 45x25	45x25	weiß	1	n	F	C	C
54	WATP3021	PROGETTO ROSES beige l. matt	45x25	beige	2	m	F	C	C
55	WATP3014	UNIVERSAL grey matt 45x25	45x25	grau	3	m	F	C	C
56	WATP3017	PROGETTO l. grey matt 25x45	45x25	grau	3	m	F	C	C

Nr	Produkt	Beschreibung	Format	Farbe	Farb- gruppe	Ober- fläche	Str	ABC	Verf
57	WATP3004	AUSTRALIA yellow 45x25	45x25	gelb	3	n	F	C	C
58	WATP3013	UNIVERSAL beige 45x25	45x25	beige	2	n	F	C	C
59	WATP3019	PROGETTO ROSES beige d. matt	45x25	beige	2	m	F	C	C
60	WATP3022	PROGETTO d.beige matt 25x45	45x25	beige	2	m	F	C	C
61	WATP3020	PROGETTO ROSES grey l. matt	45x25	grau	3	m	F	C	C
62	WATP3018	PROGETTO ROSES grey d. matt	45x25	grau	3	m	F	C	C
63	WARP3000	VERSAILE	45x25	weiß	1	n	R	C	C
64	WAAP3016	PURE l. grey gl. 25x45 RAL7047	45x25	grau	3	g	F	C	C
65	WAAP3017	PURE l. beige gl. 25x45 RAL1013	45x25	beige	2	g	F	C	C
66	WATKB145	LITERA d.beige glossy 25x33	33x25	beige	2	g	F	C	A
67	WATP3035	DOLCE VITA white 25x45	45x25	weiß	1	n	F	C	A
68	WATP3036	DOLCE VITA rose 25x45	45x25	rosa	3	n	F	C	A
69	WATP3037	DOLCE VITA green 25x45	45x25	grün	3	n	F	C	A
70	WATP3038	DOLCE VITA blue 25x45	45x25	blau	2	n	F	C	A

### A.3 Schätzung der Rüstzeiten

Zur Schätzung einer plausiblen Rüstzeit von einer Wandfliese auf die nächste wurden die Merkmale des Produktes den einzelnen Maschinen der Produktionslinie gegenübergestellt. Tabelle A.2 ist die Referenztabelle zur Schätzung. Sie enthält für jedes Merkmal und jede Maschine einen Verweis auf eine Subtabelle, welche die entsprechende Teilrüstzeit enthält, die bei Änderung des Merkmals im Zuge des Produktwechsels für die Maschine anfällt. Ist der Wert null enthalten, so hat die Änderung des Merkmals keinen Einfluss auf die Rüstzeit der Maschine. Die Grundrüstzeit fällt unabhängig von den beteiligten Produkten an und beinhaltet das Stoppen und Hochfahren der Produktionslinie. Erfolgt kein Produktwechsel, so ist die Grundrüstzeit null.

Tabelle A.2: Schema zum Schätzen der Rüstzeiten (Angaben in Stunden; Abk.: Sort & Verp...Anlage zum Sortieren und Verpacken; \* beim Hochfahren der Linie ohne Produktwechsel 0)

Merkmal	Gruppe 1			Gruppe 2	Gruppe 3
	Presse	Trocknung	Glasur	Ofen	Sort & Verp
Grundrüstzeit*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Format	Tabelle A.3				
Farbe	0	0	Tabelle A.4	0	0
Oberfläche	0	0	0	Tabelle A.5	0
Struktur	Tabelle A.6	0	0	0	0
Summe Max Gruppe					

Die Änderung des Formates hat den weitreichendsten Einfluss auf die Produktionslinie, da sie jede Maschine der Linie betrifft. Tabelle A.3 enthält Schätzungen der Rüstzeiten von Wandfliesen der Formate 45 x 25, 20 x 20 und 33 x 25 für die Produktionslinie 1 des Werks RAKO 3.

Tabelle A.3: Rüstzeit aufgrund Änderung des Produktformats (Angaben in Stunden; Abk.: P...Presse, T...Trocknung, G...Anlage zum Glasieren, O...Ofen, SP...Anlage zum Sortieren und Verpacken)

		auf Format														
		45x25					20x20					33x25				
		P	T	G	O	SP	P	T	G	O	SP	P	T	G	O	SP
von Format	45x25	0	0	0	3	0	3	1	3	7	1	3	1	3	7	1
	20x20	3	1	3	7	1	0	0	0	3	0	3	1	3	7	1
	33x25	3	1	3	7	1	3	1	3	7	1	0	0	0	3	0

Jedes Produkt des Produktportfolios wurde entsprechend Abbildung A.4 einer Farbgruppe zugewiesen. Ist einem Produkt keine genaue Farbe zuordenbar, so erhält die Farbe die Bezeichnung "universal" und wird der Farbgruppe 1 zugeordnet. Die Farbfolge auf der Glasuranlage hat erheblichen Einfluss auf die erforderliche Reinigungszeit im Zuge des Rüstvorganges. Tabelle A.4 enthält den Anteil der Rüstzeit bei Änderung der Produktfarbe.

weiß	grün	gelb	beige	orange	braun	weinrot
1	3	2	2	2	3	3
rot	blau	violett	pink	rosa	grau	schwarz
3	3	3	2	1	1	3

Abbildung A.4: Farbklassifizierung für Wandfliesen

Tabelle A.4: Rüstzeit der Glasuranlage aufgrund Änderung der Produktfarbgruppe (Angaben in Stunden)

		auf Farbgruppe		
		1	2	3
von Farbgruppe	1	1	2	3
	2	3	2	3
	3	5	5	4

Jede Keramik besitzt eine glänzende oder eine matte Oberfläche (siehe Tabelle A.1, Spalte: Oberfläche). Sind Informationen bezüglich der Oberfläche eines Produktes nicht ermittelbar, so wird diese als "neutral" eingestuft. Die Beschaffenheit der Oberfläche beeinflusst die einzustellende Temperaturkurve des Ofens. Tabelle A.5 beinhaltet den Anteil der Rüstzeit aufgrund der Änderung der Oberflächenbeschaffenheit.

Tabelle A.5: Rüstzeit des Ofens aufgrund Änderung der Produktoberfläche (Angaben in Stunden, Abk.: g...glänzend, m...matt, n...neutral)

		auf Oberfläche		
		g	m	n
von Oberfläche	g	0	1	0
	m	2	0	0
	n	0	0	0

Ändert sich die Struktur der Fliese, so ist die Presse mit dem entsprechenden Werkzeug zu rüsten. Der Rüstaufwand an der Presse aufgrund der Änderung der Oberflächenstruktur ist in Tabelle A.6 dargelegt.

Nach Ermittlung der Rüstzeiten aus den Subtabellen ist die Summe der Rüstzeiten für jede Anlage zu bilden. Da der Rüstvorgang an allen Maschinen der gleichen Rüstgruppe zugleich beginnt, ist im Falle der Rüstgruppe 1 die maximale Rüstzeit von Presse, Trocknung oder Glasur ausschlaggebend für die gesamte Rüstdauer der Gruppe.

Tabelle A.6: Rüstzeit der Presse aufgrund Änderung der Produktstruktur (Angaben in Stunden, Abk.: F...flach, R...strukturiert)

		auf Struktur	
		R	F
von Struktur	R	0	1
	F	1	0

## A.4 Modellauszüge des Simulationsmodells

Abbildung A.5 zeigt das Prozessgerüst der Produktionsplanung im Simulationsmodell. Die Spalte *Prozessschritt ED* enthält die Prozessschritte, welche im Atom *Controller PP* implementiert sind. Die Spalte *Ereignis* enthält das *Event*, in dem der Prozessschritt ausgeführt wird. Die Spalte *Involviert* beinhaltet alle Atome, die am Ereignis beteiligt sind.

Mit dem Simulationsstart erfolgt der erste Planungslauf, wobei der Produktionsplan, enthalten im Atom *press*, bereits einen gültigen Plan für die erste Produktionswoche enthält. Die Planungsparameter werden aus den Tabellen des Bereichs *Lagerung und Vertrieb* (siehe Abbildung 7.8) übernommen und daraus wird das Planungstableau erstellt (Prozessschritt 1). Anschließend wird der nächste Planungslauf nach 168 Stunden ausgelöst (Prozessschritt 2) und die weiteren Prozessschritte aufgerufen (Prozessschritt 3). Entsprechend dem Fixierungshorizont von einer Woche werden die Planungseinträge des Produktionsplans im Atom *press* fixiert (Prozessschritt 4). In der Reihenfolgeplanung erfolgt die Reihung der Produkte nach den Prioritäten der Planungsstrategie (Prozessschritt 5). Die Mengenplanung legt die Produktionsdauer des Loses in Tagen fest (Prozessschritt 6).

Abbildung A.6 zeigt den schematischen Ablauf der Steuerung der Presse im Simulationsmodell. Nachdem das Produkt-Atom die Presse verlassen hat (Ereignis 0), wird der Mengenzähler erhöht (Prozessschritt 1). Ist der letzte Produktionstag eines Loses beendet und die folgende erste Schicht begonnen, so ist der Produktionsauftrag erfüllt und die letzte Fliese wird mit einem Label markiert (Prozessschritt 2) und der Betrieb der Presse eingestellt (Ereignis 7). Ist der Produktionsauftrag noch nicht erfüllt, so erfolgt die Überprüfung nach dem letzten Produktionstag. Ist der aktuelle Produktionstag der letzte, so erfolgt die Schätzung der nächsten Rüstzeiten (Prozessschritt 3), um die erforderliche Puffermenge für die Nachtschicht und den nächsten Rüstvorgang abschätzen zu können (Prozessschritt 4). Ist der Puffer ausreichend, so wird der Produktionsstart für die nächste Frühschicht terminiert (Prozessschritt 5). Ist der Puffer nicht ausreichend, so erfolgt die Erzeugung des nächsten Produkt-Atoms (Prozessschritt 6).

Die Steuerung des Umrüstvorganges der Rüstgruppe 1 (Presse, Anlage zur Trocknung, Anlage zum Glasieren) des Simulationsmodells ist in Abbildung A.7 dargestellt. Hat das gekennzeichnete letzte Produkt-Atom das Atom *glazing* verlassen, so wird das Umrüsten durch eine Nachricht an das Atom *press* ausgelöst (Prozessschritt 1). Es folgt die Dokumentation der Produktionsmenge (Prozessschritt 2) sowie die Ermittlung der Rüstzeiten (Prozessschritt 3). Nach der Ermittlung der Bedienzeiten (Prozessschritt 4) erfolgt die Terminierung des Produktionsstartes nach Ablauf der Rüstzeit (Prozessschritt 5) und der Rüstvorgang ist abgeschlossen (Ereignis 6).

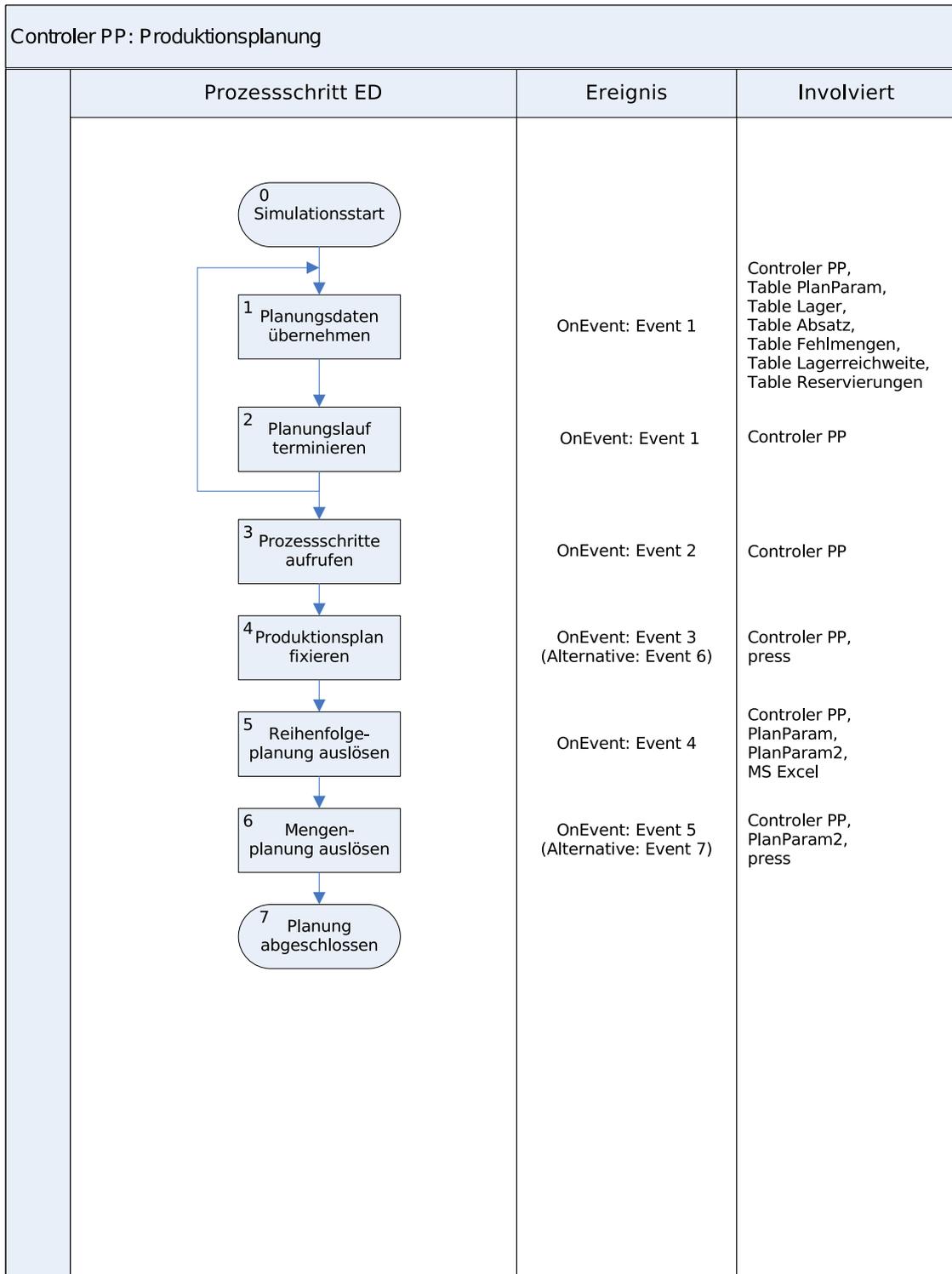


Abbildung A.5: Planungsablauf im Simulationsmodell

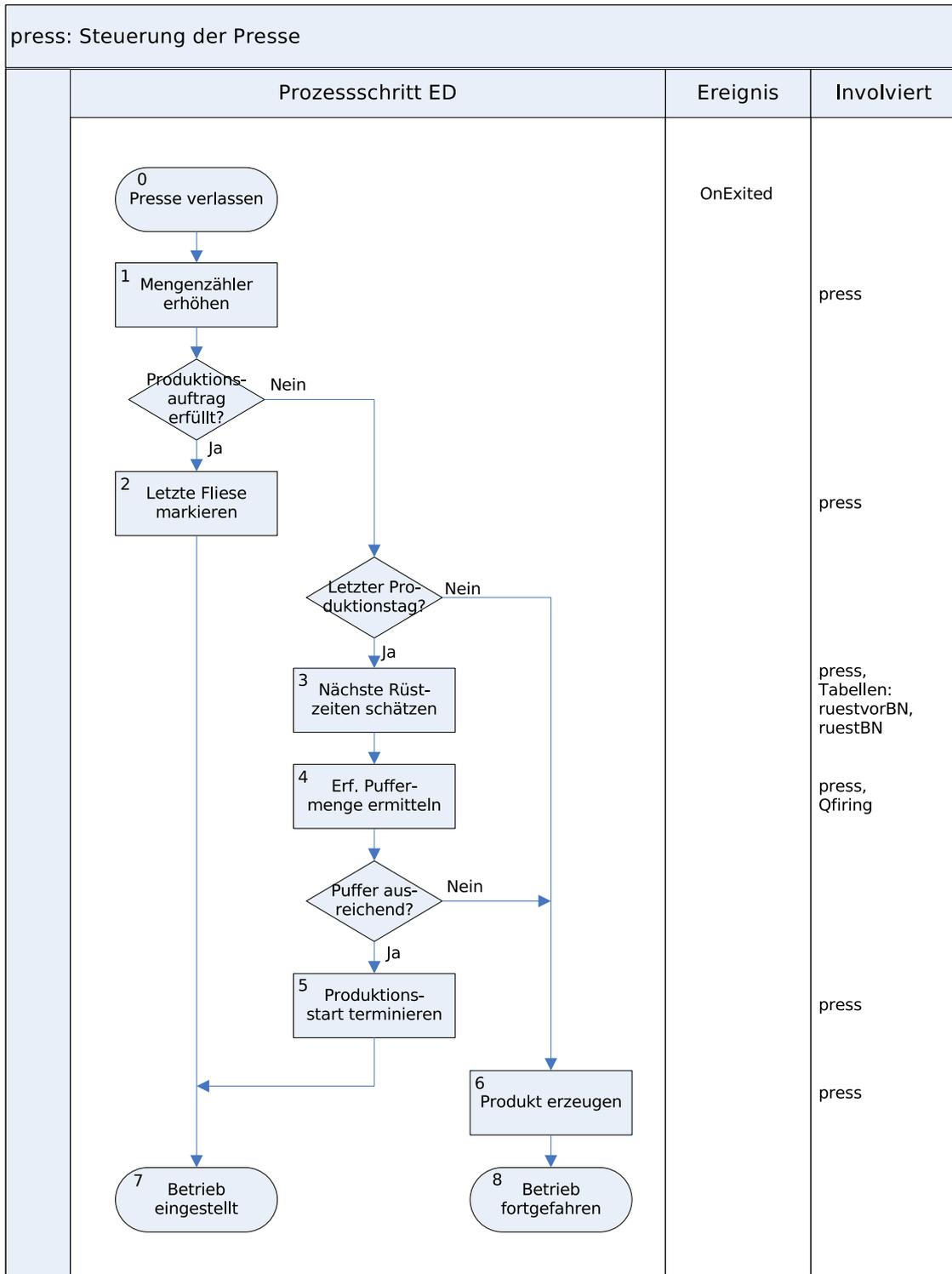


Abbildung A.6: Steuerung der Presse

Ist die Rüstzeit verstrichen, so wird der Produktionsstart eingeleitet (Ereignis 7). Ist die aktuelle Schicht die erste oder zweite, so erfolgt der unmittelbare Start der Rüstgruppe 1 (Prozessschritt 10). In der Nachtschicht wird die Verfügbarkeit lediglich vermerkt (Prozessschritt 8) und der Beginn der ersten Schicht abgewartet (Prozessschritt 9). Zum Schichtbeginn der ersten Schicht erfolgt der Start der Presse (Prozessschritt 10).

Abbildung A.8 zeigt den Prozess des Umrüstens der Rüstgruppe 2 (Ofen). Hat das letzte Produkt-Atom das Atom *firing* verlassen, so wird das Umrüsten ausgelöst (Prozessschritt 1) und die Verfügbarkeit des Atoms *firing* deaktiviert (Prozessschritt 2). Nach der Festlegung von Rüstzeit (Prozessschritt 3) und Bedienzeit (Prozessschritt 4) erfolgt die Terminierung des Produktionsstarts (Prozessschritt 5) und der Rüstvorgang ist beendet (Ereignis 6). Ist die Rüstzeit verstrichen, wird der Produktionsstart eingeleitet (Ereignis 7) und das Atom *firing* nimmt den Betrieb auf (Prozessschritt 8).

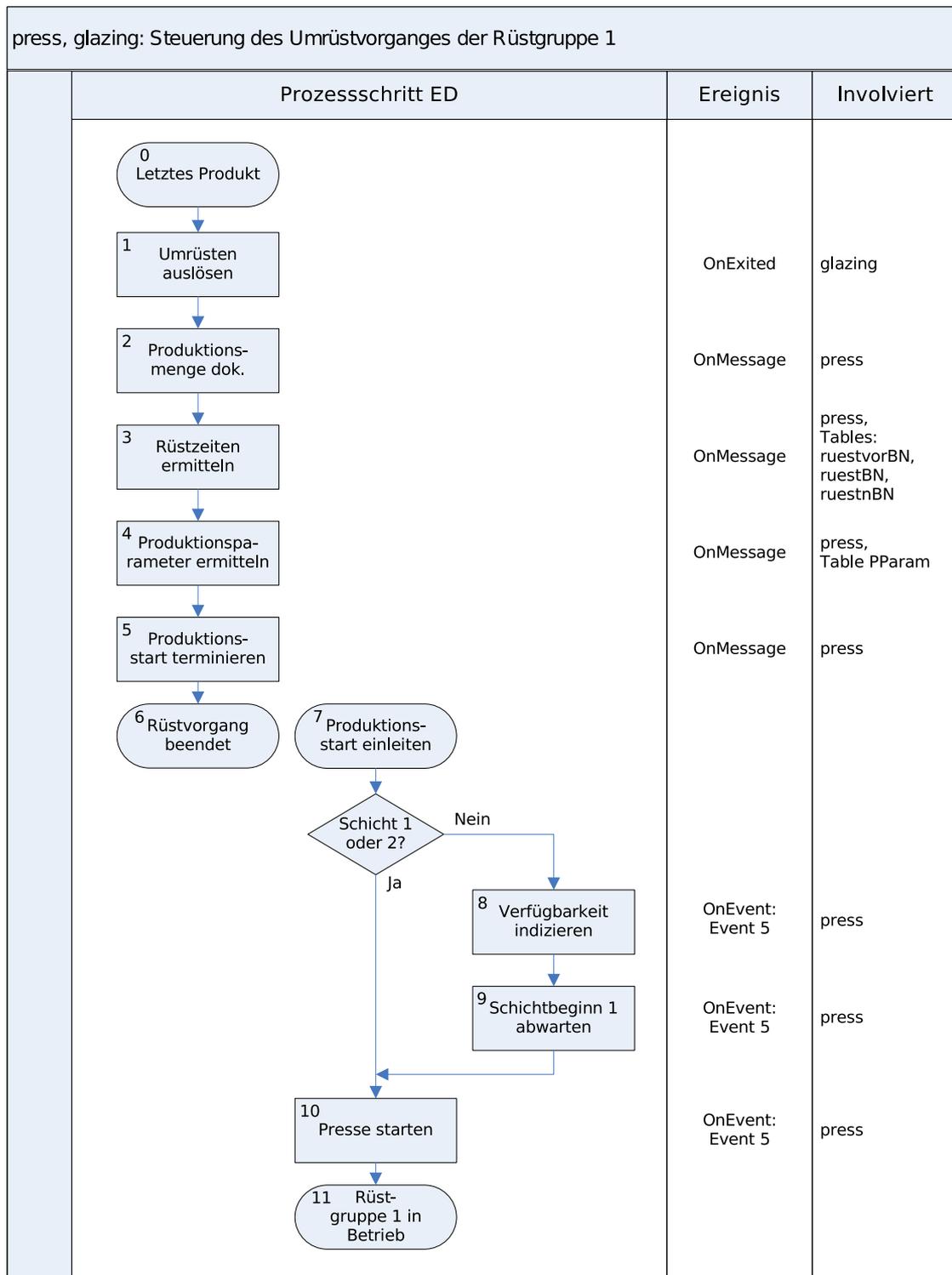


Abbildung A.7: Steuerung des Rüstvorganges der Rüstgruppe 1

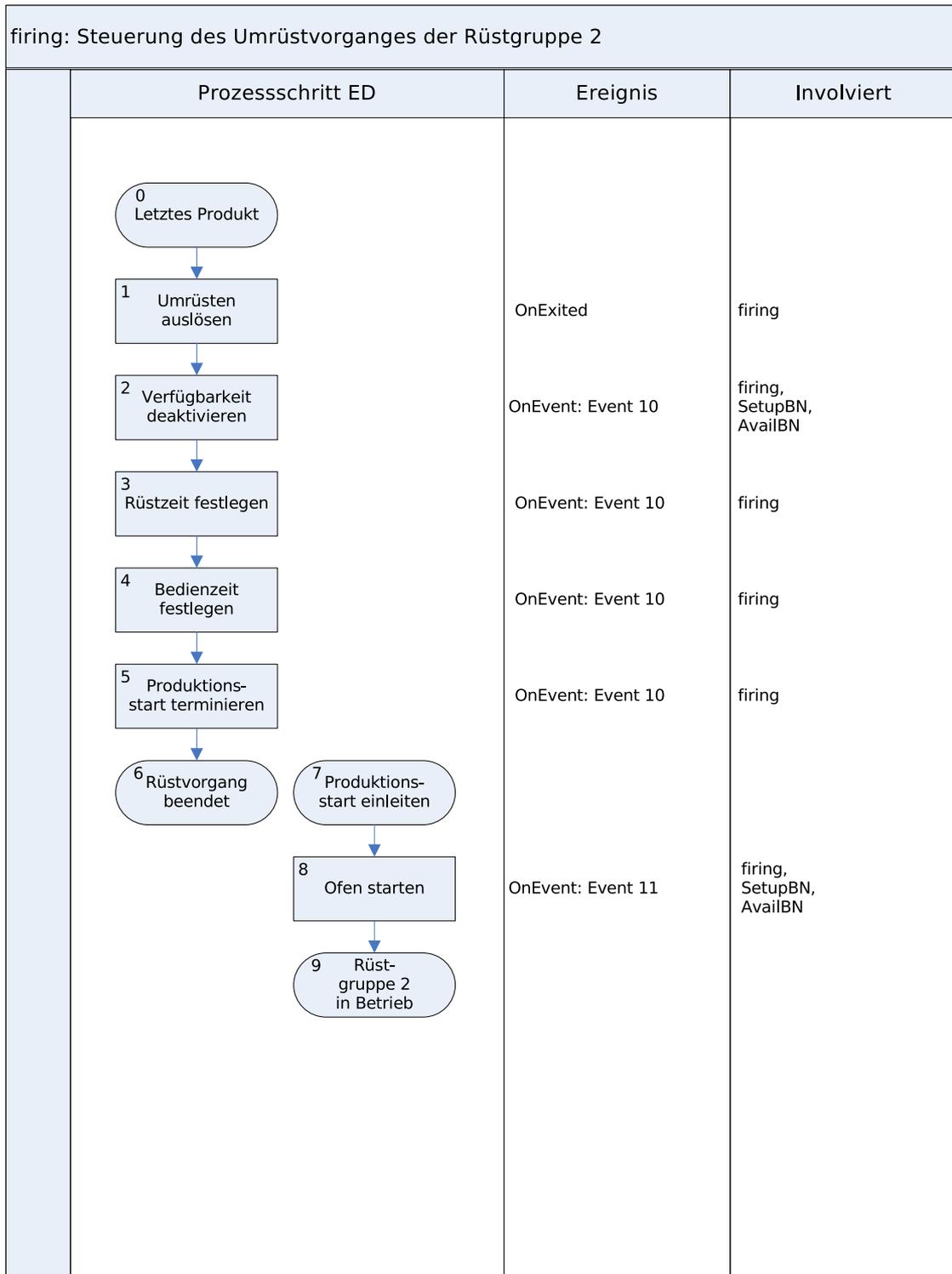


Abbildung A.8: Steuerung des Rüstvorganges der Rüstgruppe 2

## A.5 Beschreibung der Methode IDEF0

Die IDEF0-Methode wurde in den 70er Jahren im Rahmen des “U.S. Air Force Program for Integrated Computer Aided Manufacturing (ICAM)” als Technik zur besseren Analyse und Kommunikation für die Produktionsprozessoptimierung entwickelt. 1991 wurde diese Methode vom “National Institute of Standards and Technology” zum Modellierungsstandard für die Informationsverarbeitung entwickelt und veröffentlicht.

Ein Graf nach dem IDEF0-Standard ist eine endliche Folge gerichteter Kanten und Knoten. Knoten sind als Rechtecke dargestellt, Kanten durch Pfeile (siehe Abbildung A.9). Jeder Prozessschritt enthält eine Bezeichnung (Funktionsname) und eine Prozess-ID. Von links eingehende Pfeile stellen materielle oder nicht-materielle Eingaben dar. Ausgaben sind durch austretende Pfeile auf der rechten Seite symbolisiert. Von oben eintretende Pfeile definieren Bedingungen und Informationen zur korrekten Steuerung des Prozessschrittes. Pfeile, die sich an der Unterseite befinden, spezifizieren erforderliche Mechanismen (beispielsweise Anlagen und Vorrichtungen). Ist die Beschriftung eines Pfeils nicht eindeutig zuordenbar, so wird eine gezackte Linie zum besseren Verständnis hinzugefügt. Jedes Gesamtsystem kann als einzelne Funktion dargestellt werden. Durch die hierarchische Anordnung von Funktionsgruppen kann der Detaillierungsgrad des Diagramms erhöht werden. Für weitere Informationen sei auf NIST (1993) und Knowledge Based Systems (2006) verwiesen.

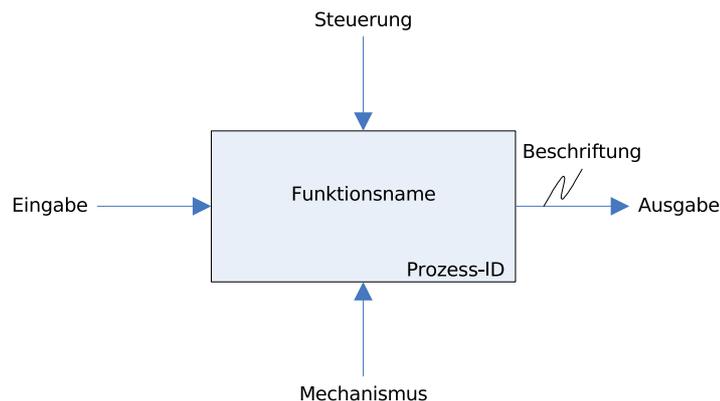


Abbildung A.9: Modellierungskonzept IDEF0 (in Anlehnung an NIST (1993), S.11)

## A.6 Beschreibung der ABC-Analyse

Die ABC-Analyse geht auf Pareto (1897) zurück und dient der Strukturanalyse von Daten. Im Wesentlichen wird einer nach abnehmender Größe sortierten Anzahl von Objekten eine messbare Eigenschaft der Objekte gegenübergestellt. Die grafische Darstellung in einem Diagramm wird auch als Lorenzkurve bezeichnet.

Im Zuge der ABC-Analyse werden die zu klassifizierenden Objekte (z.B. Produkte) nach der Größe der zu untersuchenden Eigenschaft (z.B. Absatz) gereiht. Anschließend werden die Teilsummen vom ersten bis zu jedem Objekt der Reihung gebildet und mit der Summe verglichen (100%). Übliche Schranken für die ABC-Klassifikation sind 20% und 50% der zu untersuchenden Eigenschaft, sie können jedoch nach Belieben variiert werden. Zur grafischen

Darstellung in Form einer Lorenzkurve wird die Anzahl der Objekte auf der Abszisse aufgetragen, und die zugehörige Teilsumme der Eigenschaft auf der Ordinate (siehe Abbildung A.3).

Grundlegend wird mit der ABC-Analyse gezeigt, dass ein geringer Anteil von Objekten einen großen Anteil an einer bestimmten Eigenschaft besitzt und somit in vielen Prozessen eine höhere Priorität genießt (A-Produkte). Die Wertigkeit von C-Produkten ist dagegen geringer, da sie nur einen kleinen Teil an der zu untersuchenden Eigenschaft nimmt.<sup>2,3,4</sup>

---

<sup>2</sup> Vgl. Gudehus (2006), S.133 ff.

<sup>3</sup> Vgl. Jodlbauer (2007), S.222 ff.

<sup>4</sup> Vgl. Schönsleben (2007), S.542 ff.

# Literaturverzeichnis

**Adam, Dietrich:** Planung und Entscheidung. Modelle - Ziele - Methoden. 4. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1996

**Adam, Dietrich:** Produktions-Management. 9. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1998

**Balci, O.:** Credibility Assessment of Simulation Results: The State of the Art. In **Balci, O. (Hrsg.):** Methodology and Validation; Proceedings of the Conference on Methodology and Validation, 6-9. April 1988. Band 19, Orlando: SCS Simulation Series, 1988

**Bandte, Henning:** Komplexität in Organisationen. Organisationstheoretische Betrachtungen und agentenbasierte Simulation. 1. Auflage. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2007

**Biethahn, Jörg et al. (Hrsg.):** Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. State of the art und neuere Entwicklungen. Heidelberg: Physica-Verlag, 1999

**Bossel, Hartmut:** Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Braunschweig, Wiesbaden: Verlag Vieweg, 1992

**Brockhaus (Hrsg.):** Brockhaus, Enzyklopädie in vierundzwanzig Bänden. Zwanzigster Band. Sci-Sq. Band 20, 19. Auflage. Mannheim: F.A. Brockhaus, 1993

**Domschke, Wolfgang/Drexl, Andreas:** Einführung in Operations Research. 6. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2005

**Domschke, Wolfgang/Scholl, Armin:** Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht. 3. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2005

**Domschke, Wolfgang/Scholl, Armin/Voß, Stefan:** Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer Verlag, 1993

**Dyckhoff, Harald/Spengler, Thomas S.:** Produktionswirtschaft. Eine Einführung für Wirtschaftsingenieure. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2007

**Gudehus, Timm:** Dynamische Disposition. Strategien zur optimalen Auftrags- und Bestandsdisposition. 2. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2006

**Günther, Hans-Otto/Tempelmeier, Horst:** Produktion und Logistik. 6. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2005

**Incontrol (Hrsg.):** Enterprise Dynamics. Tutorial ED7. Maarssen (NL): Incontrol Simulation Software B.V., 2006

**Jodlbauer, Herbert:** Produktionsoptimierung. Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung. 1. Auflage. Wien: Springer Verlag, 2007

**Junge, Mark; Hesselbach, Jens (Hrsg.):** Produktion und Energie. Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel: kassel university press GmbH, 2007

- Kiener, Stefan et al.:** Produktions-Management. 8. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006
- Kistner, Klaus-Peter/Steven, Marion:** Produktionsplanung. 3. Auflage. Heidelberg: Physica Verlag, 2001
- Kistner, Klaus-Peter/Steven, Marion:** Betriebswirtschaftslehre im Grundstudium 1. Produktion, Absatz, Finanzierung. 4. Auflage. Heidelberg: Physica Verlag, 2002
- Knowledge Based Systems, Inc:** IDEF. Integrated Definition Methods. (URL: <http://www.ideal.com>) – Zugriff am 07.07.2008
- Kramer, Ulrich/Neculau, Mihaela:** Simulationstechnik. München Wien: Carl Hanser Verlag, 1998
- Kuhn, Axel/Reinhardt, Adolf/Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.):** Fortschritte in der Simulationstechnik. Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik. Band 7, Braunschweig Wiesbaden: Verlag Vieweg, 1993
- Kurbel, Karl:** Produktionsplanung und -steuerung. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. 4. Auflage. München Wien: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 1999
- Lödding, Hermann:** Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2005
- Luczak, Holger/Eversheim, Walter:** Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 2. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1999
- Löscher, Thomas:** Diplomarbeit: Simulationsbasierte Optimierung zur Verbesserung der Produktionsabläufe in einer flexiblen Fertigungszelle. Wien: Technische Universität Wien. Institut für Analysis und Scientific Computing, 2002
- Matyas, Kurt:** Taschenbuch Produktionsmanagement. Planung und Erhaltung optimaler Produktionsbedingungen. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2001
- Monsef, Y.; Kerckhoffs, Eugene et al. (Hrsg.):** Frontiers in Simulation. Modelling and Simulation of Complex Systems. Concepts, Methods and Tools. San Diego Erlangen Ghent Budapest: SCS-Europe BVBA, 1997
- Neumann, Klaus:** Produktions- und Operations-Management. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1996
- NIST:** Integration Definition for Function Modelling (IDEF0). In **NIST (Hrsg.):** Federal Information Processing Standards Publications. Gaithersburg, MD 20899, USA: National Institute of Standards and Technology, 1993
- Otto, Andreas/Obermaier, Robert (Hrsg.):** Logistikmanagement. Analyse, Bewertung und Gestaltung logistischer Systeme. 1. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2007
- Pototschnig, Barbara:** Diplomarbeit: Genetische Algorithmen zur Optimierung in Diskreter Simulation. Implementation in MS-Excel in Verbindung mit dem diskreten Simulator ED. Wien: Technische Universität Wien. Institut für Analysis und Technische Mathematik, 2002
- Rücker, Thomas; Schneider, Herfried/Haupt, Reinhard (Hrsg.):** Optimale Materialflusssteuerung in heterogenen Produktionssystemen. 1. Auflage. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006

- Sauerbier, Thomas:** Theorie und Praxis von Simulationssystemen. Eine Einführung für Ingenieure und Informatiker. Braunschweig Wiesbaden: Verlag Vieweg, 1999
- Schneeweiß, Christoph:** Planung 1. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1991
- Schneider, Herfried/Buzacott, John A./Rücker, Thomas:** Operative Produktionsplanung und -steuerung. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005
- Schuh, Günther (Hrsg.):** Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2006
- Schönsleben, Paul:** Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management in umfassenden Wertschöpfungsnetzwerken. 5. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2007
- Suhl, Leena/Mellouli, Taïeb:** Optimierungssysteme. Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2006
- Syska, Andreas:** Produktionsmanagement. Das A – Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute. 1. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2006
- Vahrenkamp, Richard:** Produktionsmanagement. 5. Auflage. München Wien: Oldenbourg Verlag, 2004
- VDI:** Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen, Blatt 1, Entwurf. In **VDI (Hrsg.):** VDI-Handbuch Materialfluss und Förder-technik. Band 8, Berlin: Beuth Verlag, 2000
- Voigt, Kai-Ingo:** Industrielles Management. Industriebetriebslehre aus prozessorientierter Sicht. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2007
- Wenzel, Sigrid (Hrsg.):** Frontiers in Simulation. Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Ghent Belgium: SCS-Europe BVBA, 2000
- Werners, Brigitte:** Grundlagen des Operations Research. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2006
- Wiendahl, Hans-Peter:** Betriebsorganisation für Ingenieure. 3. Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag, 1989
- Zeigler, Bernhard P./Praehofer, Herbert/Kim, Tag Gon:** Theory of Modelling and Simulation. Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems. 2. Auflage. San Diego London: Academic Press, 2000