

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN**  
**Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik**

**Ereignisorientierte Simulation  
der Bierherstellung**

**Jochen Friedrich Gläßer**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. R. F. Vogel

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. H.-Chr. Langowski  
2. Univ.-Prof. Dr. W. A. Günthner

Die Dissertation wurde am 20.07.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 29.02.2012 angenommen.



## Vorwort

Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Weisser (i. R.) möchte ich herzlich für die Überlassung des Themas und seinen langen Atem als Doktorvater bis zur endgültigen Fertigstellung der Arbeit danken.

Herrn Prof. Dr. Horst-Christian Langowski danke ich für die reibungslose und unbürokratische Übernahme der Rolle als Stief-Doktorvater und Erstgutachter.

Den Herren Prof. Dr. Rudi F. Vogel und Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner danke ich für die freundliche Bereitschaft die Prüfungskommission regelgerecht zu komplettieren.

Herrn Prof. Dr. Ulrich Hege danke ich für die Initiierung des Themas und die Betreuung meiner Arbeit während der gemeinsamen Zeit im Dienst der KRONES AG.

Auch Herrn Dipl.-Inf. Jürgen Sedlaczek danke ich für die produktive Zusammenarbeit und intensive Betreuung unter demselben Dach. Den zahlreichen Industriepartnern und Kollegen, die mich im Rahmen meiner Tätigkeit dort zwischen 2000 und 2006 gefordert und gefördert, inspiriert und ermuntert haben, sei hier aus Platzgründen nur *in cumulo* aber nicht weniger herzlich gedankt.

Für ihren Beitrag im Zuge ihrer Studienarbeiten möchte ich (in chronologischer Reihenfolge) Dipl.-Ing. Thomas Mayerhofer, Dipl.-Ing. Heiko Schüßler, Dipl.-Ing. Markus Schedel und Dipl.-Ing. Martin Zimmermann danken.

Herrn Dr.-Ing. Tobias Voigt danke ich für wertvolle Impulse und freundschaftlichen Rat von der Konzeption bis zur Fertigstellung dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meiner Freundin, Dr. Anita Rudy, die mich während der gesamten Dauer dieses „Projekts“ mit allen Höhen, Tiefen und Längen geduldig ertragen, hartnäckig angespornt und durchgängig liebevoll begleitet hat.

Abschließend – aber sicherlich nicht zuletzt – möchte ich meinen Eltern für die nachhaltige Unterstützung und Förderung danken, der ich weit mehr als diese Arbeit schulde.

München, im Juni 2011

Jochen Gläßer

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Produktionstechnik der Bierherstellung .....	3
2.1	GRUNDLAGEN .....	3
2.1.1	<i>Systeme und Produktionssysteme</i> .....	3
2.1.1.1	Systeme .....	3
2.1.1.2	Produktionssysteme .....	3
2.1.2	<i>Prozesse und Rezeptsteuerung</i> .....	3
2.1.2.1	Prozesse .....	3
2.1.2.2	Chargenprozesse und Chargenproduktion .....	4
2.1.2.3	Rezepte und Rezeptsteuerung .....	6
2.1.2.4	Zwischenlager und Produktivlager .....	8
2.1.3	<i>Begriffe zum Produktionsprogramm</i> .....	9
2.1.3.1	Produkte, Artikel und Sorten .....	9
2.1.3.2	Sortiment .....	9
2.1.3.3	Produktionsprogramm .....	10
2.2	PROZESSSTUFEN DER BIERHERSTELLUNG .....	10
2.2.1	<i>Gliederung der Bierherstellung</i> .....	10
2.2.2	<i>Würzproduktion</i> .....	12
2.2.2.1	Überblick .....	12
2.2.2.2	Anlagentechnik .....	13
2.2.2.3	Betriebsweise .....	14
2.2.2.4	Kapazität .....	16
2.2.3	<i>Fermentation</i> .....	17
2.2.3.1	Überblick .....	17
2.2.3.2	Anlagentechnik .....	20
2.2.3.3	Betriebsweise einzelner Tanks .....	21
2.2.3.4	Kapazität von Tanklagern für die Fermentation .....	23
2.2.4	<i>Filtration</i> .....	25
2.2.4.1	Überblick .....	25
2.2.4.2	Anlagentechnik .....	26
2.2.4.3	Betriebsweise .....	27
2.2.4.4	Kapazität .....	29
3	Planung der Bierherstellung .....	30
3.1	ANLAGEN- UND PRODUKTIONSPLANUNG .....	30
3.2	CHARAKTERISTIKA DES BRAUEREIBETRIEBS .....	31
3.2.1	<i>Saisonale Schwankungen</i> .....	31
3.2.2	<i>Sortimentsstruktur</i> .....	33
3.2.3	<i>Arbeitszeitmodelle</i> .....	34

---

3.2.4	<i>Volumenänderungen im Prozess</i> .....	35
3.3	ASPEKTE DER ANLAGENPLANUNG .....	36
3.3.1	<i>Inhalte der Anlagenplanung</i> .....	36
3.3.2	<i>Aufgabenverteilung in Anlagenprojekten</i> .....	37
3.3.3	<i>Anforderungen an die Anlagenplanung</i> .....	39
3.3.3.1	Die Wirtschaftlichkeit der Planung .....	39
3.3.3.2	Der Stufengrundsatz .....	40
3.3.3.3	Der Variantengrundsatz .....	40
3.3.3.4	Der Grundsatz der Projekttreue .....	40
3.3.3.5	Der Vereinheitlichungsgrundsatz .....	40
3.4	ASPEKTE DER PRODUKTIONSPLANUNG .....	41
3.4.1	<i>Gegenstand der Produktionsplanung</i> .....	41
3.4.1.1	Produktionsprogrammplanung .....	43
3.4.1.2	Produktionsablaufplanung .....	44
3.4.2	<i>Produktionsplanung in Brauereien</i> .....	45
3.4.2.1	Rahmenbedingungen der Produktionsplanung in Brauereien .....	45
3.4.2.2	Systeme zur Produktionsplanung in Brauereien .....	47
4	Simulation als Hilfsmittel der Planung .....	50
4.1	PLANEN MIT MODELLEN .....	50
4.1.1	<i>Aspekte der Modellbildung</i> .....	50
4.1.2	<i>Modellgestütztes Problemlösen</i> .....	52
4.1.3	<i>Motivation für den Einsatz von Modellen in der Planung</i> .....	54
4.1.4	<i>Eigenschaften und Klassen von Ersatzmodellen</i> .....	55
4.1.4.1	Physikalische Modelle .....	55
4.1.4.2	Mathematische Modelle .....	56
4.1.4.3	Systemtheoretische Modelle .....	58
4.1.5	<i>Einsatz von Simulationsmodellen</i> .....	59
4.1.5.1	Modellrealisierung und -überprüfung .....	60
4.1.5.2	Definition eines Szenarios .....	60
4.1.5.3	Ausführen eines Simulationslaufs .....	61
4.1.5.4	Iteratives Ausführen von Simulationsläufen .....	61
4.1.6	<i>Simulation und Optimierung</i> .....	62
4.1.6.1	Optimierungsprobleme .....	62
4.1.6.2	Kombination von Simulation und Optimierung .....	63
4.1.6.3	Genetische Algorithmen .....	66
4.2	SIMULATION DER PRODUKTION .....	68
4.2.1	<i>Inhalte für die Simulation der Produktion</i> .....	68
4.2.2	<i>Simulationseinsatz im Lebenszyklus von Produktionssystemen</i> .....	69
4.2.3	<i>Erfolgsfaktoren für die Simulation der Produktion</i> .....	70
4.2.3.1	Qualifikation und Kompetenz .....	70

4.2.3.2	Kommunikation und Kooperation.....	72
4.2.3.3	Modellstruktur und Abstraktionsgrad.....	73
4.2.3.4	Ergebnisdarstellung und Interpretation .....	75
4.3	CHARAKTERISTIKA DER VERWENDETEN SIMULATIONSTECHNIK.....	76
4.3.1	<i>Aufbau- und Ablaufprinzip</i> .....	76
4.3.1.1	Ablaufprinzip: Ereignisorientierung.....	76
4.3.1.2	Aufbauprinzip: Objektorientierung .....	78
4.3.2	<i>Allgemeine Modellstrukturen</i> .....	79
4.3.2.1	Bewegliche Elemente.....	79
4.3.2.2	Stationäre Bausteine.....	79
4.3.2.3	Dienste, Broker und Exporter.....	80
4.3.2.4	Netzwerke, Schnittstellen und Klassen .....	80
4.4	ABLAUFSIMULATION DER CHARGENPRODUKTION .....	81
4.4.1	<i>Chargenprozesse im Vergleich zu Fertigung und Montage</i> .....	81
4.4.1.1	Charakteristika von Fertigungs- und Montageprozessen .....	81
4.4.1.2	Charakteristika von Chargenprozessen .....	82
4.4.2	<i>Anforderungen an die Ablaufsimulation von Chargenprozessen</i> .....	83
4.4.2.1	Simulation der Rezeptfahrweise.....	83
4.4.2.2	Ereignisorientierte Prozesssimulation .....	84
4.4.3	<i>Chargen als bewegliche Elemente</i> .....	86
5	Simulation der Bierherstellung.....	88
5.1	MODELLPERSPEKTIVEN MIT UNTERSCHIEDLICHEM DETAILLIERUNGSGRAD.....	88
5.1.1	<i>Materialorientierte Perspektive</i> .....	89
5.1.2	<i>Kapazitätsorientierte Perspektive</i> .....	91
5.1.2.1	Lagerkapazitäten .....	93
5.1.2.2	Produktionskapazitäten .....	94
5.1.3	<i>Ressourcenorientierte Perspektive</i> .....	95
5.1.4	<i>Prozessorientierte Perspektive</i> .....	97
5.1.5	<i>Technologische Perspektive</i> .....	99
5.2	SIMULATION DER WÜRZEPRODUKTION .....	100
5.2.1	<i>Kapazitätsorientierte Perspektive</i> .....	100
5.2.2	<i>Ressourcenorientierte Perspektive</i> .....	103
5.2.2.1	Einfacher ressourcenorientierter Ansatz.....	103
5.2.2.2	Erweiterter ressourcenorientierter Ansatz .....	106
5.2.3	<i>Prozessorientierte Perspektive</i> .....	109
5.2.3.1	Einfacher prozessorientierter Ansatz.....	109
5.2.3.2	Erweiterter prozessorientierter Ansatz .....	111
5.3	SIMULATION DER FERMENTATION .....	117
5.3.1	<i>Kapazitätsorientierte Perspektive</i> .....	117

---

5.3.2	<i>Mechanismen für die Tankauswahl</i> .....	124
5.3.2.1	Kriterien für die Tankauswahl.....	124
5.3.2.2	Verteilstrategien des Simulators.....	126
5.3.2.3	Erweiterte Strategie für die Tankauswahl .....	126
5.3.2.4	Gruppieren von Chargen bei der Tankauswahl .....	128
5.3.3	<i>Ressourcenorientierte Perspektive</i> .....	130
5.3.3.1	Gemeinsame Strukturen einer Tankgruppe .....	131
5.3.3.2	Einfacher ressourcenorientierter Ansatz.....	132
5.3.3.3	Erweiterter ressourcenorientierter Ansatz .....	134
5.3.4	<i>Prozessorientierte Perspektive</i> .....	135
5.3.5	<i>Auswerten und Visualisieren des Tanklagerbetriebs</i> .....	137
5.3.5.1	Belegung eines Tanklagers.....	137
5.3.5.2	Belegungsstatistik für einzelne Tanks .....	139
5.3.5.3	Histogramm für die Wartezeit bei Transfers .....	140
5.4	SIMULATION DER FILTRATION .....	141
5.4.1	<i>Kapazitätsorientierte Perspektive</i> .....	142
5.4.2	<i>Ressourcenorientierte Perspektive</i> .....	146
5.4.3	<i>Prozessorientierte Perspektive</i> .....	149
5.4.3.1	Einfacher prozessorientierter Ansatz.....	149
5.4.3.2	Erweiterter prozessorientierter Ansatz .....	151
6	Projektbeispiele zur Prozesssimulation .....	159
6.1	PROJEKTBEISPIEL: VISUALISIEREN EINES BETRIEBSKONZEPTS .....	159
6.1.1	<i>Zielsetzung</i> .....	159
6.1.2	<i>Vorgehensweise</i> .....	160
6.1.3	<i>Simulationsergebnisse</i> .....	160
6.2	PROJEKTBEISPIEL: VERGLEICH VON KONFIGURATIONALTERNATIVEN .....	161
6.2.1	<i>Zielsetzung</i> .....	161
6.2.2	<i>Vorgehensweise</i> .....	161
6.2.3	<i>Simulationsergebnisse</i> .....	162
6.3	PROJEKTBEISPIEL: SIMULATIONSGESTÜTZTE FEINDISPOSITION .....	163
6.3.1	<i>Zielsetzung</i> .....	163
6.3.2	<i>Vorgehensweise</i> .....	163
6.3.3	<i>Simulationsergebnisse</i> .....	164
6.4	PROJEKTBEISPIEL: UM- UND AUSBAU EINES PRODUKTIONSBEREICHS .....	165
6.4.1	<i>Zielsetzung</i> .....	165
6.4.2	<i>Vorgehensweise</i> .....	165

6.4.3	<i>Simulationsergebnisse</i> .....	166
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	168
7.1	ZUSAMMENFASSUNG .....	168
7.2	AUSBLICK .....	168
8	Literaturverzeichnis .....	170



## Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

AW	Ausschlagwürze
BE	Bewegliches Element
CIM	computer integrated manufacturing
CIP	(1) cleaning in place = cleaning in process <sup>1</sup> (2) computer integrated processing
DT	Drucktank
DTK	Drucktankkeller
DV	Datenverarbeitung
EA	Evolutionäre Algorithmen
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ERP	enterprise resource planning
ES	Evolutionsstrategien
FFS	Flexibles Fertigungssystem
FIFO	first-in-first-out [Prinzip]
FIS	finite intermediate storage (Strategie)
GA	Genetische Algorithmen
GK	Gärkeller
LK	Lagerkeller
LT	Lagertank
LWE	Läuterwürzeerhitzer
MES	manufacturing execution system
NIS	no intermediate storage (Strategie)
OR	Operations Research
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
VB	Verkaufsbier
VLG	Vorlaufgefäß
ZKG	Zylindro-konischer Gärtank
ZKL	Zylindro-konischer Lagertank
ZKT	Zylindro-konischer Tank
ZW	zero wait (Strategie)
$\Delta t_{\text{Intervall}}$	Intervall für Prozessbeginn innerhalb derselben Prozessstufe
$\Delta t_{\text{Zyklus}}$	Zykluszeit für Prozessbeginn innerhalb derselben Produktionslinie
$n_{\text{Linien}}$	Anzahl Sudlinien
$n_{\text{Stufe}}$	Anzahl Einheiten innerhalb derselben Prozessstufe
$V_{\text{Edukt}}$	Volumen an Edukt einer Produktionsstufe
$V_{\text{Produkt}}$	Volumen an Produkt einer Produktionsstufe

---

<sup>1)</sup> Primäre Bedeutung im Kontext dieser Arbeit; abweichende Bedeutung wird im Einzelfall gekennzeichnet

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Beispiele für die Belegung eines Apparates mit einer Charge .....	5
Bild 2: Verknüpfung zwischen Anlagenmodell und Prozessmodell nach POLKE [46] .....	8
Bild 3: Varianten für die Gliederung des Brauereibetriebs in der Literatur [30] [45] [48] [56] [63] [66] .....	12
Bild 4: Beispiel für die Belegung der Teilanlagen eines Sudhauses bei der Würzproduktion .....	13
Bild 5: Gliederung des Kapitels zur Fermentation bei NARZISS [41].....	18
Bild 6: Gliederung des Kapitels zur Fermentation bei KUNZE [30] .....	19
Bild 7: Belegungszyklus eines Fermentationstanks .....	22
Bild 8: Betrieb eines Tanklagers als Produktivlager .....	24
Bild 9: Beispiel für eine mehrstufige Filterlinie (in Anlehnung an KUNZE [30]).....	27
Bild 10: Aufgaben der Produktionsanlagenplanung für unterschiedliche Zeithorizonte [31].....	30
Bild 11: Richtwerte für die Volumenänderung in einem Zweitankverfahren (nach VEY [66]) .....	35
Bild 12: Leitplan für die Brauereiplanung nach PETERSEN [45].....	37
Bild 13: Aufgabenstruktur der Fabrikplanung nach GÜNZEL [20] .....	38
Bild 14: Position und Aufgabenbereiche der Produktionsplanung im Ebenenmodell der Produktion.....	42
Bild 15: Aufgaben der Produktionsplanung nach SCHARBRODT [48] .....	42
Bild 16: Absatzorientierte Produktionsplanung von Bierherstellung und Bierabfüllung.....	46
Bild 17: Überblick über die zeitlichen Zusammenhänge bei der Produktionsplanung in der Brauerei.....	46
Bild 18: Stufen der Modellbildung nach KÜSTER [31].....	51
Bild 19: Modellgestütztes Problemlösen.....	53
Bild 20: Anforderungen an Modelle nach KÜSTER [31] .....	53
Bild 21: Schema für den Einsatz von Simulationsmodellen .....	59
Bild 22: Verifikation und Validation von Simulationsmodellen.....	60
Bild 23: Simulationsgestützte Optimierung .....	64
Bild 24: Simulation zur Plausibilitätsprüfung für ausgewählte Lösungsvorschläge .....	65
Bild 25: Genetischer Algorithmus mit Simulationsmodell zur Evaluation .....	66
Bild 26: Anwendungsgebiete für den Einsatz von Simulationsmodellen nach KOŠTURIK [29] .....	68
Bild 27: Aufgaben für Simulationsmodelle im Lebenszyklus von Produktionssystemen.....	69
Bild 28: Zusammenspiel der Kompetenzbereiche bei Entwicklung und Einsatz von Simulationsmodellen .....	71
Bild 29: Einfluss des Detaillierungsgrades eines Simulationsmodells auf andere Eigenschaften.....	74
Bild 30: Relation zwischen unterschiedlichen Varianten der diskreten Simulation.....	77
Bild 31: Einsatzschwerpunkt verschiedener Modelltypen abhängig vom Detaillierungsgrad .....	89
Bild 32: Materialübergänge für unterschiedliche Sorten.....	90
Bild 33: Mengenpläne und Bestände als materialorientiertes Modell für die Brauereiproduktion .....	90
Bild 34: Bestandsentwicklung und Verweilzeit im Durchlaufdiagramm (FIFO-Zugriff).....	91
Bild 35: Produktionskapazitäten (dunkelgrau) und Lagerkapazitäten (hellgrau) bei der Brauereiproduktion .....	92
Bild 36: Ressourcen- und prozessorientierte Sicht auf die Belegung eines Maischgefäßes.....	97
Bild 37: Einfaches Modell einer Sudlinie mit konstanter Zykluszeit und stochastischer Bearbeitungszeit.....	102
Bild 38: Gantt-Chart für die Belegung von zwei Sudlinien mit unterschiedlichen Parametern.....	102
Bild 39: Einfaches ressourcenorientiertes Modell für die Würzproduktion .....	103
Bild 40: Vereinfachter Modellansatz für den Transfer zwischen Prozessstufen .....	104
Bild 41: Ausschnitt aus einem Gantt-Chart zu einem ressourcenorientierten Modell mit zwei Sudlinien.....	105
Bild 42: Erweiterte Modellstruktur für eine „Sudlinie“ mit zusätzlicher Stufe „Kühlen“ .....	107
Bild 43: Gantt-Chart für die Belegung von drei Sudlinien mit zwei gemeinsam genutzten Kühlern .....	108
Bild 44: Strukturelemente und Hierarchieebenen für einen einfachen prozessorientierten Modellansatz .....	110
Bild 45: Struktur der Baustein-Klasse „Prozessstufe“ für den prozessorientierten Ansatz.....	110

Bild 46: Beispiele für Schrittketten zweier Prozessstufen in einem prozessorientierten Sudhaus-Modell .....	111
Bild 47: Verzweigte Ablaufkette für die dynamische Auswahl unterschiedlich detaillierter Prozessmodelle.....	111
Bild 48: Strukturelemente und Hierarchieebenen für den erweiterten prozessorientierten Modellansatz .....	112
Bild 49: Koordination zwischen Anlagen- und Verfahrensdefinition im erweiterten prozessorientierten Ansatz....	113
Bild 50: Schematische Übersicht zur Ablaufstruktur im erweiterten prozessorientierten Ansatz.....	114
Bild 51: Prozess-, Transfer- und „Post“-Operationen im erweiterten prozessorientierten Ansatz.....	115
Bild 52: Beispiel für ein Gantt-Chart (Ausschnitt) aus einem Modell mit erweitertem prozessorientierten Ansatz.	116
Bild 53: Klassen-Operationen als Schnittstelle zwischen den Domänen „Projekt“ und „Simulation“ .....	116
Bild 54: Einfacher kapazitätsorientierter Modellansatz für die Fermentation.....	118
Bild 55: Durchlauf und Bestand an Einzelchargen im kapazitätsorientierten Beispielmodell für die Fermentation	119
Bild 56: Histogramm zur Belegungsstatistik für das Tanklager „Fermentation“ .....	120
Bild 57: Einfacher kapazitätsorientierter Modellansatz für die mehrstufige Fermentation.....	121
Bild 58: Kapazitätsbetrachtung für eine zweistufige Fermentation mit getrennten Tankkapazitäten .....	121
Bild 59: Modell und Simulationsergebnis zum Brutto-Tankraum-Bedarf für einen Pool von Mehrzweck-ZKTs ...	122
Bild 60: Klassifikation der vordefinierten Verteilstrategien in eMPlant.....	126
Bild 61: Flussdiagramm für das Gruppieren von Chargen bei der Tankauswahl.....	128
Bild 62: Beispielmodell zum Gruppieren von Chargen bei der Tankauswahl .....	129
Bild 63: Simulationsergebnis zur Tankauswahl mit gruppierten Chargen im Beispielmodell.....	129
Bild 64: Varianten für die Tanklagerbelegung im Beispiel zum Gruppieren von Chargen bei der Tankauswahl ...	130
Bild 65: Gemeinsam genutzte Strukturen auf der Ebene einer Tankgruppe (Beispiel).....	131
Bild 66: Einfaches ressourcenorientiertes Modell für einen einzelnen Tank .....	132
Bild 67: Visualisierung der Tankbelegung für den einfachen ressourcenorientierten Ansatz.....	133
Bild 68: Simulationsergebnis zur Auslastung von Gärtanks abhängig von der Anzahl der CIP-Kreisläufe.....	133
Bild 69: Erweitertes ressourcenorientiertes Modell für einen einzelnen Tank.....	135
Bild 70: Beispiel für ein prozessorientiertes Modell eines einzelnen Tanks mit drei Prozessabschnitten .....	136
Bild 71: Anzahl gleichzeitig zu kühlender ZKGs (Simulationsergebnis mit einem prozessorientierten Modell)....	136
Bild 72: „Volumenanteil der belegten Tanks“ (rot) und „Ausnutzung des Tankraums“ (blau) in der Simulation ...	138
Bild 73: „Ausnutzung des Tankraums“ vs. „Volumenanteil belegter Tanks“.....	139
Bild 74: Definition des „genutzten Volumens“ als Basisgröße für die Ausnutzung des Tankraums.....	139
Bild 75: Belegungsstatistiken für zwei Tanklagerbereiche mit ZKGs (links) und ZKLs (rechts) .....	140
Bild 76: Histogramme für die Wartezeit für den Transfer vom ZKG zum ZKL.....	141
Bild 77: Einfacher kapazitätsorientierter Modellansatz für die Filtration .....	144
Bild 78: Belegungsstatistik für drei Filterlinien im kapazitätsorientierten Beispielmodell.....	145
Bild 79: Gantt-Chart für die Belegung von drei Filterlinien in einem kapazitätsorientierten Modell.....	145
Bild 80: Ablaufschema für den Synchronisationsmechanismus für die Filtration bei ressourcenorientierter Sicht .	148
Bild 81: Einfacher prozessorientierter Modellansatz für die Filtration .....	150
Bild 82: Schematischer Aufbau eines Drucktanklagers beim erweiterten prozessorientierten Ansatz .....	151
Bild 83: Erweiterter prozessorientierter Modellansatz für die Filtration als Basis eines Brauerei-Gesamtmodells..	154
Bild 84: Simulierte Tankbelegung für ein Demonstrationsmodell, das den erweiterten prozessorientierten Ansatz für die Filtration für alle Stufen der Bierherstellung und -abfüllung verwendet. ....	157
Bild 86: Dokumentation eines Ablaufschemas für die Würzproduktion in einem modernisierten Sudwerk .....	160
Bild 87: Konfigurationsalternativen für den Ausbau eines bestehenden Sudhauses.....	161
Bild 88: Auslastung der Ressourcen in zwei Konfigurationsvarianten für den Ausbau eines Sudhauses.....	162
Bild 89: Effekt der simulationsgestützten Feindisposition der Würzproduktion auf den Dampfverbrauch .....	164
Bild 90: Überblick zur Konfiguration des Drucktankkellers während der Umbauphase .....	166
Bild 91: Gantt-Chart und Belegungsstatistik für das in Bild 90 dargestellte Drucktanklager.....	167

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rezeptformen nach NE33 und ISA SP 88 [56] .....	7
Tabelle 2: Überblick über die Würzeherstellung .....	13
Tabelle 3: Kategorien von Unterschieden zwischen Sudrezepten.....	15
Tabelle 4: Hauptfunktion der Abschnitte der Fermentation.....	19
Tabelle 5: Matrix aus Modellperspektiven und Prozessstufen mit Verweisen auf die Gliederung.....	88
Tabelle 6: Zwischenlagerung bei der Bierherstellung.....	93
Tabelle 7: Produktionskapazitäten in der Brauerei .....	94
Tabelle 8: Parameter der Sudlinien im Beispiel-Modell (Bild 38).....	102
Tabelle 9: Prozess-Parameter im ressourcenorientierten Beispiel-Modell (Bild 41) .....	105
Tabelle 10: Maximale Belegungszeit je Stufe für unterschiedliche Konfigurationen mit $\Delta t_{\text{Zyklus}} = 144 \text{ min}$ .....	107
Tabelle 11: Demonstrationsbeispiel für das simulationsgestützte Dimensionieren eines Ressourcen-Pools.....	109
Tabelle 12: Operationen-Klassen für den erweiterten prozessorientierten Ansatz.....	115
Tabelle 13: Prozessparameter im kapazitätsorientierten Demonstrationsmodell für die Fermentation .....	121
Tabelle 14: Gärkeller-Konfiguration im Beispiel für den einfachen ressourcenorientierten Ansatz .....	133
Tabelle 15: Parameter der Filter im kapazitätsorientierten Beispielmodell .....	145
Tabelle 16: Parameter für das Transfer-Objekt im erweiterten prozessorientierten Filtrationsmodell .....	152
Tabelle 17: Erstes Beispiel für den gestaffelten Zugriff auf Quell tanks .....	153
Tabelle 18: Zweites Beispiel für den gestaffelten Zugriff auf Quell tanks .....	153
Tabelle 19: Parameter im Demonstrationsmodell für den erweiterten prozessorientierten Ansatz in der Filtration. ....	156

# 1 Einleitung

Die intelligente Konzeption und der wirtschaftliche Betrieb von industriellen Produktionssystemen stellen sich unabhängig vom Branchenumfeld, der Betriebsgröße, dem Automatisierungsgrad und der Wirtschaftslage stets als höchst komplexes Planungsproblem dar, das nur erfolgreich gelöst werden kann, wenn die bestehenden Entscheidungs- und Gestaltungsspielräume korrekt identifiziert und mit angemessener Rücksicht auf sämtliche relevanten Details und potenziellen Störfaktoren analysiert werden. Unabhängig von einem eher strategischen oder eher operativen Planungshorizont muss dabei die Detailtiefe sowohl bezüglich der Restriktionen als auch der Freiheitsgrade begrenzt werden, da jede praxisrelevante Planungsaufgabe in endlicher Zeit und mit begrenzten Ressourcen zu bewältigen ist. Neben notwendigen Zugeständnissen an die Effizienz des Planungsablaufs limitieren aber immer auch die eingeschränkte Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von Informationen sowie deren prinzipielle oder individuelle Unschärfe, Unsicherheit und begrenzte Gültigkeit die Planungsqualität. Diese ist – zumindest bei wiederkehrenden Planungsaufgaben – letztendlich daran zu messen, ob bzw. wie zuverlässig existierende d. h. „machbare“ Lösungen überhaupt gefunden werden und ggf. mit welcher Wahrscheinlichkeit von einer gewissen Annäherung an einen bekannten oder postulierten Optimalfall ausgegangen werden kann.

Im konkreten Einzelfall liegt innerhalb des geschilderten generellen Spannungsfelds für Planungsaufgaben eine individuelle Gewichtung zwischen den genannten Problemfaktoren bezüglich der Informationsqualität und -verarbeitung vor. Der Planungserfolg hängt daher wesentlich davon ab, wie gut die eingesetzten Planungswerkzeuge und -methoden an dieses individuelle Profil angepasst sind. Für die Ausprägung dieses Profils sind neben dem konkreten Planungskontext, z. B. einer strategischen Anlagenplanung oder einer operativen Produktionsplanung, vor allem auch branchentypische Gegebenheiten verantwortlich, was für die Entwicklung eines branchenspezifischen Arsenalts oder zumindest die möglichst weitgehende Adaption von bereits existierenden Hilfsmitteln spricht.

In Bezug auf die Anlagenplanung für Brauereien haben UNTERSTEIN [63] und VEY [66] dies auf der Grundlage konventioneller Ansätze (Kennzahlensysteme, Kennlinien, Tabellenkalkulation) bereits ausführlich diskutiert. SCHARBRODT [48] hat sich mit Spezifika der Produktionsplanung in Brauereien auseinandergesetzt und diese in eine Planungslösung für die Prozessindustrie eingebracht. Da das Modellieren der Betriebsabläufe in Brauereien ein wesentliches verbindendes Element dieser „Handlungsstränge“ darstellt, und MIGNON [39], RÄDLER [47], SCHARBRODT [48] sowie VOIGT [67] den Einsatz von Simulationsmodellen im Brauereikontext mit unterschiedlichen Schwerpunkten beleuchtet hatten, lag es nicht zuletzt aufgrund der Ergebnisse von VEY [66] nahe, das Potenzial eines auf die Abläufe der Bierherstellung fokussierten Simulationsansatzes zu untersuchen.

Dieses Vorhaben wurde von der KRONES Gruppe unterstützt, deren Freisinger Tochterfirma STEINECKER im Zuge eines umfangreichen Consulting-Projekts (vgl. Abschnitt 6.4) gerade begonnen hatte, die für den Kontext der Abfüllung bereits bewährte Technik der Computersimulation auch im Bereich der Brauereianlagen anzuwenden. Als Entwicklungsgrundlage war von dieser Seite der ereignisorientierte Materialfluss-Simulator SIMPLE++ (AESOP), später abgelöst durch eMPlant (Tecnomatix), vorgegeben (Details s. Abschnitt 4.3).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das grundsätzliche Potenzial einer ereignisorientierten Ablaufsimulation der Bierherstellung zur Unterstützung der Anlagen- und Produktionsplanung von Brauereien aufzuzeigen sowie konkrete Ansätze für die prinzipielle Funktionsweise von modularen Komponenten für die enthaltenen Prozessbereiche vorzustellen und deren Eignung für unterschiedliche Aufgaben zu diskutieren.

Da für die Simulation der Abfüllung zu Beginn dieser Arbeit bei KRONES bereits ein ausgereiftes Instrumentarium im Einsatz war, wird dieser Bereich hier nur berücksichtigt, sofern übergreifende Zusammenhänge betroffen sind oder ein unmittelbarer Einfluss auf die Bierherstellung besteht.

## 2 Produktionstechnik der Bierherstellung

In diesem Abschnitt soll die Herstellung von abfüllfertigem Bier unter besonderer Berücksichtigung des produktionstechnischen Aspekts kurz vorgestellt werden. Dazu sind zunächst ausgewählte Grundbegriffe näher zu erläutern.

### 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Systeme und Produktionssysteme

##### 2.1.1.1 Systeme

Der Begriff „System“ geht auf das griechische Wort *systema* zurück, das die semantischen Komponenten „zusammen“ (*gr.: syn-*) und „hinstellen“ (*gr.: histanai*) verbindet und ein „geordnetes Ganzes“ bezeichnet. Demnach bezeichnet ein System allgemein eine Anzahl von korrelierten Elementen, wobei es sich auch um abstrakte Gebilde wie Prinzipien, Fakten oder Ideen handeln kann [12] [21].

DIN 25424 [13] definiert technische Systeme konkreter als „Zusammenfassung von technisch-organisatorischen Mitteln zur autonomen Erfüllung eines Aufgabenkomplexes“ [29]. Der Systembegriff ist eng mit dem Modellbegriff verbunden, der hier erst in Kapitel 4 näher beleuchtet werden soll. In diesem Zusammenhang zitiert KOŠTURIK [29] DAENZER:

„Eine Diskussion darüber, ob es reale Systeme überhaupt gibt, ist unfruchtbar. Wesentlich ist, dass wir reale Gegebenheiten unter dem Systemgesichtspunkt betrachten können.“ [10]

##### 2.1.1.2 Produktionssysteme

Einen Sonderfall der technischen Systeme bilden die Produktionssysteme, die neben materiellen Komponenten vor allem auch Organisationsprinzipien und in zunehmendem Maße informationstechnische Verknüpfungen beinhalten. Dazu stellt WILDEMANN fest:

„Die realen Produktionssysteme haben i. d. R. dabei eine so hohe Komplexität, dass innerhalb der Produktion eine starke Arbeitsteilung zwischen der eigentlichen Produktion als Leistungserstellungsprozess, der Produktionsplanung und Produktionssteuerung [...] notwendig ist.“ [68]

#### 2.1.2 Prozesse und Rezeptsteuerung

##### 2.1.2.1 Prozesse

Der Begriff „Prozess“ wird nach DIN 19222 definiert als Gesamtheit von aufeinander wirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder gespeichert werden [11] [56].

Ein verfahrenstechnischer Prozess wird nach DIN 28004 als „Folge von chemischen, physikalischen oder biologischen Vorgängen zur Gewinnung, Herstellung oder Beseitigung von Stoffen oder Produkten“ beschrieben [14] [56]. UHLIG stellt dazu weiter fest: „In verfahrenstechnischen Anlagen sind chemische und physikalische Prozesse überlagert, d. h., sie finden unter makroskopischer Betrachtung gleichzeitig statt.“ [56]

Da diese Definitionen auch auf natürliche Prozesse und Systeme, wie z. B. die Umsetzung von Energie, Nährstoffen und Schadstoffen in biologischen Stoffwechselsystemen, anwendbar sind, sei hier kurz auf POLKE verwiesen:

„Technische Prozesse sind, im Gegensatz zu natürlichen Prozessen, künstlich angelegte, bewußt initiierte und in ihrem Ablauf gezielt gesteuerte Prozesse. Sie dienen einem bestimmten Zweck.“ [46]

Auf eine ausführliche Abgrenzung der technischen Prozesse gegen reine informationstechnische Prozesse oder Geschäftsprozesse soll hier verzichtet werden.

In Zusammenhang mit der Bierherstellung sind alle denkbaren Kombinationen der in der Prozessdefinition nach DIN 28004 [14] alternativ formulierten Qualifikationsmerkmale (entsprechend einer Matrix {chemische, physikalische, biologische}  $\times$  {Gewinnung, Herstellung, Beseitigung}) belegbar, so dass der geläufige Begriff „Brauprozess“ in voller Übereinstimmung mit dieser Definition steht. In allen Abschnitten des Brauprozesses überlagern sich chemische, physikalische und biologische Vorgänge, deren komplexes und dynamisches Zusammenspiel kaum erschöpfend untersucht und beschrieben werden kann. Die verfahrenstechnischen Maßnahmen beeinflussen dabei immer sehr viele unterschiedliche Substanzen bzw. Stofffraktionen gleichzeitig, sodass sich Prozessführung und Prozesskontrolle nur an indirekten Messgrößen und ausgewählten „Leitsubstanzen“ orientieren können.

### 2.1.2.2 Chargenprozesse und Chargenproduktion

Wie in Abschnitt 2.2 ausführlicher gezeigt werden soll, beruht die Bierherstellung überwiegend auf diskontinuierlichen Verfahren, die als *Chargenprozesse* realisiert werden. Dazu werden üblicherweise speicherfähige Produktionseinrichtungen, sogenannte *Ansatzapparate* [56], eingesetzt. Als *Apparat* wird ein Anlagenelement bezeichnet, das im Unterschied zu einer *Maschine* keine eigene Motorik besitzt [35]. Dieser Begriff soll hier aber auch für Einrichtungen gelten, die durchaus über Rührwerke, angetriebene Ventile usw. verfügen können. Der Begriff „Charge“ für die einmalige Beladung eines solchen Apparates geht dabei auf das altfranzösische Wort *chargier* (Last, Ladung) zurück, dessen Wurzeln bis zum lateinischen *carrus* (Wagen) reichen [21]. Er bezeichnet die „apparateabhängige Menge eines Produktes, welche in einem definierten Produktionsablauf diskontinuierlich (chargenweise) hergestellt wird“ [56].

POLKE [46] differenziert in Übereinstimmung mit der allgemeinen Prozessdefinition nach DIN 19222 [11] (vgl. 2.1.2.1) für die produktbezogenen Funktionen in verfahrenstechnischen



Anlagen zwischen *Fördern*, *Lagern* und *Umsetzen*. Typisch für die Chargenproduktion ist dabei im Unterschied zur kontinuierlichen Arbeitsweise der zyklische Betrieb der Apparate mit den Schritten „Füllen, Bearbeiten/Verweilen, Leeren“ [56]. Dieser Zyklus, den Bild 1 schematisch darstellt, ähnelt grundsätzlich der Arbeitsweise fertigungstechnischer Maschinen, bei denen in jedem Arbeitstakt eine Anzahl von Werkstücken zugeführt, bearbeitet und anschließend abgeführt wird. Allerdings kann vor allem im Kontext der industriellen Massenfertigung die Aufnahmekapazität der Maschine im Verhältnis zu ihrer Durchsatzleistung meist vernachlässigt werden, während in der Chargenproduktion der Speicherfunktion des Apparates zentrale Bedeutung zukommt.

Wie Bild 1 illustriert, kann es erforderlich sein, einen Apparat vor dem Eintreffen einer Charge zu „rüsten“, also vorzubereiten, z. B. indem eine bestimmte Temperatur eingestellt oder der Reaktionsraum mit einem Gas vorgespannt wird. Andere Maßnahmen, wie das Entspannen, Abkühlen oder das im Beispiel dargestellte Reinigen des Apparates, finden nach dem Abgang statt. Der Apparat wird durch dem Prozess vor- und nachgelagerte Schritte über die eigentliche Durchlaufzeit der Charge hinaus beansprucht, woraus eine entsprechend höhere Belegungszeit resultiert.

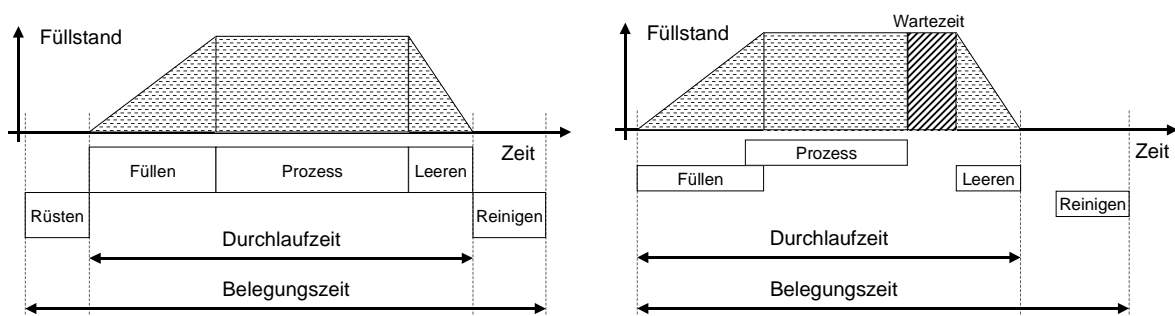


Bild 1: Beispiele für die Belegung eines Apparates mit einer Charge

Die Abfolge von *Rüsten*, *Füllen*, *Prozess*, *Leeren* und *Reinigen* ist in Bild 1 links idealisiert als lückenlose Sequenz von streng isolierten Vorgängen dargestellt. In der Realität können dagegen sowohl Wartezeiten als auch Überschneidungen zwischen diesen Schritten auftreten, z. B. wenn der Prozess einsetzt bevor das Füllen abgeschlossen ist, der Apparat nach dem Abschluss des Prozesses nicht sofort geleert werden kann oder die Reinigung aus technischen oder organisatorischen Gründen nicht sofort nach dem Abgang der Charge ausgeführt wird (vgl. Bild 1, rechts).

Der Begriff „Prozess“ soll hier sämtliche Abläufe während der Durchlaufzeit bis zum angestrebten Endzustand der Charge umfassen. Innerhalb dieses Zeitabschnitts können beliebig komplexe, mehrstufige und vielschichtige chemisch-physikalische Umsetzungen stattfinden, deren Verlauf je nach Ausstattung des Apparates, z. B. durch Rühren, Heizen, Kühlen oder eine Druckregelung, beeinflusst werden kann.

Ein Chargenprozess kann sich außerdem über mehrere apparative Stufen erstrecken, zwischen denen eine Charge weitergereicht wird. Zur Entkopplung aufeinanderfolgender Stufen können dabei – ähnlich wie in der Fertigung beim Einsatz seriell verketteter Maschinen – Puffer bzw. Pufferbehälter verwendet werden, „um zu verhindern, dass sich Störungen durch die gesamte Anlage fortsetzen.“ [46]. Da die Prozesse innerhalb einer Stufe zumindest „im Kernbereich der eigentlichen chemischen Reaktion grundsätzlich probabilistisch ablaufen und sich damit bis zu einem gewissen Grade der Berechenbarkeit entziehen“ [46], wird im zyklischen Betrieb für aufeinanderfolgende Belegungen desselben Apparates meist eine gewisse zeitliche Staffelung vorgesehen, so dass zumindest geringfügige zeitliche Unregelmäßigkeiten im Prozessverlauf ohne unmittelbaren Effekt für nachfolgende Chargen bleiben.

Im Unterschied zu halbfertigen Werkstücken im Bereich der Fertigung sind verfahrenstechnische Zwischenprodukte in der Regel instabil bzw. nur begrenzt haltbar. Ihre Qualitätsmerkmale können sich durch schwer kontrollierbare chemisch-physikalische Effekte (Reaktionen, Phasenübergänge, Entmischung, usw.) bereits bei kurzen Verzögerungszeiten entscheidend verändern. Das Puffern von Chargen zwischen zwei Prozessstufen ist daher nur bei ausreichender Stabilität des zu speichernden Materials sinnvoll bzw. zulässig. KOOPMANN [28] unterscheidet systematisch folgende Fälle von Restriktionen für die Kopplung zwischen Prozessstufen:

- *ZW-Strategie (zero wait)*: Verzögerungszeiten generell unzulässig
- *NIS-Strategie (no intermediate storage)*: Vorgängerapparat dient ggf. als Puffer
- *FIS-Strategie (finite intermediate storage)*: limitierter Puffer zwischen den Apparaten

Dabei ist für die NIS- und FIS-Strategie zu berücksichtigen, dass für labile Zwischenprodukte auch die zulässige Pufferzeit begrenzt ist. Beim Einsatz von Pufferbehältern ist außerdem zu unterscheiden, ob das Vermischen unterschiedlicher Chargen zulässig sein soll oder nicht, bzw. ob der Puffer zu derselben Zeit nur für eine einzige Charge (*exklusiv*) oder ggf. mehreren gleichzeitig (*parallel*) zur Verfügung steht.

In einer verfahrenstechnischen Anlage sind die Apparate häufig durch Rohrleitungen fest miteinander verbunden, wobei mehr oder weniger aufwendige Systeme aus Rohren, Ventilen und Fördereinrichtungen trotzdem gewisse Freiheitsgrade für die „Verschaltung“ der Apparate schaffen können. Für die resultierende physische oder logische Verknüpfung der Apparate werden unterschiedliche Konstellationen bzw. *Topologien* unterschieden, die vom mehrstufigen seriellen „Einzelstrang“, der in Anlehnung an die Fertigung oft auch als „Straße“ oder „Linie“ bezeichnet wird, bis zu komplexen und variablen „Netzwerken“ in Mehrzweck-Anlagen reichen. Eine systematische Klassifikation von Anlagentopologien findet man z. B. bei UHLIG [56].

### 2.1.2.3 Rezepte und Rezeptsteuerung

Der Begriff „Rezept“ bezog sich ursprünglich auf die Anweisung eines Arztes zur Medikation, die im lateinischen Imperativ „*Recipe...!*“ (etwa: „Nimm ...!“) zum Ausdruck kommt. In Zu-

sammenhang mit der Anweisung zur Zubereitung von Speisen (vgl. „Man nehme ...!“) wurde der Begriff erst später belegt [21]. In dieser Bedeutung, nämlich als Kombination von Angaben zu Ingredienzien in Verbindung mit Instruktionen zu deren Verarbeitung [9] ist der Begriff „Rezept“ in enger Verbindung mit der Verfahrenstechnik und der Chargenproduktion zu sehen. Nicht zuletzt wird das englische Wort für Charge (*engl.: batch*) mit dem Wortfeld „Backen“ in Verbindung gebracht [21].

Zur Beschreibung von Chargenprozessen dienen Rezepte [56], in denen nach NAMUR Empfehlung NE33 [40] neben der eigentlichen Verfahrensvorschrift auch Angaben zu den benötigten Einsatzstoffen, den Anforderungen an zu verwendende Apparate und Informationen zur Rezeptverwaltung enthalten sind. Zur Automatisierung der Chargenproduktion hat sich die *Rezeptfahrweise* bzw. die *Rezeptsteuerung* durchgesetzt, „eine Ablaufsteuerung, die in der Schrittfolge flexibel und offen für Veränderungen auch während des Ablaufs ist“ [56]. Diese Flexibilität entspricht den typischen Anforderungen in der chemischen und pharmazeutischen Industrie, wo häufig kurzlebige aber haltbare Produkte in zeitlich begrenzten Kampagnen hergestellt werden, sodass immer neue bzw. ständig wechselnde Produktionsabläufe möglichst mit demselben apparativen Arsenal darzustellen sind. Daher werden dort verbreitet Universalapparate eingesetzt, die in Mehrzweck-Anlagen rezeptabhängig genutzt werden können [56].

Gestaltung und Gewichtung der inhaltlichen Elemente von Rezepten richten sich nach den individuellen Anforderungen im jeweiligen Anwendungsgebiet, vom primär verfahrensorientierten und nicht anlagenspezifischen „Urrezept“ über das nach den Möglichkeiten und Erfordernissen der Prozessleittechnik konkretisierte „Grundrezept“ bis zum „Steuerrezept“, durch das die Verarbeitung einer individuellen Charge auf einer bestimmten Produktionsanlage genau definiert wird.

*Tabelle 1: Rezeptformen nach NE33 und ISA SP 88 [56]*

NAMUR Empfehlung NE33	ISA SP 88
Urrezept	General Recipe
--	Site Recipe
Grundrezept	Master Recipe
Steuerrezept	Control Recipe

Gemeinsam ist allen Rezeptformen ein hierarchischer Aufbau, der eine formale Gliederung bzw. Detaillierung der beschriebenen Abläufe über mehrere Stufen zulässt. Rezepte werden dabei oft aus einem Vorrat von modularen Komponenten (z. B. sogenannte „Grundoperationen“) für die jeweilige Rezeptform aufgebaut. Sind die für unterschiedliche Rezeptformen angebotenen Komponenten aufeinander abgestimmt oder sogar durch Abbildungsvorschriften verbunden, kann

dies die stufenweise Transformation von einem Urrezept bis zum Steuerrezept wesentlich vereinfachen.

Insgesamt stellt das Medium „Rezept“ damit nach POLKE [46] eine Schnittstelle zwischen den „Welten“ der Verfahrenstechnik, Anlagentechnik und Leittechnik dar. In Verbindung mit einer mehrstufigen Gliederung des Anlagenmodells und des Prozessmodells stellt derselbe Autor dazu die in Bild 2 wiedergegebenen Begriffe und Gliederungsebenen gegenüber.

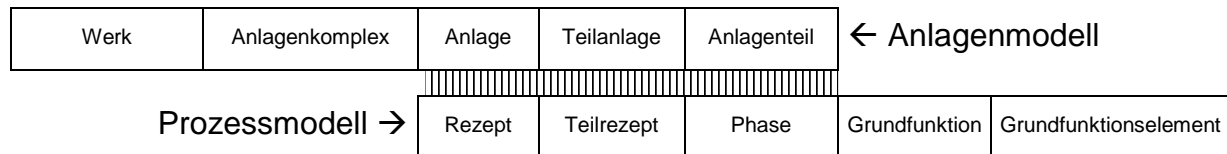


Bild 2: Verknüpfung zwischen Anlagenmodell und Prozessmodell nach POLKE [46]

#### 2.1.2.4 Zwischenlager und Produktivlager

Über den allgemeinen Sprachgebrauch im Kontext der Produktion hinaus bezeichnet der Begriff der „Lagerung“ einen obligatorischen Abschnitt der Bierherstellung. Die folgenden Definitionen sollen den Unterschied zwischen dieser „produktiven Lagerung“ als Sonderfall der „Zwischenlagerung“ präzisieren.

Die Betriebswirtschaftslehre unterscheidet in Fertigungsbetrieben grundsätzlich Eingangslager, Ausgangslager und Zwischenlager, wobei in den Letzteren „Halbfabrikate unterschiedlichen Reifegrades“ aufbewahrt werden [70]. Ein Zwischenlager kann zwischen asynchron arbeitenden Fertigungsstufen vermitteln und stellt dabei einen Puffer dar, dessen Inhalt als Sicherheitsbestand unvorhergesehene Unterbrechungen der Produktion in vorgeschalteten Abteilungen überbrücken soll.

Mehrstufige Fertigungs- oder Montageprozesse werden häufig durch die Verkettung von Stufen dargestellt, die über Zwischenlager bzw. Puffer entkoppelt sind. Dadurch entsteht eine alternierende Folge von Fertigungsstufen und Zwischenlagern. Im Unterschied dazu vereinigen die speicherfähigen Ansatzapparate in der Chargenproduktion in Verbindung mit der NIS-Strategie (vgl. 2.1.2.2) die Funktion einer Fertigungsstufe mit den Aufgaben des nachfolgenden Zwischenlagers.

Sofern der Aufenthalt in einem Zwischenlager, z. B. für einen Reifungsprozess, ein Bestandteil des Fertigungsprozesses ist, spricht man von einem Produktivlager [70]. In Zusammenhang mit der Fermentation (vgl. 2.2.3) spielen Tanklager als Produktivlager eine wesentliche Rolle für die Bierherstellung [4] [54].

### 2.1.3 Begriffe zum Produktionsprogramm

Die nachfolgenden Abschnitte konkretisieren die Interpretation einiger Schlüsselbegriffe für den Gebrauch in dieser Arbeit, da diese in verschiedenen Quellen und Zusammenhängen uneinheitlich und teilweise widersprüchlich gebraucht werden.

#### 2.1.3.1 Produkte, Artikel und Sorten

Grundsätzlich werden die in verfahrenstechnischen Umsetzungen oder chemischen Reaktionen gebildeten Stoffe als *Produkte* bezeichnet, wobei man in mehrstufigen Verfahren Zwischenprodukte und Endprodukte unterscheiden kann. Im betriebswirtschaftlichen Kontext werden dagegen häufig nur die verkaufsfähigen Endprodukte der Produktion als Produkte betrachtet, wie auch die folgende Definition nahe legt:

„'Produkt' steht für ein physisches Objekt samt Zusatzleistungen (z. B. Kundendienst), dessen Merkmale die Abnehmerseite zu einem entgeltlichen Erwerb veranlassen sollen.“  
[55]

Um Missverständnissen vorzubeugen, sollen in dieser Arbeit Produkte der *Bierabfüllung* und ggf. einer anschließenden *Verpackung* als *Artikel* bezeichnet werden. Für unterschiedliche Produkte der *Bierherstellung* ist dagegen der Begriff der *Sorte* üblich [45], der auch in Bezug auf Zwischenprodukte gebraucht wird. Artikel können sich z. B. hinsichtlich Sorte, Behälter, Gebinde, Aufmachung oder auch nach Art und Umfang der angewandten Stabilisierungsmaßnahmen unterscheiden, wobei dieselbe Sorte oft in unterschiedliche Artikel eingeht. Der umgekehrte Fall ist für Mischgetränke oder solche Artikel gegeben, die Behälter unterschiedlicher Sorten in „Mischkästen“ oder „Mischpaletten“ kombinieren.

Die Hierarchie zwischen Sorte und Artikel hinsichtlich des Diversifikationsgrades wird zwar zumindest für den Bereich der Fertigung auch umgekehrt beschrieben [15]. Hier soll aber dem branchenüblichen Sprachgebrauch gefolgt werden.

#### 2.1.3.2 Sortiment

„'Sortiment' (Absatzprogramm) bezeichnet die Menge der Produkte und Dienstleistungen, die ein Unternehmen aus eigener Produktion oder Fremdbezug der Abnehmerseite zum Kauf anbietet.“ [55]

Nach WÖHE [70] kommt dem Sortiment für Handelsbetriebe die Rolle des Produktionsprogramms für Industriebetriebe zu, wobei sich beide Begriffe jeweils auf die Gesamtheit der angebotenen Leistungen, also Produkte bzw. Waren, beziehen. Das Sortiment bildet damit eine wichtige Schnittstelle zwischen Produktion und Absatz. Der Begriff des Sortiments wird teilweise in Verbindung mit verschiedenen Präfixen auch im direkten Kontext der Produktion gebraucht. So werden zahlreiche weitgehend selbsterklärende Begriffe wie Materialsortiment, Absatzsortiment, Fertigungssortiment oder Artikelsortiment gebildet [15] [25]. Viele Brauerei-

unternehmen ergänzen ihr Fertigungssortiment durch Handelswaren, um ein möglichst umfassendes Absatzsortiment anbieten zu können.

In Zusammenhang mit der Bierherstellung soll der Begriff Sortiment in dieser Arbeit flexibel gehandhabt werden und kann sich kontextabhängig auf mehr oder weniger umfangreiche Teilmengen des gesamten Sortiments beziehen.

### **2.1.3.3 Produktionsprogramm**

LÜCK [33] deklariert den Begriff *Produktionsprogramm* per Querverweis als Synonym zum Begriff *Fertigungsprogramm*. In der vorliegenden Arbeit wird in Einklang mit der verwendeten Literatur durchgängig vom Produktionsprogramm die Rede sein. Das Produktionsprogramm beinhaltet mindestens eine qualitative Definition des Fertigungssortiments für einen gewissen Zeitraum. Darüber hinaus kann auch die quantitative Zusammensetzung durch relative oder absolute Mengenangaben festgelegt sein.

## **2.2 Prozessstufen der Bierherstellung**

Die Brauereiproduktion kann und soll hier nicht umfassend behandelt werden, da dies aufgrund ihrer Komplexität und der Gestaltungsvielfalt hinsichtlich Technologie, Technik und Ablauforganisation dem Rahmen dieser Arbeit nicht angemessen wäre. Nachfolgend werden die Prozessstufen der Bierherstellung trotzdem kurz vorgestellt, um „Nicht-Brauern“ einen geeigneten allgemeinen Hintergrund zu bieten und die eigene Position gegenüber teilweise uneinheitlichen Sicht- bzw. Ausdrucksweisen zu präzisieren. Einen Überblick über den Gesamtprozess in Form eines Phasenmodells und eines Grundfließbilds bietet [6]. Einschlägige Fachliteratur ist den Quellenverweisen in diesem Abschnitt zu entnehmen.

### **2.2.1 Gliederung der Bierherstellung**

Ohne Zweifel besteht innerhalb der Produktionsprozesse eines Brauereibetriebs wie auch in seiner technischen Struktur eine gewisse Gliederung. Die *Bierherstellung* umfasst nur einen Ausschnitt dieser Prozesse, wie die vergleichende Gegenüberstellung unterschiedlicher Gliederungsansätze aus verschiedenen Publikationen zur Brauereiplanung (s. Bild 3) verdeutlicht. Dort sind nur die wichtigsten Prozessstufen bzw. Brauereiabteilungen dargestellt, ohne dass die Bedeutung der Versorgungseinrichtungen und Nebenanlagen für die Planung in Frage gestellt werden soll. Auf die Malzbereitung wurde verzichtet, da sie heute fast immer organisatorisch unabhängig vom Brauereibetrieb gehandhabt wird.

Weitgehende Übereinstimmung zeigen die unterschiedlichen Quellen hinsichtlich der technischen bzw. organisatorischen Gliederung des Brauereibetriebs in die folgenden Bereiche:

- Siloanlagen
- Sudhaus
- Gär- und Lagerkeller
- Filtration
- Drucktanks
- Abfüllung
- Vollgut-Lager

Diese Gliederung trifft auf fast alle Brauereibetriebe zu, sieht man von Spezialfällen ab, die in Kooperation mit anderen Betrieben oder Standorten arbeiten und nur Teile der Prozesskette selbst betreiben. Die genannten Bereiche werden in der Regel zumindest als räumliche Einheit angelegt und oft auch organisatorisch als eigene Abteilung verwaltet. Andererseits können in einem bestimmten Bereich auch mehrere, räumlich und organisatorisch mehr oder weniger unabhängige Abteilungen betrieben werden.

Die zweite Zeile in Bild 3 soll die wesentliche Funktion jedes dieser Bereiche innerhalb der Brauerei mit den allgemeinen Strukturelementen einer chemischen Produktionsanlage nach UHLIG [56] korrelieren. Dabei können die Bereiche „Drucktanks“ und „Vollgut-Lager“ nicht zugeordnet werden, da ihre Funktion als unproduktives Zwischenlager offenbar außerhalb des dort verwendeten Begriffs der *Produktionsanlage* gesehen wird.

Der Begriff „Produktion“ wird von einigen Autoren ([45], [62], [66]) noch enger gefasst, wobei unterstellt werden soll, dass hier jeweils die „Produktion von Bier“ also die „Bierherstellung“ gemeint ist. Obwohl bereits der unfiltrierte Inhalt der Lagertanks als „Bier“ gilt, wird die „Filtration“ überwiegend der Bierherstellung zugeordnet. Lediglich SCHARBRODT [48] isoliert diesen Bereich als „Bindeglied“ zwischen den autonomen Produktionsbereichen „Bierherstellung“ und „Bierabfüllung“.

KUNZE [30] stuft die „Würzeherstellung“ gleichrangig mit der „Bierherstellung“ (und der hier nicht dargestellten „Malzherstellung“) ein, was dem hohen apparativen Aufwand für diesen Bereich sicher gerecht wird.

Uneinigkeit besteht hinsichtlich der Zuordnung des Drucktankbereichs, der von UNTERSTEIN [62] und PETERSEN [45] der „Produktion“, von VEY [66] ganz und von KUNZE [30] und SCHARBRODT [48] zumindest teilweise der „Abfüllung“ zugeordnet wird. Die letztere Sichtweise entspricht am ehesten der Praxis in Planung und Betrieb, da die Abläufe im Drucktankkeller weitgehend von den angrenzenden Abteilungen fremdbestimmt werden.

Der Aspekt der Ablauforganisation wird durch die Einteilung bei SCHARBRODT [48] am besten berücksichtigt, da dort die Schnittstellen in den Bereichen „Lagerkeller“ und „Drucktanks“ liegen, in denen aufgrund der vergleichsweise hohen Stabilität der Zwischenprodukte tatsächlich Spielräume für eine Disposition bestehen.

Technische Gliederung	Silo	Sudhaus	Gär- und Lagerkeller	Filtration	Drucktanks	Abfüllung und Verpackung	Vollgut-Lager
chem. Produktionsanlage nach UHLIG	Rohstofflager	Vorbereiten	Reaktion	Aufbereiten		Konfektionieren	
UNTERSTEIN	Produktion					Abfüllung und Verladung	
PETERSEN	Produktionseinrichtung					Abfüllanlagen	Stapelräume
VEY	Produktion				Abfüllung		Logistik und Vertrieb
KUNZE	Würzeherstellung		Bierherstellung			Bierabfüllung	
SCHARBRODT	Bierherstellung			Bindeglied		Bierabfüllung	

Bild 3: Varianten für die Gliederung des Brauereibetriebs in der Literatur [30] [45] [48] [56] [63] [66]  
Die Schattierung im Hintergrund deutet die eher produktive (weiß) oder lagernde (grau) Funktion des Bereichs an.

## 2.2.2 Würzeherstellung

### 2.2.2.1 Überblick

Der Produktionsabschnitt „Würzebereitung“, der sich überwiegend in der Abteilung „Sudhaus“ abspielt, steht am Anfang und beinhaltet gleichzeitig den namensgebenden Schritt für den gesamten Brauprozess, da der Vorgang des „Brauens“ sinngemäß die Herstellung eines Getränks durch Kochen [21] bezeichnet. Obwohl der Gesamtprozess der Bierherstellung sich über mehrere Wochen erstreckt, kommt der Würzebereitung, die mit modernen Verfahren und Anlagen mit einer Durchlaufzeit von weniger als 8 Stunden bewältigt werden kann, diese dominante Position zu Recht zu. Schließlich konzentriert sich in diesem vergleichsweise kurzen Prozessabschnitt ein großer Teil der exogenen Aktivität innerhalb der Bierherstellung durch einen intensiven Anlagen- und Energieeinsatz, während sich die nachfolgende Gärung, Reifung und Lagerung weitgehend als endogener Vorgang darstellt, der zwar unter ständiger Beobachtung bzw. Kontrolle, aber deutlich „ereignisärmer“ und mit wenig direkter Einwirkung abläuft.

Die Würzeherstellung erfolgt im Chargenbetrieb, wobei für eine einzelne Würzecharge der Begriff „Sud“ verwendet wird. Die Würze kann pauschal als „Malzauszug“ bezeichnet werden, der als Nährlösung für die nachfolgende Fermentation mit speziellen Kulturhefen dient. Im Verlauf eines mehrstufigen Verfahrens (wichtigste Stufen: Schrotten, Maischen, Läutern, Kochen, Heißtrubabtrennen, Kühlen) müssen neben dem zentralen Parameter „Extrakt“, der ver-



einfachend als Kennzahl für die Substratkonzentration interpretiert werden kann, zahlreiche andere Qualitätsmerkmale der Würze eingestellt werden.

Einen Überblick über die Abläufe der Würzeherstellung geben Tabelle 2 und Bild 4. Weiterführende Informationen zum technologischen Hintergrund bieten z. B. KUNZE [30] und NARZISS [41], [42].

Tabelle 2: Überblick über die Würzeherstellung

Stufe	Zweck	Ergebnis	übliche Technik
<b>Schroten</b>	Zerkleinern von Malz bzw. Rohfrucht	Schrot	Verschiedene Mühlensysteme
<b>Maischen</b>	Mischen mit Wasser, Lösen des Extrakts, u. a. durch Steuern von Enzymaktivitäten über Temperatur und pH-Wert	Maische	Maischgefäße, teilweise mit Heizung und Rührwerk
<b>Läutern</b>	Abtrennen der Treber durch Kuchenfiltration, weitgehendes Auslaugen des Extrakts	Würze	Läuterbottich oder Maischefilter
<b>Kochen</b>	Verdampfen, Hopfengabe, Farb- und Aromabildung, Eiweiß-Gerbstoff-Fällung		Würzepfanne, div. Kochsysteme
<b>Heißstrub-abtrennen</b>	Heißstrub („Bruch“ aus der Eiweiß-Gerbstoff-Fällung bei der Kochung) entfernen		Whirlpool oder Separator
<b>Kühlen</b>	Abkühlen der Würze auf Gärtemperatur		Plattenkühler

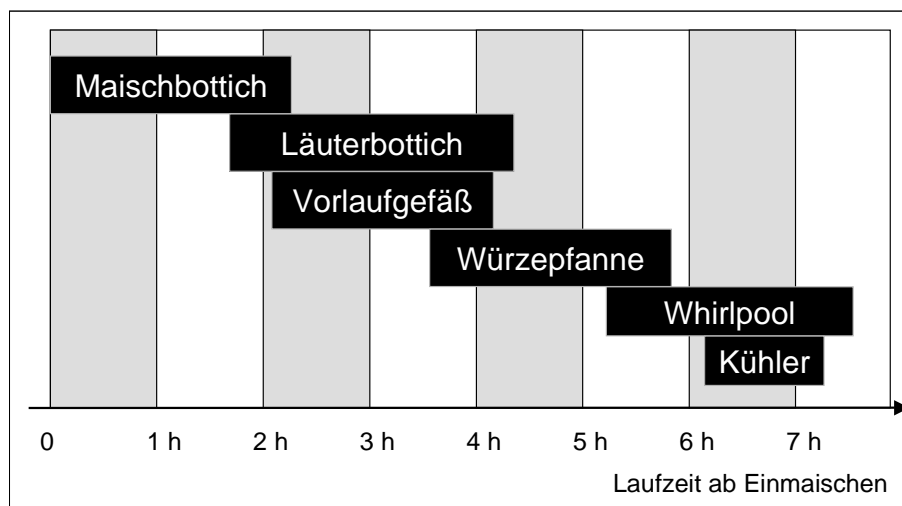


Bild 4: Beispiel für die Belegung der Teilanlagen eines Sudhauses bei der Würzeherstellung

### 2.2.2.2 Anlagentechnik

Für jeden Teilprozess der Würzeherstellung hat sich eine spezialisierte Anlagentechnik entwickelt, wobei teilweise die Funktionen für mehrere Teilprozesse technisch in einer einzigen Teilanlage zusammengefasst werden, die dann mehrfach in unterschiedlichen Stufen eingesetzt

wird. Gleichzeitig konkurrieren unterschiedliche Verfahren und technische Varianten für jede Stufe. Dadurch ergibt sich trotz der weitgehenden Allgemeingültigkeit der oben angegebenen Verfahrensstruktur eine große Anzahl an Gestaltungsvarianten für das Sudhaus. Einen komprimierten Überblick über technische Alternativen findet man bei SCHARBRODT [48] während VEY [66] aufzeigt, wie viele Sude pro Tag mit welchen Konstellationen produziert werden können.

Die Nebenanlagen im Sudhaus (Malzanlieferung, Hopfenanlieferung, biologische Säuerung, Reinigung, Treberwirtschaft [54]) sollen hier nicht behandelt werden, da sie für die Planung der Produktionsabläufe eine untergeordnete Rolle spielen.

Durch die Vielfalt der Kombinationen aus technologischen und technischen Alternativen können sich Sudhausanlagen hinsichtlich ihrer Topologie deutlich unterscheiden. Im einfachsten Fall liegt eine *mehrstufige Einstrang-Anlage* ([56]) vor, die von jedem Sud sequenziell durchlaufen wird. Diese Struktur wird häufig als „Sudstraße“ oder „Sudlinie“ bezeichnet, vor allem wenn mehrere solcher unabhängigen Einzelstränge zu einer *mehrstufigen Mehrstrang-Anlage* kombiniert werden. Sofern für einen Teilprozess mehrere redundante Apparate zur Verfügung stehen, aus denen unter Berücksichtigung ihrer Verfügbarkeit und bzw. oder nach einer bestimmten Regel (z. B. Rotationsprinzip) für jede Charge ein Ziel auszuwählen ist, spricht man von einer *Mehrstrang-Mehrweg-Anlage*. Dabei ist zu unterscheiden, ob der Weg der Charge, das *Routing*, a priori fixiert wird (z. B. im Steuerrezept) oder während des Durchlaufs der Charge eine dynamische Allokation erfolgt [56]. Beide Methoden werden in Sudhausanlagen angewendet.

Außerdem kommen v. a. in größeren Betrieben auch mehrere autark arbeitende Sudhäuser vor, die oft im Zuge einer schrittweisen Kapazitätserweiterung historisch gewachsen sind und daher ein sehr heterogenes Bild hinsichtlich Technik und Automatisierungsgrad bieten können.

### 2.2.2.3 Betriebsweise

Sudhausanlagen werden während einer Produktionswoche im Idealfall durchgängig betrieben, u. a. um verschiedene Stoff- und Energiekreisläufe möglichst gleichmäßig aufrechtzuerhalten. Aufeinanderfolgende Sude können aufgrund der stufenweisen Prozessführung „überlappend“ gestartet werden, sofern der störungsfreie Durchlauf der Chargen gewährleistet oder zumindest innerhalb gewisser Toleranzen zu erwarten ist.

Im Einprodukt-Betrieb auf einer einsträngigen Anlage ist dies der Fall, wenn für jede Prozessstufe mindestens eine dedizierte Teilanlage bereitsteht und die Zykluszeit, also der Abstand zwischen zwei Suden, nicht geringer gewählt wird als die Belegungszeit der am höchsten ausgelasteten Teilanlage.

Unabhängig von der vorliegenden Konfiguration werden Sudhausanlagen fast immer als Mehrprodukt-Anlagen betrieben. Kategorien von Unterschieden zwischen Rezepten verschiedener

Sorten sind in Tabelle 3 geordnet nach aufsteigender Relevanz für die resultierenden Produktionsabläufe angegeben.

Tabelle 3: Kategorien von Unterschieden zwischen Sudrezepten

Unterscheidungsmerkmal	Beispiel (Variante 1 / 2)	Relevanz für Ablauf
<b>Einsatzstoffe</b>	Hopfen: Sorte A / Sorte B	nicht relevant
<b>allgemeine Parameter</b>	Einmaischtemperatur: 58 °C / 63 °C	ggf. Heizzeit
<b>Zeitparameter</b>	Verzuckerungsrast: 10 min / 20 min	Apparatebelegung
<b>Verfahrensstruktur</b>	Maischverfahren: Dekoktion / Infusion	Apparatebedarf

Im Mehrproduktbetrieb, bei dem die Belegungsdauer jeder Stufe für jedes Produkt individuell ausfallen kann, müssen die limitierende Stufe und der resultierende minimale Abstand zwischen den Startzeitpunkten zweier Sude zumindest theoretisch für jede denkbare Kombination aus Vorgänger- und Nachfolgerprodukt unter Beachtung der Reihenfolge ermittelt werden. Dabei kann für jede Kombination eine andere Stufe limitierend wirken. In der Praxis wird häufig ein gleichmäßiger Zyklus angestrebt, besonders wenn sich der planmäßige Rezeptablauf der verschiedenen Sorten nur geringfügig unterscheidet.

Der erforderliche Mindestabstand zwischen zwei Suden kann ausgehend von einer bestehenden Konfiguration abgesehen von Änderungen an Prozesszeiten durch zwei Maßnahmen reduziert werden: Einerseits kann man eine zusätzliche redundante Teilanlage für die limitierende Stufe installieren. Der Effekt dieser Maßnahme ist dabei umso größer, je weniger redundante Teilanlagen in dieser Stufe bereits betrieben werden. Andererseits kann es möglich sein, den limitierenden Teilprozess weiter zu untergliedern, also eine zusätzliche Stufe und Teilanlage einzuführen. Diesem Ansatz entspricht der Einsatz eines sogenannten Vorlaufgefäßes, das als Puffertank zwischen Läutersystem und Kochsystem eingesetzt wird, damit das Kochsystem nicht schon während des zeitaufwendigen Läuterprozesses belegt werden muss. Eine weitere Entlastung des Kochsystems ist erreichbar, wenn das Aufheizen zur Kochtemperatur nicht erst im Kochsystem, sondern ganz oder teilweise bereits im Vorlaufgefäß oder während des Transfers zum Kochsystem durch einen Läuterwürze-Erhitzer (LWE) übernommen wird. Ähnlich ist auch das Abspalten des Einmischens aus der Stufe „Maischen“ auf vorgelagerte Einrichtungen zu sehen.

Wird eine Teilanlage im Durchlauf einer Charge in unterschiedlichen Funktionen bzw. Prozessstufen mehrfach genutzt (vgl. 2.2.2.2, S. 13), kann die minimale Zykluszeit erheblich höher ausfallen. Entsprechend findet man solche Sudhauskonzepte eher bei niedriger Ausstoßkapazität aber auch in vernetzten Großanlagen mit redundant besetzten Stufen, z. B. wenn mehrere Maischbottichpfannen vorhanden sind, die nach Bedarf als Bottich oder Pfanne genutzt werden.

Bei Mehrproduktbetrieb muss die Planung für eine Sudwoche nicht nur die für die Belegung der Teilanlagen des Sudhauses relevanten Zeitabläufe, sondern auch die Reihenfolge der an die

nachfolgende Fermentationsabteilung abgegebenen Sude berücksichtigen. Diese sollte so gewählt werden, dass die Gärtanks, die meist mehrere Sude derselben Sorte aufnehmen können, möglichst rasch gefüllt werden. Bei geeigneter zeitlicher Staffelung können dabei ggf. auch mehrere Sudlinien denselben Zieltank beschicken.

Reinigungs- und Instandhaltungsmaßnahmen sind im Sudhaus mit unterschiedlicher Periodizität und Intensität einzuplanen:

- Im zyklischen Dauerbetrieb während der Sudwoche ist zwischen zwei aufeinanderfolgenden Belegungen für viele Teilanlagen nur eine kurze *Zwischenspülung* üblich.
- Eine als *Zwischenreinigung* bezeichnete Unterbrechung der Sudfolge wird bei Bedarf etwa in der Mitte der Sudwoche eingetaktet, insbesondere um die produktseitigen Oberflächen von Heiz- bzw. Kochsystemen von Belägen zu befreien, die den Wärmeübergang behindern und so die Heizzeiten erheblich verlängern können.
- Eine umfassende *Grundreinigung* und Wartung, für die pauschal etwa ein halber Tag einzuplanen ist [57], findet nach Abschluss jeder Sudwoche statt.
- Umfangreichere Instandhaltungsmaßnahmen, Erweiterungen und Umbauten erfolgen am Wochenende oder während einer *Sudpause*, die mehrere Tage oder sogar Wochen dauern kann und daher bevorzugt während der Nebensaison eingeplant wird.

#### 2.2.2.4 Kapazität

Entscheidende Zielgröße für die Produktionsleistung ist die Würzmenge, die pro Woche für die Fermentation bereitzustellen ist. Diese kann durch drei Faktoren wesentlich beeinflusst werden:

- Die *Anzahl der Produktionstage pro Woche* stellt eine rein organisatorische Stellgröße dar, soweit keine Einschränkungen hinsichtlich der Betriebserlaubnis bestehen und die verbleibende Zeit für die wöchentliche Reinigung und Wartung ausreicht. Ob oder inwieweit ein Betrieb am Wochenende wirtschaftlich sinnvoll ist, hängt vom Gewicht der damit verbundenen Mehrkosten im Personalbereich ab. UNTERSTEIN [57] gibt für die Wochenarbeitszeit eine Spanne von 4 bis 7 Produktionstagen an.
- Die *Anzahl der innerhalb einer Sudwoche produzierbaren Sude* wird durch die Sudfolge bestimmt, die von der Rezeptgestaltung (Gesamtdurchlaufzeit und Belegungszeit je Stufe), der Anlagentechnik (Redundanz je Stufe, Leistungsdaten), der Reihenfolge der Sorten im Mehrproduktbetrieb und der ggf. notwendigen Zwischenreinigung abhängt.
- Die *Größe eines einzelnen Sudes*, die in gewissen Grenzen individuell je Sorte bestimmt sein kann, ist eng mit der Auslegung der verschiedenen Teilanlagen verknüpft, da deren Gefäße meist eine gesamte Charge aufnehmen müssen. Da der Rauminhalt einer Charge sich im Prozess der Würzproduktion durch Stoffzufuhr, Verdampfung und Temperaturschwan-

kungen ständig verändert, muss dabei die Bezugsgröße für Volumenangaben genau beachtet werden. Als Schnittstellenparameter zur nachfolgenden Fermentation ist vor allem die Angabe einer *Kaltwürzmenge je Sud* interessant. Weil die wöchentliche Würzmenge je Sorte in der Regel die primäre Vorgabe für die Dimensionierung eines Sudhauses darstellt, beeinflusst die Sudgröße auch die Anzahl und Frequenz der zu produzierenden Sude, was sich auch auf die Gestaltung der Dampferzeugungs- und Kälteanlagen bzw. des Energiekonzepts auswirkt [57].

Während die Sudgröße weitgehend durch die Dimensionierung der Apparate bestimmt wird und daher für die gesamte Nutzungsdauer der Anlage weitgehend konstant gilt, sind Änderungen am Rezeptablauf jederzeit möglich. Beispielsweise kann ein Maischverfahren durch die Zugabe von Enzymen oder eine veränderte Temperaturführung unter Umständen erheblich verkürzt werden. Die einfachste Möglichkeit zur Regulation der Produktionskapazität ohne Eingriffe in Technik oder Technologie stellt allerdings das Verkürzen oder Verlängern der Sudwoche dar.

Einen Sonderweg zur Steigerung der Produktivität eines Sudhauses bei gleich bleibendem Produktionsvolumen bietet das Brauen mit hoher Stammwürze (engl.: *high-gravity-brewing*). Dabei wird nicht die Menge der produzierten Ausschlagwürze sondern deren Konzentration erhöht. In späteren Verfahrensabschnitten (meist erst kurz vor der Abfüllung) erfolgt dann eine gezielte Verdünnung bis zur gewünschten Konzentration für das „Verkaufsbier“.

Insgesamt kann die Produktionskapazität einer Sudhausanlage von zahlreichen technischen, technologischen und organisatorischen Entscheidungsvariablen limitiert werden [35] [45] [48] [62] [66], sodass eine detaillierte Bewertung nur anhand von Belegungsdiagrammen [45] möglich ist. VEY [66] erwähnt in diesem Zusammenhang die Simulation als Möglichkeit zur „optimalen Sudhauskonfiguration“ und verweist dabei auf den technologisch orientierten Ansatz von MIGNON [39].

### 2.2.3 Fermentation

Der Begriff „Fermentation“ soll in dieser Arbeit als Oberbegriff für die gesamte Prozessstufe der produktiven Tanklagerung zur Umwandlung von Würze in Bier bezeichnen, während der sich die Teilprozesse Hauptgärung, Nachgärung, Reifung und Lagerung teilweise überlagern.

NARZISS [41] gebraucht den Begriff „Gärung“ in ähnlicher Funktion, verwendet ihn aber gelegentlich auch in Bezug auf die Hauptgärung.

#### 2.2.3.1 Überblick

Nachdem mit der Würze aus den wichtigsten Rohstoffen der Bierherstellung (Wasser, Malz und Hopfen) eine komplexe Nährlösung hergestellt worden ist, wird diese im zentralen Verfahrensabschnitt der Bierherstellung unter Einsatz von Kulturhefe einem Fermentationsprozess unterzogen. Das wesentliche Ziel ist dabei die Vergärung der in der Würze enthaltenen Zucker zu

Ethanol und Kohlendioxid [30], wobei zahlreiche Nebenprodukte gebildet und teilweise wieder abgebaut werden, deren Spektrum für das fertige Produkt qualitätsbestimmend ist. Dabei verändern sich weitere Eigenschaften der Charge, wie der pH-Wert, das Redox-Potenzial, die Farbe sowie der Eiweiß-, Bitter- und Gerbstoffgehalt [30]. Durch den Stoffwechsel der gärenden Hefe wird mit der *Gärungswärme* außerdem eine erhebliche Energiemenge freigesetzt [30], sodass ein technologisch erwünschtes Temperaturprofil während der Gärung allein durch gezieltes Kühlen darstellbar ist.

Die Begriffe „Gären“, „Reifen“, „Lagern“ und daraus abgeleitete Bezeichnungen sind nicht scharf gegeneinander abzugrenzen [30] und werden auch in der Fachliteratur uneinheitlich bzw. mit unterschiedlicher Bedeutung gebraucht. Unterschiedliche Anwendungen sollen hier gegenübergestellt werden, um Missverständnissen vorzubeugen und für die Unterschiede im Gebrauch zu sensibilisieren.

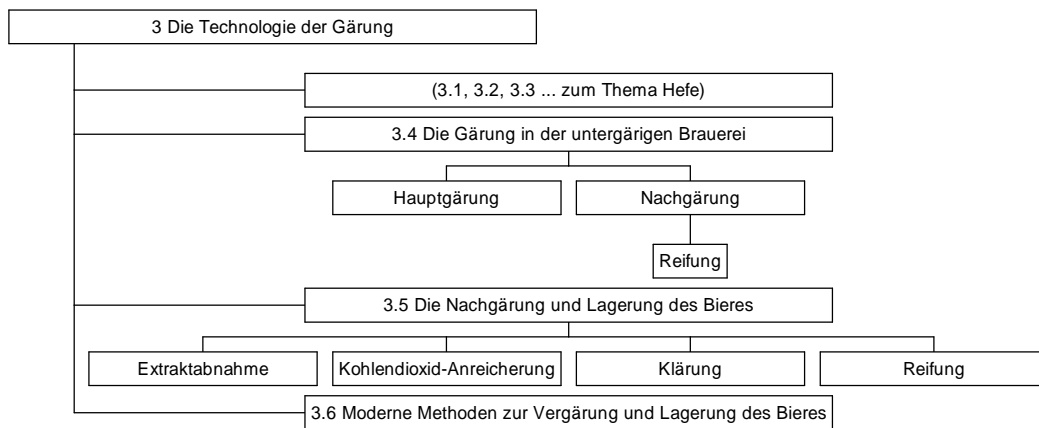


Bild 5: Gliederung des Kapitels zur Fermentation bei NARZISS [41]

NARZISS [41] verwendet in seinem Standardwerk den Begriff „Gärung“ gleichrangig mit „Würzherstellung“ und „Filtration“ als Kapitelüberschrift. Wie in Bild 5 gezeigt, differenziert er innerhalb der „Gärung in der untergärigen Brauerei“ (Abschnitt 3.4) die Stufen „Hauptgärung“ und „Nachgärung“ und erörtert in Verbindung mit der Nachgärung „Methoden zur Beschleunigung der Reifung des Bieres“ [41]. Eine Definition für die Reifung als „Abrundung und Veredelung des Geschmacks, eine Verbesserung des Geruchs sowie eine Hebung der Bekömmlichkeit“ ist später (Abschnitt 3.5) zu finden, wo sie in einer Reihe mit anderen Vorgängen während der Nachgärung abgehandelt wird [41].

Unter den „Modernen Methoden zur Vergärung und Lagerung des Bieres“ (Abschnitt 3.6) werden dann wiederum verschiedene „Verfahren zur beschleunigten Gärung und Reifung des Bieres“ beschrieben, wobei in Verbindung mit der Reifung häufig ausdrücklich auf eine „Kaltlagerphase“ hingewiesen wird. Als Möglichkeit wird dabei auch das sogenannte „Dreitankverfahren“ genannt, bei dem zum Gären, Reifen und Lagern jeweils ein eigener Tank verwendet wird.

Im Gegensatz dazu nennt KUNZE [30] die Schritte „Gären, Reifen und Filtrieren“ im Untertitel des Kapitels „Herstellen des Bieres“, das in einer Reihe mit dem „Herstellen der Würze“ (vgl. Bild 3, S. 12) und dem „Abfüllen des Bieres“ steht. Allerdings plädiert er dafür, Gärung und Reifung als zusammenhängenden Prozess zu betrachten. Der in Bild 6 wiedergegebene Ausschnitt aus seiner Gliederung zeigt, dass hier der Begriff „Reifung“ in der Bedeutung der „Nachgärung“ bei Narziß verwendet wird, nach dem die „Kohlendioxid-Sättigung“ und das „Klären“ der Reifung nicht gleich- sondern untergeordnet werden.

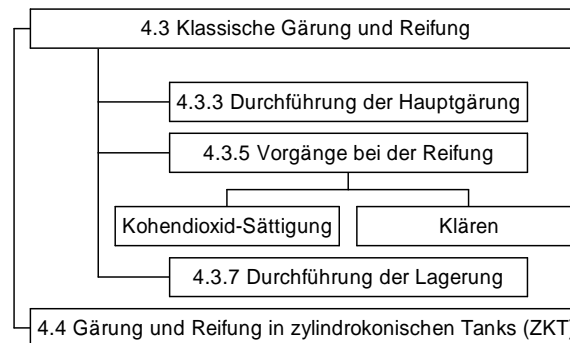


Bild 6: Gliederung des Kapitels zur Fermentation bei KUNZE [30]

Abschließend sei noch auf die entsprechenden Erläuterungen bei HEYSE [22] hingewiesen, wo die wesentlichen Funktionen von (Haupt-)Gärung, Reifung und Lagerung wie in Tabelle 4 sinngemäß wiedergegeben unterschieden werden.

Tabelle 4: Hauptfunktion der Abschnitte der Fermentation

Abschnitt	Hauptfunktion
<b>Gärung</b>	vergärbare Zucker → Alkohol + CO <sub>2</sub> , pH-Sturz, Gärungsnebenprodukte
<b>Reifung</b>	wichtigste Leitsubstanz Diacetyl soll weitgehend abgebaut werden
<b>Lagerung</b>	Kaltlagerphase zur Verbesserung der chemisch-physikalischen Stabilität

Alle Autoren verwenden einheitlich die Verbindung von „Gärung und Reifung“ bei der exemplarischen Definition verschiedener Verfahren, die allerdings jeweils auch eine mehr oder weniger ausgeprägte Kaltlagerphase einschließen. Unterschiede zwischen solchen Verfahren, die bei der Produktion der gängigen untergärigen Biere in der Regel etwa 20 Tagen dauern<sup>1</sup>, bestehen z. B. hinsichtlich der Temperaturführung, dem einstellbaren Überdruck, der Entnahme von sedimentierter Hefe, dem Zugeben von vergärbarem Jungbier während des Prozesses (*Aufkräusen*) und der Anzahl der eingesetzten Tanks (Ein-, Zwei-, Dreitankverfahren). Der Gärverlauf hängt darüber hinaus auch mit der Zusammensetzung der Würze, der Beschaffenheit und Menge der zuge-

<sup>1)</sup> UNTERSTEIN [62] gibt für unterschiedliche Sorten eine Spannweite von 2 bis 7 Wochen an

setzten Hefe, der Temperaturschichtung bzw. den Konvektionsströmungen im Tank und der Behältergeometrie zusammen. Auch die Kühltechnik (Mantelkühlung im Tank oder Umlaufkühlung über externen Plattenkühler) wirkt sich auf den Prozess aus.

Bis zum Ende der Kaltlagerphase sollte das Bier einen definierten Kohlendioxidgehalt, den angestrebten Endvergärungsgrad und das gewünschte Profil an Gärungsnebenprodukten erreicht haben und damit zur Filtration zur Verfügung stehen.

Der Produktion obergäriger Biere (in Deutschland z. B. Altbier, Kölsch, Weißbier) widmet NARZISS [41] ein eigenes Kapitel. Der namensgebende Unterschied zur Untergärung geht auf genetisch bedingte Eigenheiten der eingesetzten Hefen zurück, die während der Obergärung im Gefäß aufsteigen statt zu sedimentieren. Weitere Unterschiede zwischen Unter- und Obergärung sollen hier nur im direkten Bezug zu ihrer Relevanz erläutert werden.

### 2.2.3.2 Anlagentechnik

Die Technik im Bereich der Fermentation hat sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts deutlich verändert. Während die Hauptgärung früher in offenen und später auch geschlossenen Bottichen geführt wurde, werden heute überwiegend zylindrokonische Tanks (ZKTs) eingesetzt, deren Hauptvorteile in der flexibleren Prozessführung (Temperatur- und Druckregelung, Hefentnahme im Konus), der höheren Betriebssicherheit (Kohlendioxid, Hygiene) und der realisierbaren Baugröße (Großtanks über 10.000 hl Inhalt) zu sehen sind. ZKTs aus Edelstahl verdrängen dabei zumindest in Großbetrieben zunehmend die anderen Bauformen (liegende und stehende Tanks aus verschiedenen Metallen, Outdoor-Tanks, usw.). Sie werden in Eintankverfahren oder Zweitankverfahren eingesetzt, wobei ggf. zwischen Gärtanks (ZKGs) und Lagertanks (ZKLs) unterschieden wird [30]. Je nach Verwendungszweck und Verfahren können ZKTs unterschiedlich ausgestattet und gestaltet sein [30]. Manche Betriebe verwenden dagegen einen einheitlichen Tanktyp, um jeden Tank je nach Bedarf für alle Funktionen einsetzen zu können [28]. Dabei ist zu beachten, dass der Nutzinhalt eines Tanks mit gegebenem Bruttovolumen wesentlich vom sogenannten Steigraumbedarf bestimmt wird, der für unterschiedliche Biertypen (obergärig, untergärig) und Verfahrensabschnitte (Hauptgärung, Reifung und Lagerung) unterschiedlich ausfällt. Derselbe Tank kann z. B. als Lagertank für die Untergärung deutlich höher befüllt werden, als für eine obergärige Hauptgärung. KUNZE [30] gibt für den Steigraumbedarf Werte zwischen 5 und 50 % des Bruttovolumens an. NARZISS [41] weist auf die Möglichkeit hin, den hohen Steigraumbedarf bei der Gärung durch *Antischaummittel* zu reduzieren. Das Nutzvolumen eines Gärtanks sollte nach unterschiedlichen Empfehlungen so gewählt werden, dass dieser innerhalb eines halben Tags gefüllt werden kann. Nach Vey [66] sollte für das Fassungsvermögen eines Tanks ein ganzzahliges Vielfaches der Sudgröße gewählt werden. Dies setzt allerdings voraus, dass für jeden Tank oder Tanktyp die Sudgröße und der Steigraumbedarf für alle Sorten einheitlich angenommen werden können.



Neben dem Nutzvolumen interessieren auch die Abmessungen eines Tanks (Durchmesser und Höhe) und deren Proportion. Beispielsweise impliziert der Einsatz einer Mantelkühlung Grenzen für den Tankdurchmesser, während aus technologischer Sicht für die Würzhöhe bei der Gärung Obergrenzen von 12 bis 15 Metern empfohlen werden [41] [49] [61]. Außerdem werden verschiedentlich Grenzwerte für das Verhältnis von Durchmesser zu Volumen angegeben, die sich jeweils auf die Gesamtflüssigkeitshöhe (Zylinder und Konus) oder die Flüssigkeitshöhe im Zylinder beziehen [41] [61]. Da sich die Geometrie auf die Planung und Simulation der Betriebsabläufe nicht direkt auswirkt, soll dieses kontroverse Thema hier nicht vertieft werden. In der Praxis tendieren die Betriebe aus Kostengründen zu möglichst großen und hohen Tanks, auch wenn diese längere Manipulationszeiten [62] (Befüllen, Leeren, Reinigen), eine höhere Kälteleistungsspitze [61] oder unter Umständen auch längere Abkühlzeiten [36] bedingen.

Die bauliche Gestaltung der Tanklager (freistehend, eingehaust, usw.) beeinflusst den Betriebsablauf allenfalls indirekt über die Kältetechnik. Für die Gestaltung der Transferwege von und zu Tanks mit Rohrleitungen, Schläuchen, Paneelen, Pumpen, Ventilen, usw. bestehen zwar vielfältige Variationsmöglichkeiten, die auch unmittelbar komplexe Restriktionen für die Ablaufplanung implizieren können. Diese sind jedoch als „Verkehrsregeln“ bevorzugt abstrakt zu behandeln, so dass technische Details hier nicht relevant sind.

### 2.2.3.3 Betriebsweise einzelner Tanks

In den Abteilungen der Fermentation durchlaufen die einzelnen Tanks einen definierten Belegungszyklus, der in Bild 7 idealisiert dargestellt ist. Als Grundzustand eines Tanks soll hier der Zustand „Frei“ betrachtet werden, in dem der Tank leer, gereinigt und für die Aufnahme von Material bereit (also gerüstet) ist. Ausgehend von diesem Grundzustand kann ein Gärtank eine oder mehrere Chargen aufnehmen. Nachdem in größeren Betrieben in der Regel auf eine Zwischenstufe zum Abscheiden von Kühltrub aus der Kaltwürze verzichtet wird [30], treffen die einzelnen Sude in einem Gärtank in der zeitlichen Abfolge ein, in der sie im Sudhaus produziert werden. Da die Hefe meist bereits im Würzeweg zudosiert wird, beginnt der Gärprozess prinzipiell schon beim Eintreffen der ersten Charge. Mit jedem neuen Sud wird also einer bereits gärenden Tankcharge neue Würze zugeführt, was als *Drauflassen* bezeichnet wird [30]. Das Befüllen sollte insgesamt zügig erfolgen, da die einsetzende Gärtätigkeit durch Turbulenzen ungünstig beeinflusst werden kann [41] und Inhomogenitäten vermieden werden sollen [30].

Der dargestellte Schritt „Prozess“ kann sich je nach Verfahren (Ein-, Zwei-, Dreitankverfahren) auf die gesamte Fermentation oder auf einen von mehreren Verfahrensabschnitten aus dem fließenden Übergang von (Haupt-)Gärung, Reifung und Lagerung beziehen. Wann der definierte Endzustand für einen (Teil-)Prozess erreicht ist, hängt vom Prozessverlauf ab, der nicht exakt deterministisch bestimmt ist, so dass Abweichungen in der Größenordnung von Tagen nicht auszuschließen sind. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit bei der Prozessführung vom Standardverfahren abzuweichen (z. B. durch höhere Temperaturen), um den Prozessverlauf zu beein-

flussen, allerdings kann dies mit Risiken oder Einbußen hinsichtlich der Produktqualität verbunden sein.

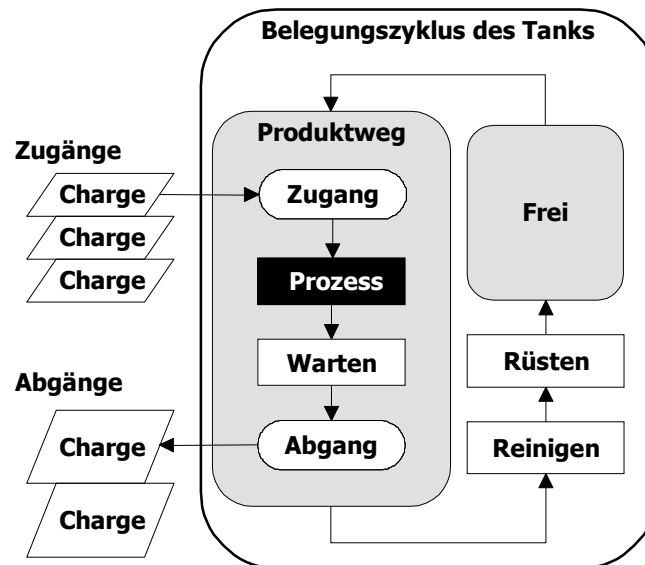


Bild 7: Belegungszyklus eines Fermentationstanks

Der im Bild dargestellte Schritt „Warten“ deutet eine gewisse Dispositionsmöglichkeit nach dem eigentlichen Prozessschritt an. Bei Mehrtankverfahren muss eine Charge dabei allerdings als labiles Zwischenprodukt betrachtet werden, bis die für alle Verfahren einheitliche Kaltlagerphase [30] erreicht wird. Verzögerungen beim Transfer zur nachfolgenden Stufe, der für den Übergang vom Gärtank zum Lagertank im Zweitankverfahren auch als „Schlauchen“ bezeichnet wird, können technologisch problematisch sein, besonders wenn mit Restextrakt für die Nachgärung im Lagertank geschlaucht werden soll [41].

Für die Wartezeit nach der abschließenden Lagerung bestehen größere Spielräume, die zur Disposition (Aufbauen von Beständen, Ausgleichen von Lastschwankungen) genutzt werden können. Allerdings warnt NARZISS [41] vor möglichen Qualitätsmängeln durch eine verkürzte Lagerzeit im Grenzlastbereich oder ein „wesentliches Überschreiten der optimalen Lagerzeit, z. B. bei starkem Ausstoßrückgang oder falscher Disposition“ [41]. Während früher Lagerzeiten von 1 bis 6 Monaten üblich waren [41], sehen moderne Verfahren nur noch 1 Woche Kaltlagerung vor [30], sodass in der Regel einiges Potenzial für die Disposition im Lagerkeller besteht, soweit die Lagerkapazität dies zulässt.

Wie in Bild 7 angedeutet verteilt sich unter Umständen auch der Abgang aus einem Fermentationstank auf mehrere Chargen. Innerhalb von Mehrtankverfahren wird dabei häufig der Inhalt eines Vorgängers auf mehrere Nachfolger verteilt, was als *Verschneiden* bezeichnet wird [30]. Dabei ist zu unterscheiden, ob zwei (oder ggf. mehrere) Zieltanks parallel befüllt werden oder Teilmengen nacheinander auf verschiedene Zieltanks verteilt werden. Dabei kommen auch

Mischformen vor, wenn zeitversetzt und damit nur zeitweise parallel in mehrere Tanks umgepumpt wird. Das Mischen mehrerer Teilchargen aus unterschiedlichen Gärtanks in einem Lagertank wird auch als *Draufschlauchen* bezeichnet. Durch das Verschneiden von Tankchargen derselben Sorte soll eine gleichmäßigere Bierqualität erreicht werden [30] [41]. Es können aber auch Biere mit unterschiedlichem Stammwürzegehalt gemischt werden, um einen bestimmten Zwischenwert darzustellen [30]. Außerdem bezieht die Filtration oft Bier von mehreren (Lager-) Tanks gleichzeitig oder zeitversetzt über einen *Verschneidbock*, der den Übergang zwischen Quell tanks ohne Druckstöße ermöglicht [30] [41]. Anders als bei der Würzeproduktion bleibt die Integrität einer Charge bei der Fermentation also nicht grundsätzlich durchgängig erhalten. Vielmehr werden unter Umständen mehrfach Teilchargen abgespalten und zu neuen Chargen vereinigt, was ggf. auch in einer entsprechend detaillierten Produktionsplanung besonders zu berücksichtigen ist [48].

ZKTs werden über fest installierte Einrichtungen (Sprühköpfe, Zielstrahlreiniger [22]) nach dem CIP-Verfahren gereinigt und ggf. desinfiziert, wobei unterschiedliche Reinigungsmedien (Lauge, Säure, Desinfektionsmittel, Spülwasser) in einer zentralen Station vorgehalten und über sogenannte Kreisläufe bereitgestellt werden [30]. Die Verfügbarkeit solcher Kreisläufe bestimmt, wie viele Tanks gleichzeitig gereinigt werden können. Ein leergezogener Tank kann also unter Umständen nicht sofort gereinigt und wieder neu belegt werden.

#### **2.2.3.4 Kapazität von Tanklagern für die Fermentation**

Da Fermentationstanks in der Regel über mehrere Tage oder Wochen mit derselben Tankcharge belegt bleiben, müssen ausreichend viele redundante Tanks bereitstehen, um die laufende Würzeproduktion während dieser Zeit aufzunehmen. Dabei kann man Tanks, die demselben Aufgabenbereich zugeordnet sind, als „Tanklager“ bezeichnen. Meist sind die Tanks eines Lagers räumlich gruppiert, wobei moderne zylindrokonische Tanks gleicher oder ähnlicher Größe häufig als rechteckige Matrix angeordnet werden.

Ein Tanklager stellt als Bestandteil einer seriellen Anordnung von Produktionsstufen grundsätzlich einen Puffer dar, der durch seine Speicherkapazität zwischen Zugängen und Abgängen von Material vermittelt. Zwischen Zugängen und Abgängen besteht dabei keine strenge logische oder zeitliche Kopplung. Dies führt zu einer dynamischen Entwicklung des Lagerbestands, der durch die Extremzustände "Lager leer" und "Lager voll" in seinem Spielraum begrenzt ist. Innerhalb einer seriellen Anordnung von Produktionsstufen resultiert aus dem Zustand "Lager leer" ein Mangel für die Nachfolgeabteilung, während der Zustand "Lager voll" eine Blockade der Vorgängerabteilung zur Folge hat.

Durch die Doppelfunktion der Tanklager für die Fermentation als Produktivlager (vgl. Abschnitt 2.1.2.4, S. 8) stehen Chargen, die als Zugang in einen Tank bzw. ein Tanklager gelangen, erst für die Entnahme zur Verfügung, wenn sie nach einer gewissen Prozessdauer freigegeben werden.

Interpretiert man das Tanklager gemäß seines Grundverhaltens als Puffer, so entspricht dieser Effekt einer Totzeit, durch die Materialzugänge erst verzögert am Ausgang verfügbar werden, wie Bild 8 verdeutlicht.

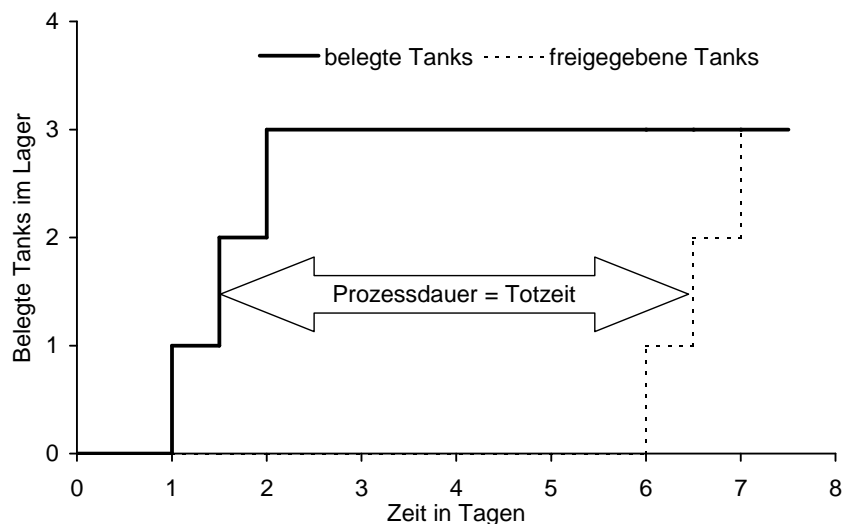


Bild 8: Betrieb eines Tanklagers als Produktivlager

Ein ähnliches Verhalten zeigt ein staufähiger Durchlaufpuffer, in dem Stückgut zunächst transportiert und anschließend in einer „Warteschlange“ am Ausgang des Puffers gespeichert wird. Für eine gegebene Förderstrecke kann dabei unter der Annahme einer definierten konstanten Transportgeschwindigkeit die Totzeit berechnet und bei der Auslegung des Puffers berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu unterliegt die Prozessdauer und damit die Totzeit eines Tanklagers im Brauereibereich bedingt durch die nur eingeschränkt steuerbaren biotechnologischen Prozesse einer gewissen stochastischen Schwankung [48]. Für die Kapazitätsplanung wird daher oft von einem vergleichsweise ungünstigen Prozessverlauf ausgegangen, um sich gegen mögliche Blockaden oder Mangelzustände durch großzügigere Auslegung abzusichern.

Die Zugänge zur Fermentationsabteilung ergeben sich aus dem Sudplan, der daher so auf die technischen und organisatorischen Gegebenheiten im Gärkeller abgestimmt sein sollte, dass Gär tanks bzw. für die Gärung verwendete ZKTs unter Berücksichtigung des sortenspezifischen Steigraumbedarfs möglichst rasch und möglichst vollständig gefüllt werden (vgl. S. 16). Falls Tanks von unterschiedlicher Größe mit unterschiedlicher Ausstattung vorhanden sind, setzt die Koordination mit dem Sudhaus voraus, dass bereits beim Erstellen des Sudplans definiert wird, welche Tanks bzw. Tanktypen genutzt werden.

Die Abgänge aus der Fermentationsabteilung werden wesentlich durch die Arbeitsweise der Filtration bestimmt, die über einen eigenen Schichtplan und eine eigene Auftragsverwaltung verfügt. Das Überangebot an Tankkapazität für die Lagerung bestimmt den Dispositionsspielraum für die Filtration und damit auch den Grad der Entkopplung zwischen dem Sudplan, der die

Tankbelegung weitgehend diktiert, und dem Abfüllplan, an dem sich der Filterplan relativ eng orientieren muss.

Zwischen Zugang und Abgang ist mindestens die erwartete Prozessdauer als Totzeit anzusetzen, darüber hinaus wird häufig eine sogenannte *Manipulationszeit* bzw. ein *Manipulationsraum* angegeben, der neben einer Dispositionsreserve auch das Befüllen, Entleeren und Reinigen abdeckt [45] [66]. Die Summe aus Prozessdauer und Manipulationszeit ergibt die Gesamtbelegungszeit, für die VEY [66] einige Richtwerte angibt.

In Zusammenhang mit den Zugangs- und Abgangsmengen muss bei der Planung von Tankkapazitäten für den Mehrproduktbetrieb auch die Sortenstruktur, also die Verteilung der Mengen auf verschiedene Sorten, und die individuelle Belegungszeit berücksichtigt werden. Unterschiedliche Sorten dürfen zumindest während der Fermentation normalerweise nicht vermischt werden, können Unterschiede in der Prozessdauer oder im Steigraumbedarf aufweisen und sind möglicherweise innerhalb eines Tanklagers speziellen Gruppen von Tanks zuzuordnen. Sortenvielfalt schafft in der Regel zusätzliche Restriktionen für den Betrieb eines Tanklagers, was häufig durch das Bereitstellen von zusätzlicher Kapazität ausgeglichen werden muss [63]. Falls ein Zweitankverfahren angewendet wird, ist zu unterscheiden, ob spezialisierte ZKGs und ZKLs verwendet werden oder ein gemeinsamer Pool von ZKTs besteht, die für beide Aufgaben geeignet sind [28].

Wegen des engen Zusammenhangs zwischen der Sortenstruktur und der Anzahl und Größe der benötigten Tanks sieht VEY [66] von einer „automatisierten Auslegungsroutine“ für die Tanklagerkonfiguration ab. Er schlägt weiter vor, maximal zwei unterschiedliche Tankgrößen einzusetzen, denen das Sortiment nach Hauptsorten und Randsorten getrennt zugeordnet wird.

Soweit eine einheitliche Sortenstruktur vorliegt oder die unterschiedlichen Sorten gruppiert und diesen Gruppen bestimmte Tankkapazitäten zugeordnet werden sollen, kann der benötigte *Bruttotankraum* berechnet werden [66]. Komplexere Fälle erfordern eine detaillierte Planung, z. B. anhand von Arbeitstaktdiagrammen [45] [58] [59], in denen die Tankbelegung beim Gären und Reifen für konkrete Planszenarien grafisch ausgewertet dargestellt wird. Dabei können ggf. auch Restriktionen hinsichtlich der Transporteinrichtungen (Leitungen, Pumpen) berücksichtigt werden. Durch solche Diagramme kann man auch den Kältebedarf und den Kohlendioxidanfall während der Fermentation ermitteln, um die entsprechenden Nebenanlagen zu dimensionieren [58] [60].

## 2.2.4 Filtration

### 2.2.4.1 Überblick

Auch wenn Bier lange unfiltriert getrunken wurde [22] und für bestimmte Biertypen, wie „Hefeweizen“ oder „Kellerbiere“ eine definierte Trübung erwünscht ist, besteht für die meisten Biere

ein hoher Anspruch an Klarheit und Glanz, der durch die „natürliche“ Klärung während der Reifung und Lagerung nicht erreicht wird [41]. Daher erfolgt für die meisten Biere möglichst kurz vor der Abfüllung eine Filtration, die nicht nur akute Trübungen sondern auch potenzielle „Trübungsbildner“ abtrennt, was die Haltbarkeit erhöht [30] [66]. Die Filtration verbessert also nicht nur das Aussehen und den Geschmack, sondern vor allem auch die chemisch-physikalische und mikrobiologische Stabilität des Biers [41] [48] [54]. Die klärende und stabilisierende Wirkung kann auch durch vielfältige Filterhilfsmittel unterstützt werden [22].

Da die Filtration unabhängig von der verwendeten Technik im Durchfluss betrieben wird und die Filteranlagen kein nennenswertes eigenes Speichervolumen aufweisen, wird für das Filtrat ein unmittelbarer Abnehmer benötigt. Das Filtrat könnte zwar theoretisch direkt abgefüllt werden, in der Praxis muss aber mindestens ein Puffertank zwischengeschaltet sein [41] [63]. Üblich ist das „Zwischenstapeln“ von filtriertem Bier in sogenannten Drucktanks, durch die der Betrieb der Abfüllung von der Filtration entkoppelt und damit eine asynchrone Arbeitsweise ermöglicht wird [41] [45] [48] [63] [66]. Im Unterschied zu reinen Puffertanks, die prinzipiell nur Druckstöße und kurzfristige Leistungsdifferenzen abfangen, sollen die Drucktanks bzw. das Drucktanklager als Ganzes den Filtratbedarf der Abfüllung für mehrere Produktionstage aufnehmen können [45] [63] [66]. Dabei wird für die Lagerung ein definierter Überdruck bestimmt, damit der während der Fermentation angereicherte oder ggf. durch zusätzliches Karbonisieren [30] eingestellte Kohlendioxidgehalt im Bier bestehen bleibt.

Obwohl die Drucktanks selbst damit keine ausgeprägt produktive Funktion besitzen, kann dabei eine gewisse Diversifikation stattfinden, indem dieselbe Biersorte bei unterschiedlichem Druck gelagert wird. Auf diesem Weg kann z. B. ein niedrigerer Kohlendioxidgehalt für die Fassabfüllung eingestellt werden, ohne dass das Fassbier bereits bei der Fermentation als eigene Sorte behandelt werden muss. Zwischen Filtration und Drucktank kann außerdem durch thermische oder membrantechnische Verfahren der Alkoholgehalt des Biers reduziert werden [54]. Allerdings werden alkoholreduzierte Biere meist bereits vor dem Entalkoholisieren als individuelle Sorten geführt.

Der Aufenthalt im Drucktank bietet eine letzte Gelegenheit zur Qualitätskontrolle für das fertige Produkt vor der Abfüllung [41] [63]. Trotzdem verzichten manche Betriebe aus ökonomischen Gründen zumindest für Hauptsorten ganz auf eine Drucktanklagerung [41] oder nutzen ihre Drucktanks grundsätzlich oder bei Bedarf zu Zeiten hoher Auslastung als Puffertanks zwischen Filtration und Abfüllung. Unabhängig von der Verweilzeit des Biers sind bei den Drucktanks die streng kontrollierte Hygiene und das Vorspannen mit Kohlendioxid besonders wichtig, um eine Sauerstoffaufnahme zu verhindern [30].

#### **2.2.4.2 Anlagentechnik**

Die künstliche Klärung von Bier erfolgt einstufig oder in mehreren Stufen von der Vorklärung bis zur Entkeimung, wobei oft auch unterschiedliche Techniken kombiniert werden. Eingesetzt

werden z. B. Separatoren, Kieselgur-Anschwemmfilter, Schichtenfilter, Membranfilter und Modulfilter, deren Bauformen, Wirkungsprinzipien und Einsatzmöglichkeiten in der Brauerei in der Literatur ausführlich diskutiert werden [22] [30] [35] [45]. Zur mehrstufigen Filtration werden die unterschiedlichen Stufen zu „Filterlinien“ oder „Filterstraßen“ verschaltet, wobei nicht jede Charge alle Stufen durchlaufen muss. Da sich die vorliegende Arbeit vor allem mit den Zeitabläufen und weniger mit den technischen Aspekten der Bierherstellung beschäftigt, sollen die Filtersysteme hier nicht einzeln dargestellt werden.

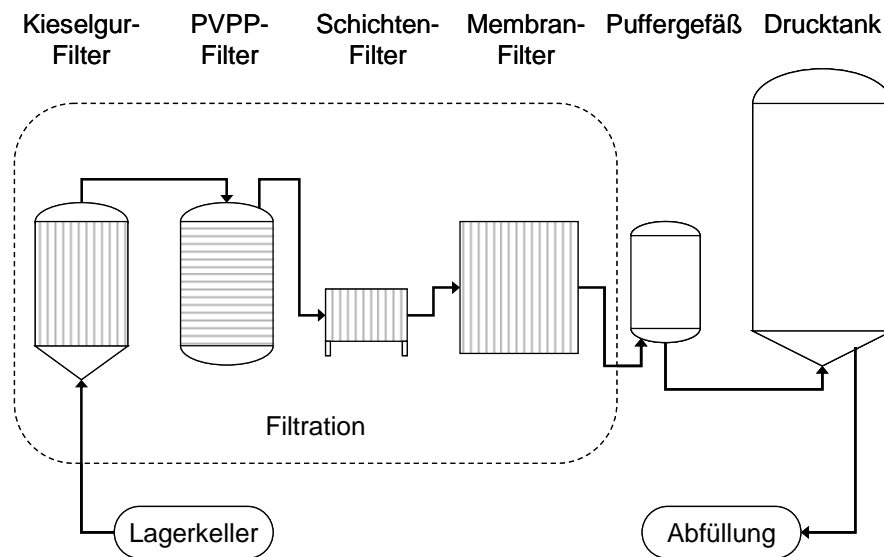


Bild 9: Beispiel für eine mehrstufige Filterlinie (in Anlehnung an KUNZE [30])

„Drucktanks werden meist als stehende Chromnickelstahltanks ohne Einbauten aufgestellt“, deren produktseitige Oberflächen maximale Hygiene sicherstellen sollen [30]. Sie sollten außerdem eine bestimmte Überdruckfestigkeit aufweisen [41], die für den Kohlendioxidgehalt der produzierten Biere angemessen ist. Gewöhnlich existiert eine abgeschlossene Drucktankabteilung, die durch eine Raumkühlung auf 0 bis 2 °C temperiert wird [30].

### 2.2.4.3 Betriebsweise

Alle Filtersysteme arbeiten im Durchlauf und abgesehen von den selbstaustragenden Separatoren [22] mit begrenzter Standzeit, d. h. der Betrieb eines Filters bzw. einer Filterlinie muss in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen unterbrochen werden, um eine Reinigung oder Regeneration zu ermöglichen. Die Durchsatzleistung ist über die Druckdifferenz am Filter in gewissen Grenzen manipulierbar, wobei üblicherweise versucht wird, durch ansteigenden Druck eine bestimmte (Nenn-)Leistung einzuhalten, solange die Druckdifferenz nicht zu hoch wird. Wie lange ein Filter ohne Reinigung gefahren werden kann, hängt neben der Fahrweise vor allem von der „Partikelfracht“ des Unfiltrats in Verbindung mit der Trennschärfe des Filters ab. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der „Filtrierbarkeit“. Diese kann zwischen Sorten und Chargen unterschiedlich ausfallen, aber auch während der Filtration einer Tankcharge schwanken. PETER-

SEN [45] gibt für die Standzeit unterschiedlicher Filtertypen Werte zwischen 6 und 16 Stunden an und weist darauf hin, dass die effektive Filterleistung durch „technologisch bedingte Ursachen“ um bis zu 50 % herabgesetzt werden kann. Art und Umfang der Maßnahmen zum Reinigen und Rüsten eines Filters variieren zwischen den verschiedenen Filtersystemen [22] [45].

Während einer Standzeit wird eine Filterlinie möglichst ohne Unterbrechung betrieben. Zwischen unterschiedlichen Quell tanks kann durch einen Verschneidbock (vgl. S. 23) ohne Druckschläge gewechselt werden. Zusätzlich kann dem Filter ein Puffertank vorgeschaltet sein [63]. Bei Produktwechseln entstehen Gemische, die nur eingeschränkt verwertet bzw. dem Vorgänger oder Nachfolgerprodukt zugeordnet werden können. Gewöhnlich bestehen daher Präferenzen hinsichtlich der Reihenfolge von Sorten innerhalb derselben Standzeit. So sollen in der Regel helle vor dunklen Bieren filtriert werden. Unter Umständen dürfen bestimmte Sorten oder Produktgruppen grundsätzlich nicht nacheinander oder nicht innerhalb derselben Standzeit filtriert werden.

Sofern die Filtration während einer Produktionswoche nicht durchgehend, sondern z. B. ein- oder zweischichtig arbeitet, ist davon auszugehen, dass das Ende der täglichen Produktionszeit nicht unbedingt mit dem Ende der Standzeit jeder Filterlinie zusammenfällt. Bei jeder längeren Unterbrechung der Produktion muss die Filterlinie aber „abgefahren“ und gereinigt werden. Immer wenn die Standzeit einer Filterlinie innerhalb der Produktionszeit erschöpft ist, stellt sich daher die Frage, ob die laut Schichtplan verbleibende Produktionszeit abzüglich der Reinigungszeit einen weiteren Betriebszyklus von ausreichender Dauer zulässt, um ein erneutes Anfahren der Filterlinie zu rechtfertigen. Falls ein akuter Filtratbedarf der Abfüllung sofort bedient werden muss, kann der zusätzliche Produktionszyklus ggf. durch ein Abweichen vom Schichtplan ausgedehnt werden, um eine wirtschaftlich sinnvolle Produktionsmenge zu erreichen. Dabei sind die erhöhten Kosten für Überstunden gegen die erhöhten Betriebskosten des Filters abzuwägen.

Die filtrierten Mengen richten sich meist nach den Anforderungen der Abfüllung. Beim Abgrenzen einzelner Chargen bzw. Filtrationsaufträge, mit denen eine Filterlinie belegt wird, kann auch das Leer- oder Vollfahren von Tanks eine Rolle spielen. Unter Umständen wird von Planvorgaben innerhalb gewisser Toleranzgrenzen abgewichen, vor allem um geringfügige Restmengen oder Restkapazitäten in Tanks zu vermeiden.

Die Betriebsweise von Drucktanks ähnelt weitgehend dem in Bild 7 (vgl. S. 22) skizzierten Ablauf für Fermentationstanks, wobei der Schritt „Prozess“ entfällt, soweit nicht ein definierter Mindestaufenthalt, z. B. für eine mikrobiologische Laboruntersuchung, als Prozessschritt interpretiert wird. Wie beim Fermentationstank können in einem Drucktank mehrere Teilchargen aufgenommen und abgegeben werden. Dabei überschneiden sich die Zeitfenster für Zugang und Abgang üblicherweise nicht, sodass ein Tank, aus dem bereits abgefüllt wurde, erst im folgenden Belegungszyklus neue Chargen aufnehmen kann. Eine Ausnahme stellt hier der Puffertankbetrieb dar (vgl. S. 26), bei dem Zugänge und Abgänge auch gleichzeitig oder abwechselnd auf-



treten können. Generell sollte das Leeren eines Drucktanks innerhalb 24 Stunden abgeschlossen werden [45].

Die Belegungsdauer einzelner Drucktanks bzw. des Drucktanklagers ergibt sich weitgehend aus der Koordination von Filterplan und Abfüllplan, wobei nach KUNZE [30] Lagerzeiten von bis zu 3 Tagen auftreten können. So kann bei einer fünftägigen Arbeitswoche die Filtratversorgung der Füllerei am Montag früh bereits durch die Filtration am vorherigen Freitag sichergestellt werden.

#### 2.2.4.4 Kapazität

Einzelne Separatoren und Filter bzw. Filterlinien könne je nach System eine Leistung von ca. 500 – 600 hl/h erreichen. Entsprechend können höhere Durchsatzleistungen nur mit mehreren Filterlinien erzielt werden. Unabhängig von Anforderungen an den Gesamtdurchsatz kann es sinnvoll sein, die Gesamtkapazität der Filtration auf mehrere Linien zu verteilen, wenn ein vielfältiges Sortiment flexibel bedient werden muss [66].

Die mittlere Durchsatzleistung der Filtration wird durch die Leistung der vorhandenen Filterlinien, deren Stand- und Rüstzeiten sowie den Schichtplan bestimmt [45]. Insgesamt sollten sich die Auslegung und die Betriebsweise der Filtration und der Drucktanks am Abfüllbetrieb orientieren [45] [62].

Zur Dimensionierung der Drucktankabteilung bietet die Literatur unterschiedliche Empfehlungen an:

- Generell wird die *Sortimentsstruktur* als wichtiger Faktor angeführt [63] [66].
- Richtwerte für die *Drucktankgröße* werden aus dem Tagesbedarf der Abfüllung (50 % des Tagesbedarfs, Spezialbiere kleiner) [45], der Produktionsmenge pro Abfüllschicht (mindestens 50 %, normal 100 %) [63] oder der Leistung der Filtration (mindestens 1 Stunde Filtration) [66] abgeleitet. UNTERSTEIN [63] fordert mindestens 6 Tanks je Sorte und weist dabei auch auf die zusätzlich zu berücksichtigenden Drucktanksorten für Fassbier hin (vgl. S. 26).
- Die *Gesamtkapazität der Drucktankabteilung* wird einheitlich aus dem Tagesbedarf der Abfüllung abgeleitet [45] [63] [66], wobei die Kapazität zwischen 150 % und 200 % bzw. 350 % einer Tagesfüllmenge liegen soll. Als Mindestkapazität gibt VEY [66] außerdem eine komplette Filtrationscharge an.

Da der tatsächliche Kapazitätsbedarf im Drucktanklager in der Praxis vor allem von der kurzfristigen Disposition zwischen Filterplan und Abfüllplan abhängt, bleibt es angesichts der großen Spanne für die empfohlene Gesamtkapazität dem Planer überlassen, bei der Dimensionierung ein geeignetes Niveau für Sicherheit und Flexibilität in der Produktion individuell festzulegen.

### 3 Planung der Bierherstellung

#### 3.1 Anlagen- und Produktionsplanung

[Planung im Unternehmen] „ist ein systematischer und von der jeweiligen Unternehmenspolitik geprägter Entscheidungsprozeß, der unter Berücksichtigung externer Bedingungen künftige Zustände des Unternehmens sowie die Mittel und Wege zu ihrer Erreichung zeitdauer- und terminbezogen festlegt.“ [18]

Innerhalb dieser allgemeinen Definition können für Produktionsunternehmen mit der *Anlagenplanung* und der *Produktionsplanung* zwei Teilbereiche unterschieden werden, die einerseits die „Mittel“ und andererseits die „Wege“ zum Erreichen von Unternehmenszielen betreffen. Beide Aufgaben sind inhaltlich eng miteinander verbunden und überschneiden sich im Gebiet der *Produktionsanlagenplanung*. Diese befasst sich mit Entscheidungen über „die Einrichtungen, die zur Erfüllung der Fertigungsaufgaben bereitgestellt werden, und in welcher Art und Weise sie eingesetzt werden sollen“, um Zielvorgaben für Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Flexibilität zu erreichen [53]. Der starke Wettbewerb erfordert dabei eine „ständige Anpassung und Weiterentwicklung von Produkten und Produktionsverfahren sowie den dazu notwendigen Produktionsanlagen.“ [31]. Bild 10 zeigt eine Übersicht über Aufgaben der Produktionsanlagenplanung, die unterschiedlichen Planungshorizonten zugeordnet sind. Die Abstufung der Zeithorizonte orientiert sich hier an der Nutzungsdauer der Anlagen, die als Maßstab für eine „mittelfristige“ Perspektive dient. Betrachtet man dagegen beispielsweise die Produktionsplanung als isoliertes Teilgebiet, ist sicher ein anderer Zeitbegriff angebracht. Im Kontext der vorliegenden Arbeit interessieren vor allem die hier als mittel- und kurzfristig klassifizierten Planungsaufgaben, für die den *Produktionsabläufen* besondere Bedeutung zukommt.

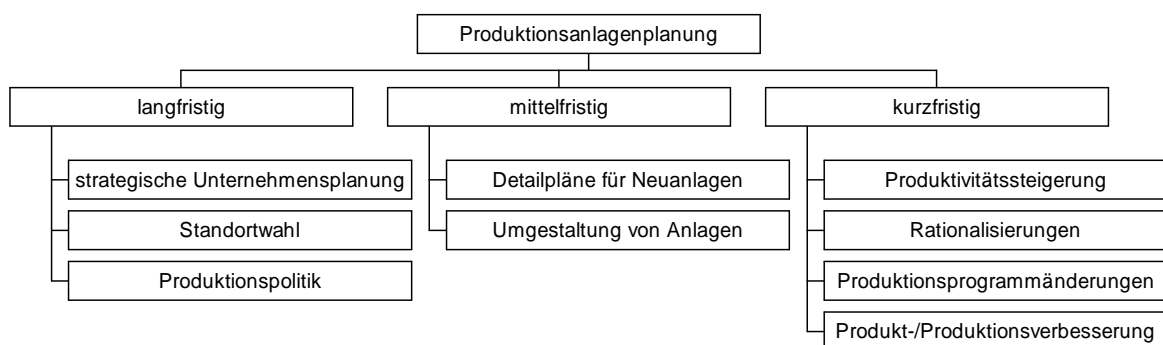


Bild 10: Aufgaben der Produktionsanlagenplanung für unterschiedliche Zeithorizonte [31]

KOOPMANN [28] definiert die *Ablaufplanung* (engl.: *process scheduling*) als Teilfunktion innerhalb der Produktionsplanung für Anlagen zur Rezeptfahrweise, durch die Auftragsreihenfolgen

gebildet und diese Aufträge als Chargen bestimmten Ressourcen zugeordnet werden. Zur Relation zwischen Anlagenplanung und Ablaufplanung stellt er fest:

„Die optimale Planung von Anlagen zur Rezeptfahrweise ist noch eine Dimension komplexer als die Ablaufplanung, denn sie schließt diese mit ein. Der Anlagenentwurf kann nur beurteilt werden, wenn ein guter Ablaufplan zu einem Anlagenentwurf erstellt wird.“ [28]

Während eine entsprechend aufwendige Ablaufplanung als Bindeglied zwischen Anlagen- und Produktionsplanung nur notwendig ist, wenn die Planungsaufgabe tatsächlich eine detaillierte Analyse anhand einzelner Aufträge bzw. Chargen erfordert, setzt die Anlagenplanung unabhängig vom angewendeten Detaillierungsgrad eine Vorgabe zum geplanten *Produktionsprogramm* voraus. Soweit vorhanden, sollte das bestehende Produktionsprogramm dazu analysiert und ggf. erweitert und/oder neu geordnet, mindestens aber bereinigt werden [15] [45].

## **3.2 Charakteristika des Brauereibetriebs**

Keiner der in diesem Abschnitt vorgestellten Aspekte des Brauereibetriebs stellt ein definitives Alleinstellungsmerkmal innerhalb der vielfältigen Branchen der Prozessindustrie dar. Auch die Kombination und Ausprägung dieser Merkmale gilt sicher nicht exklusiv für die Brauindustrie. Die folgende Übersicht soll also nicht die Einzigartigkeit der Bierherstellung und Bierabfüllung als Problemfall der Anlagen- oder Produktionsplanung belegen, sondern lediglich auf einige typische Rahmenbedingungen hinweisen, die für die Brauereiplanung in den meisten Szenarien gegeben und relevant sind.

Der enge Zusammenhang zwischen der Technologie und der Arbeitsweise in den Prozessstufen der Bierherstellung wurde bereits in Kapitel 2 erörtert. SPITZ [54] bezeichnet die Kombination verfahrenstechnischer und fertigungstechnischer Prozesse als kennzeichnend für den Brauereibetrieb. Dabei ordnet er der Fertigungstechnik allerdings lediglich die Abfüllung zu, der für die Bierherstellung lediglich eine im Wortsinn periphere Bedeutung zukommt.

### **3.2.1 Saisonale Schwankungen**

Neben jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen, durch die sich der Getränkeabsatz in den heißen Sommermonaten regelmäßig erhöht, können saisonale Faktoren wie der Fremdenverkehr, Feiertage oder periodisch wiederkehrende Großveranstaltungen die Absatzverteilung im Jahreslauf maßgeblich beeinflussen. Dieser „Jahresgang“ kann dabei für unterschiedliche Biersorten, Biertypen, Artikelgruppen, Marken, Absatzwege oder Absatzregionen individuelle Merkmale und Effekte aufweisen, z. B. wenn sogenannte „Saisonbiere“ bevorzugt oder ausschließlich in bestimmten Zeitfenstern angeboten bzw. nachgefragt werden. Eine ganzjährig hohe Auslastung der Produktionskapazität einer Brauerei ist daher nur in besonderen Fällen zu erwarten, z. B. wenn entweder saisonale Effekte aufgrund regionaler Besonderheiten zu vernachlässigen

sind oder die Nachfrageschwankungen aufgrund einer permanent grenzwertig hohen Auslastung nicht auf die Produktion durchschlagen. UNTERSTEIN [62] verweist in diesem Kontext auf die besondere Situation in Südamerika, Mittelamerika und Afrika.

Ein Produktionsbetrieb kann saisonalen Schwankungen durch *Emanzipation*, *Synchronisation* und *Kompensation* durch Produkte mit phasenverschobener Nachfrage oder Lohnarbeit begegnen [70]. Die Kompensation kann dabei im Getränkebereich nur eine untergeordnete Rolle spielen, nachdem sich die jahreszeitlichen Faktoren großräumig und gleichsinnig auf alle Betriebe einer Region auswirken, und daher eine ausgeprägte Phasenverschiebung bei der Nachfrage nur für extrem weit entfernte Absatzgebiete zu erwarten ist. Obwohl selbst mittelständische Brauereien durchaus über internationale Absatzkanäle verfügen können, dürfte das Exportvolumen im Verhältnis zum Gesamtausstoß nur in Sonderfällen für eine effektive Kompensation ausreichen. Auch wenn Haltbarkeiten von 12 Monaten und mehr für Bier mittlerweile üblich sind, praktizieren die meisten Brauereien zugunsten der Frische bzw. der Restlaufzeit der ausgelieferten Produkte nur in sehr begrenztem Umfang eine Vorproduktion auf Lager (*Emanzipation*) und müssen daher ihre Produktionsleistung entlang der periodischen Absatzentwicklung variieren (*Synchronisation*). Während im allgemeinen Fall ein kostenoptimaler Kompromiss zwischen *Emanzipation* und *Synchronisation* angestrebt wird [70], bedingt im Brauereibereich – wie im Getränke- und Lebensmittelsektor generell – die begrenzte Haltbarkeit der Produkte zusätzliche Restriktionen.

Die saisonalen Schwankungen sollten in einem langfristigen Produktionsprogramm berücksichtigt sein, das Produktionsmengen je Monat oder Kalenderwoche als Basis für die Anlagen- oder Produktionsplanung vorgibt. Für den Gesamtprozess der Bierherstellung ist dabei eine ggf. sortenspezifische Durchlaufzeit von mehreren Wochen zu berücksichtigen, deren Verteilung auf die aufeinander folgenden Prozessstufen wiederum von der Sorte abhängen kann. Der saisonale Verlauf des Kapazitätsbedarfs je Prozessstufe kann demnach von der Absatzverteilung mehr oder weniger stark abweichen. PETERSEN [45] stellt zwar allgemein fest:

„Bei der Planung muß immer davon ausgegangen werden, daß in der Praxis die rechnerisch ungünstigste Situation eintreten kann. Sie zu beherrschen ist Aufgabe der Planung.“

Für die Kapazitätsauslegung von Anlagen anhand der prognostizierten monatlichen Produktionsmengen wird trotzdem üblicherweise nicht der „Spitzenmonat“, also die absolute Leistungsspitze, angesetzt, sondern ein geringerer Wert, der nach unterschiedlichen Methoden berechnet werden kann. In der Praxis können kurzfristige Leistungsspitzen z. B. durch Überstunden abgefangen werden, wobei manche Betriebe ggf. sogar an 7 Wochentagen produzieren und die Reinigung zugunsten von Stabilisierungsmaßnahmen vernachlässigen [62]. Eine weitere Option ist die saisonale Verkürzung der Gär- und Lagerzeiten, die UNTERSTEIN [62] in Verbindung mit dem saisonbedingt zeitnahen Verbrauch als qualitativ vertretbar bezeichnet.

Dafür fallen die Investitionskosten für die schlankere Anlage geringer und die kapazitive Auslastung in den schwächeren Monaten höher aus [62]. UNTERSTEIN [63] diskutiert verschiedene Varianten für die Berechnung und empfiehlt „das Mittel aus drei hohen nebeneinanderliegenden Monaten“ als „Bezugsmonat“. Auch VEY [66] verweist analog auf „den durchschnittlichen Ausstoß der drei absatzstärksten, aufeinanderfolgenden Monate“ als erprobten Wert. Er gibt als langjährigen Mittelwert für Deutschland 9,5 % der Jahresproduktion (gegenüber 8,3 % bei Gleichverteilung über alle 12 Monate) als Richtwert für den „Spitzenmonatsanteil“ an, weist allerdings gleichzeitig auf eine erhebliche Spannweite hin. UNTERSTEIN [62] gibt in einem neueren Beitrag Richtwerte von 10,5 % bis 11,5 % für mitteleuropäische und 14 % bis 15 % für „wärmere Urlaubsländer“ an.

### 3.2.2 Sortimentsstruktur

Das Sortiment einer Brauerei kann zwischen den Extremen „absolut homogen“ und „stark heterogen“ vielfältig ausgeprägt sein. Die klassische, heterogene „Sortimentsbrauerei“ stellt unterschiedliche Biersorten in demselben Betrieb her. Die Biersorten werden dabei überwiegend schon bei der Würzproduktion unterschieden. Entlang der Prozessstufen kann aber auch eine fortschreitende Diversifikation stattfinden, indem durch unterschiedliche Verarbeitung, Verdünnen (*high-gravity-brewing*) oder sogar Mischen zusätzliche Sorten gebildet werden. Innerhalb des Sortiments wird häufig zwischen den mengenmäßig dominierenden Hauptsorten und umsatzschwächeren Randsorten unterschieden. Der Einfluss der Sortimentsstruktur auf den Kapazitätsbedarf verschiedener Prozessstufen wurde bereits in Kapitel 2 angesprochen. VEY [66] verweist auf einen erhöhten technischen Aufwand und Investitionsbedarf mit zunehmender Breite des Sortiments. Diesem Effekt begegnen manche Brauereien, indem sie die Nachfrage nach Randsorten im Sortiment vermehrt durch Fremdbezug bedienen, was DOLEZALEK [15] im Zuge der Produktionsprogrammplanung allgemein empfiehlt:

„Da üblicherweise ein geringer Prozentsatz der Sorten einen großen Prozentsatz des Umsatzes erbringt, ist es oft sinnvoll, die Sorten mit großem Umsatz selbst herzustellen und die Sorten geringeren Umsatzes als Handelsware zu beziehen und zu vertreiben.“

Verbreitet ist auch die Konzentration der Produktion von Randsorten auf bestimmte Produktionskapazitäten oder sogar Standorte innerhalb desselben Unternehmens, wodurch die übrigen exklusiv oder bevorzugt für die Produktion der Hauptsorten eingesetzten Kapazitäten effizienter betrieben werden können. Diese Strategie ist theoretisch für jede Prozessstufe individuell anwendbar, wobei sogar standortübergreifende Tanktransporte von Zwischenprodukten wirtschaftlich sinnvoll sein können.

MANGER [35] konstatiert für Großbetriebe eine Tendenz zur „Mono-Sorten-Brauerei“, was nicht überrascht, da dies den Idealfall für eine kostenminimale Produktion darstellt [15]. Aber selbst solche „Einproduktbetriebe“ sind spätestens in der Stufen der Abfüllung und Verpackung von einem allgemeinen Trend zu einer steigenden Artikelvielfalt betroffen, wenn das Marketing im

gesättigten bis rückläufigen Marktumfeld nach immer neuen Verpackungsvarianten verlangt. Die zunehmende Bedeutung von Biermischgetränken und Convenience-Verpackungen [19] betrifft dabei gerade auch Großbetriebe. Auch wenn der resultierende zusätzliche Aufwand in den Bereichen Abfüllung, Verpackung und Logistik die Bierherstellung nicht direkt betrifft, kann eine „Verbreiterung“ des Sortiments in der Articlebene auf die Filtration oder den Drucktankbereich zurückwirken [66], z. B. wenn dort Bier derselben Sorte für verschiedene Behältertypen oder Absatzgebiete individuell zu behandeln ist (vgl. S. 26).

### 3.2.3 Arbeitszeitmodelle

Das Kapazitätsangebot für die einzelnen Brauereiabteilungen hängt nur zum Teil von den vorhandenen technischen Einrichtungen und deren Leistungsdaten bzw. Nutzvolumen ab. In Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad und der genauen Arbeitsweise spielt auch die Verfügbarkeit bzw. die planmäßige Bereitstellung von Personal eine mehr oder weniger zentrale Rolle für die Produktionskapazität.

Für die rein produktiven Prozessstufen ohne Speicherkapazität (Sudhaus, Filtration, Abfüllung) ist es üblich, die Produktion mindestens einmal pro Woche für erforderliche Reinigungs- und Wartungsarbeiten zu unterbrechen. Dafür veranschlagt VEY [66] pauschal einen halben Arbeitstag, sodass z. B. bei einer Wochenarbeitszeit von 5 Tagen nur 4,5 Produktionstage zur Verfügung stehen.

Die Würzproduktion wird während einer Sudwoche aus technischen und wirtschaftlichen Gründen möglichst unterbrechungsfrei betrieben (vgl. S. 14), weshalb zur Variation der Produktionsleistung im Jahresverlauf bevorzugt die Dauer der Sudwoche genutzt wird (vgl. S. 16). Nur bei sehr niedriger Auslastung des Sudhauses in kleinen Betrieben kann sich der Sudhausbetrieb einem Arbeitszeitmodell unterordnen. Filtration und Abfüllung werden dagegen regelmäßig nach Bedarf, also ein-, zwei- oder dreischichtig, betrieben. Abweichend vom generellen Schichtmodell können diese Abteilungen auf kurzfristige Absatz- oder Durchsatzschwankungen (z. B. Eilaufträge, Filtrationsprobleme) mit Überstunden oder Kurzarbeit reagieren.

Die Schichtmodelle für Filtration und Abfüllung werden sich dabei meist unterscheiden, z. B. wenn der Filtratbedarf einer dreischichtig arbeitenden Abfüllanlage durch zwei Schichten in der Filtration gedeckt werden kann [63] und ausreichend Drucktankkapazität vorhanden ist.

Die Prozesse im Bereich der Fermentation laufen dagegen weitgehend ohne Rücksicht auf ein tägliches oder wöchentliches Arbeitszeitmodell ab. UNTERSTEIN [63] beschreibt für das Zweitankverfahren zwar das „Hinüberziehen“ eines Gärtanks über das Wochenende, also das künstliche Verzögern der Gärung, durch die ein Personaleinsatz zum Schlauchen am Wochenende vermieden werden soll, diese Methode dürfte in modern eingerichteten Betrieben mit auf Reproduzierbarkeit ausgerichteter Arbeitsweise allerdings kaum noch eine Rolle spielen.

### 3.2.4 Volumenänderungen im Prozess

Eine wesentliche Kennzahl für die Produktionsleistung einer Brauerei ist das Volumen an heißer Ausschlagwürze („hl AW“), das vom Sudhaus je Zeiteinheit (Tag, Woche, Monat, Jahr) abgegeben werden soll [66]. Bei der Auslegung einer Anlage wird ein entsprechender Zielwert aus den Planzahlen für den Absatz abgeleitet, die primär meist das Volumen an Verkaufsbier („hl VB“) oder eine Stückzahl (Paletten, Kästen, Behälter) je Zeiteinheit angeben. Zwischen der heißen Ausschlagwürze („Heißwürze“) und dem Verkaufsbier liegt eine mehrstufige Prozesskette, in der neben chemischen Umsetzungen und der Zugabe bzw. Abscheidung verschiedener Stoffe auch Temperaturänderungen und Produktverluste auftreten. Für einzelne oder mehrere aufeinander folgende Stufen ergeben sich daraus ggf. sortenspezifische Kennzahlen für das Volumenverhältnis zwischen dem gewonnenen Produkt und einem als maßgeblich betrachteten Edukt, die prozentual als Ausbeute-Verhältnis ( $V_{\text{Produkt}} : V_{\text{Edukt}}$ ) oder reziprok, als spezifischer Materialbedarf ( $V_{\text{Edukt}} : V_{\text{Produkt}}$ ), formuliert sein können.

Typisch ist eine Volumenabnahme von Stufe zu Stufe, wofür neben der deutlichen temperaturabhängigen Kontraktion beim Würzekühlen vor allem Produktverluste im Prozess und beim Transfer verantwortlich sind. VEY [66] gibt entsprechende Richtwerte für ein klassisches Zweitankverfahren an, auf denen das Diagramm in Bild 11 basiert. Hier ist der spezifische Materialbedarf für verschiedene Vorstufen bezogen auf das Verkaufsbiervolumen (gestrichelte Linie bei 100 %) prozentual dargestellt. Der Text im Diagrammbalken bezeichnet den Prozessabschnitt, in den die jeweilige Vorstufe eingeht.

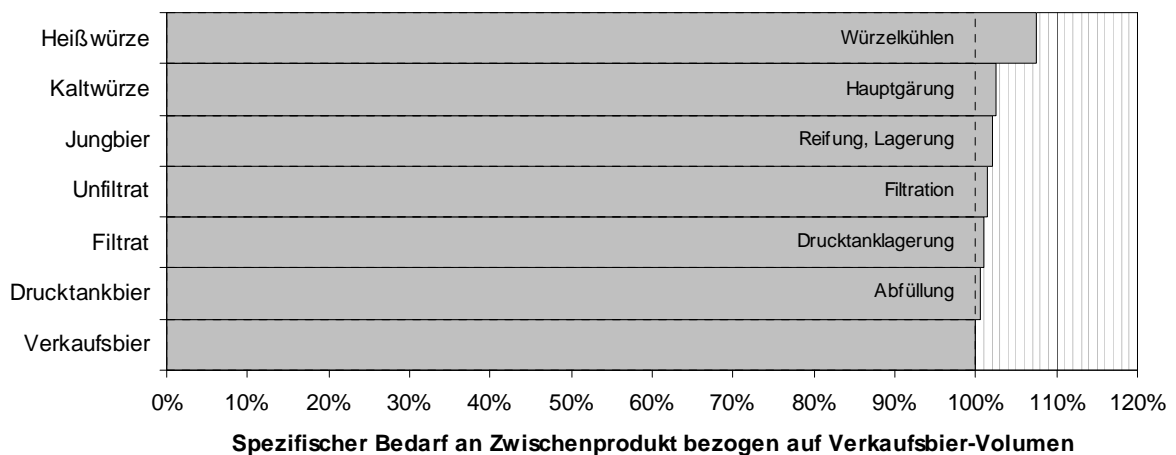


Bild 11: Richtwerte für die Volumenänderung in einem Zweitankverfahren (nach VEY [66])

Der im Brauereikontext verbreitete Begriff „Schwand“ kehrt die hier gewählte Perspektive um und bezieht die Volumenverluste entlang der Prozesskette auf die heiße Ausschlagwürze. Im Beispiel liegt demnach ein Gesamt-Schwand von 7 % vor, der einem spezifischen Heißwürze-Bedarf von 107,5 % entspricht. Der spezifische Bedarf an Kaltwürze beträgt dagegen lediglich

102,6 %. Da nach dem Würzekühlen bis zur Abfüllung kaum von einer temperaturbedingten Volumenkontraktion auszugehen ist, geht damit bei einer Wochenproduktion von 40 Suden ein ganzer Sud als „massebehafteter“ Schwand verloren.

Eine relevante Zunahme von Volumen und Masse kann im Brauprozess z. B. durch das Verdünnen von Bier mit sauerstofffreiem Wasser beim *high-gravity-brewing* (vgl. S. 36) [66] oder beim Dosieren verdünnter Vor- und Nachläufe aus der Filtration zur Korrektur erhöhter Stammwürze-Werte vorkommen.

### **3.3 Aspekte der Anlagenplanung**

#### **3.3.1 Inhalte der Anlagenplanung**

Die Anlagen eines Industriebetriebs kann man nach MANGER [35] in Produktionsanlagen, Nebenanlagen und Gebäude bzw. bauliche Anlagen einteilen. Letztere spielen für die hier hauptsächlich betrachteten Produktionsabläufe nur eine untergeordnete Rolle. „Nebenanlagen“ findet man in Brauereibetrieben z. B. für Aufgaben der Ver- bzw. Entsorgung (Energie, Kohlendioxid, Wasser, Abwasser, Druckluft, usw.) und für den Umgang mit diversen Nebenprodukten [35]. Insgesamt deckt sich der Aufgabenbereich der Anlagenplanung mit dem Begriff der Fabrikplanung nach der folgenden Definition:

„Unter Fabrikplanung verstehen wir die optimale Gestaltung und rationelle Verwirklichung der Produktionsmittel, Bauten und Nebenanlagen. Sie beschäftigt sich somit überwiegend mit den substantiellen Teilen der Unternehmung, die später im Betrieb als konstante Gegebenheiten angesehen werden und gegebenenfalls nur durch beträchtlichen finanziellen Aufwand geändert werden können.“ [20]

Als mögliche Anlässe einer Anlagenplanung für ganze Betriebe oder Teile von Betrieben werden in der Literatur systematisch Neubau, Umbau, Erweiterung und Ersatz unterschieden [23] [31] [63]. Unabhängig vom Anlass ist es die Aufgabe der Anlagenplanung, Maßnahmen festzulegen, durch deren Umsetzung eine Anlage entsteht, die definierte Anforderungen erfüllt. Im Allgemeinen bestehen konkrete Zielvorgaben für das Produktionsergebnis nach Menge und Qualität, die Flexibilität hinsichtlich Produktionsmenge und Produktvielfalt, die Sicherheit, die Einhaltung von gesetzlichen Vorgaben und nicht zuletzt für die Wirtschaftlichkeit. Sofern das Planungsproblem überhaupt lösbar ist, sollen vorhandene Spielräume für eine optimale Gestaltung genutzt werden. Diesen Zielen stehen begrenzte technische und finanzielle Möglichkeiten, eine Vielzahl nicht beeinflussbarer Rahmenbedingungen sowie begrenzte Zeit und Personalressourcen für die Planung und Durchführung von Maßnahmen gegenüber. Zusätzlich müssen die für die Planung verfügbaren Informationen vor dem Hintergrund einer langfristigen Nutzung der Anlagen grundsätzlich als unvollständig und unsicher betrachtet werden.



Auch wenn eine rationale und systematische Vorgehensweise bei der Lösung der vielfältigen Problemstellungen der Anlagenplanung durch ständig weiter entwickelte Arbeitstechniken und Hilfsmittel unterstützt wird, stellt MANGER [23] für den Bereich der Brauereiplanung fest:

„In vielen Fällen wird nicht oder kann nicht nur nach objektiven Kriterien entschieden werden: die ‚Philosophie des Braumeisters oder Betriebsinhabers‘ kann eine wichtige Rolle spielen. Nur so lassen sich Entscheidungen der jüngeren Vergangenheit verstehen.“

### 3.3.2 Aufgabenverteilung in Anlagenprojekten

Umfangreiche Planungsprojekte werden oft in Segmente von überschaubarer Komplexität zerlegt, die dann ggf. in Arbeitsteilung zwischen Projektteams bearbeitet werden können. Die Gliederung ergibt sich unter Umständen aufgrund der Anlagenstruktur oder der Zuständigkeit unterschiedlicher Fachdisziplinen. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass das Kombinieren isoliert erarbeiteter „optimaler“ Teillösungen nicht zu einer optimalen Gesamtlösung führen muss [20] [35] [45]. MANGER [23] betont die Wichtigkeit einer interdisziplinären und ganzheitlichen Arbeitsweise. Dass diese nicht auf technische Fachdisziplinen beschränkt sein muss, stellt DOLEZALEK [15] klar: „Auch Mathematik und Jura können bisweilen zur Lösung von Spezialproblemen beitragen.“ Einen Überblick für die Teilaufgaben der Brauereiplanung nach PETERSEN [45] zeigt Bild 12 in Form eines hierarchischen Leitplans.

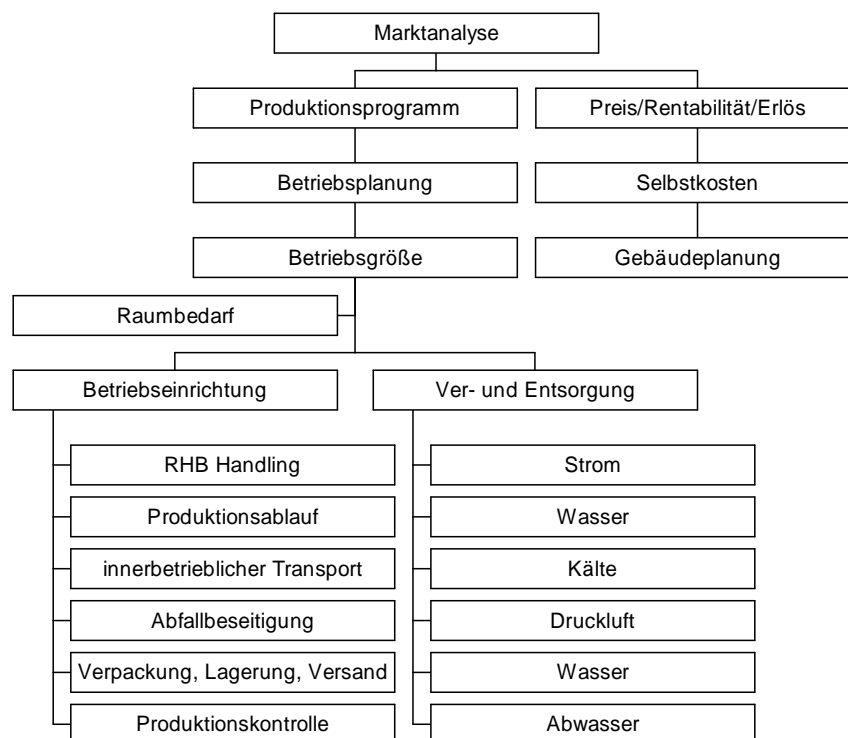


Bild 12: Leitplan für die Brauereiplanung nach PETERSEN [45]

Neben den Interessenkonflikten zwischen den innerhalb eines Planungsprojekts definierten Segmenten bestehen auch grundsätzlich unterschiedliche Interessen zwischen den an jedem Projekt beteiligten Parteien, wobei sich mindestens *Auftraggeber* und *Auftragnehmer* gegenüberstehen. Als weitere eigenständige Funktion kann die *Projektleitung* betrachtet werden, die von einer der beiden vorgenannten Parteien direkt ausgeübt oder von dritter Seite als Dienstleistung bezogen wird [23].

Für Neuanlagen und umfangreichere Erweiterungsprojekte kann die in Bild 13 in Anlehnung an GÜNZEL [20] dargestellte Gliederung für die Phasen der Fabrikplanung angewendet werden, aus der sich ebenfalls Ansätze für eine Aufgabenverteilung ergeben können. Vergleichbare Ansätze anderer Autoren stellt KÜSTER [31] gegenüber.

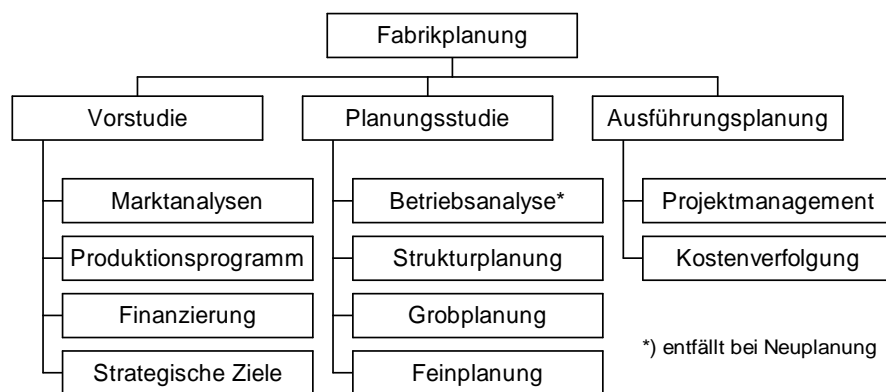


Bild 13: Aufgabenstruktur der Fabrikplanung nach GÜNZEL [20]

Während der hier als „Vorstudie“ bezeichnete Aufgabenbereich klar in die Zuständigkeit des Auftraggebers fällt, muss der Grenzverlauf für die Verantwortlichkeit der Parteien in den Abschnitten der „Planungsstudie“ projektspezifisch bestimmt werden. Entscheidend ist dabei unter anderem die Fachkompetenz, die mit zunehmender Detailtiefe der Planung eher beim Anlagenslieferanten, also dem Auftragnehmer, liegen wird [23]. Die *Detailplanung* (im Bild „Feinplanung“) wird daher meist erst nach der Auftragsvergabe durch einen Lieferanten vollzogen [23], der sich im Rahmen eines Ausschreibungsverfahrens durch ein konkretes Angebot qualifiziert hat. Zumindest bei Großinvestitionen sollte dabei auch diese technische Feinplanung von dritter Seite kontrolliert werden [15]. Der Auftraggeber kann außerdem im gesamten Ausschreibungsverfahren vom Erstellen der technischen Unterlagen bis zur Auftragsvergabe neben internen Ressourcen nach Bedarf auch externe Dienstleister einbeziehen [23]. Nach DOLEZALEK [15] kann die Planung nicht „von voll belasteten Betriebsangehörigen nebenher geleistet werden“. Spezialisierte Planungsbüros, der Anlagenbau oder Hochschulinstitute können betriebseigene Planungsgruppen oder Planungsabteilungen mit verschiedenen Vor- und Nachteilen ergänzen oder ersetzen [23] [45]. So kann unter anderem das Risiko von Planungsfehlern durch „Betriebsblindheit“ reduziert werden [15]. Der Auftraggeber kann auch die Koordination zwischen unter-

schiedlichen Lieferanten für die Planung und Durchführung eines Anlagenprojekts in die Ausschreibung einschließen, und die Anlage „schlüsselfertig“ (engl.: *turn key*) von einem Generalunternehmer beziehen [23] [45].

Für potenzielle Auftragnehmer besteht das sogenannte „Angebotsproblem“: Sie müssen, um ihre Kalkulation abzusichern und ihre Qualifikation zu dokumentieren, bereits beim Erstellen des Angebots einen erheblichen Detailaufwand in Kauf nehmen, der nur im Erfolgsfall honoriert wird [35]. Es ist zwar möglich, dieses Risiko im Angebotspreis einzukalkulieren, wie dies auch für die Kosten einer Detailplanung im Auftragsfall üblich ist [23]. Mit Blick auf den Wettbewerb ist jeder Anbieter aber darauf angewiesen, unter einem oft erheblichen Zeitdruck mit möglichst geringem Aufwand möglichst tragfähige und aussagekräftige Angebote zu erstellen. Erhöhte Planungsqualität, die nur mit Mehraufwand erreichbar ist, kann sich daher auf Dauer nur dann durchsetzen, wenn sie dem Auftraggeber transparent gemacht und entsprechend honoriert wird.

### 3.3.3 Anforderungen an die Anlagenplanung

Als allgemeine Anforderungen an die Planung werden Wirtschaftlichkeit und Transparenz genannt [15] [23]. MANGER [23] nennt als objektive Grundsätze der Anlagenplanung den *Stufengrundsatz*, den *Variantengrundsatz*, die *Projekttreue* und den *Vereinheitlichungsgrundsatz*. Durch diese Grundsätze soll die Komplexität der Planungsaufgaben bewältigt und die Wirtschaftlichkeit von Planung und Durchführung eines Projekts sichergestellt werden. Da sie MANGER [35] bereits ausführlich behandelt, sollen sie in den folgenden Abschnitten nur kurz charakterisiert werden. Daneben soll die Anlagenplanung auch eine gewisse *Variabilität* der Anlage gewährleisten [23], indem mögliche zukünftige Erweiterungsschritte untersucht, eingeplant oder sogar vorbereitet werden. Dolezalek [15] kritisiert in diesem Zusammenhang eine „Furcht vor leerstehenden Flächen“.

#### 3.3.3.1 Die Wirtschaftlichkeit der Planung

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Planung besteht das Problem, dass der Nutzeffekt eines zusätzlichen Planungsaufwands im konkreten Anwendungsfall kaum *a priori* quantifizierbar ist. PETERSEN [45] stellt dazu fest:

„Planungsarbeiten müssen so lange fortgesetzt werden, solange die zusätzlichen Planungskosten geringer sind als die damit erzielten Einsparungen. Es dürfte allerdings oft schwierig sein, die Grenzen abzuschätzen.“ [45]

Selbst wenn am Ende des Lebenszyklus einer Anlage, deren Betriebsdaten sowie Investitions- und Betriebskosten lückenlos dokumentiert sind, ist eine objektive Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Planung schwierig, da für alle nicht ausgeführten Varianten keine geeigneten Vergleichszahlen existieren. Die Wirtschaftlichkeit der Planung kann also nicht für jeden Einzelfall

anhand von Grenzkosten und Grenzertrag beurteilt werden, was zu folgender Schlussfolgerung führt:

„Es bleibt daher der Erfahrung und Intuition der Planungsinstanz überlassen, auf welcher Informationsstufe sie die Lösung des Planungsproblems als abgeschlossen, d. h. entscheidungsreif betrachtet.“ [70]

### **3.3.3.2 Der Stufengrundsatz**

Eine Einteilung des Ablaufs für ein Projekt der Anlagenplanung in streng abgegrenzte sequenzielle Phasen oder Schritte (vgl. Bild 13) wird der Praxis nicht gerecht. „Der Planungsprozeß ist vielmehr durch fließende Übergänge und zahlreiche Rückkopplungen gekennzeichnet“ [31]. Eine iterative Vorgehensweise innerhalb der Anlagenplanung, die über mehrer Stufen immer detailliertere Ergebnisse liefert, beschreiben auch andere Autoren [23] [45] [53].

### **3.3.3.3 Der Variantengrundsatz**

Abgesehen von reinen Ersatzinvestitionen beinhaltet die Anlagenplanung immer mehr oder weniger umfangreiche Freiheitsgrade und Entscheidungsvariablen, sodass selten alle kombinatorisch möglichen Varianten untersucht werden können. Vor allem in Verbindung mit der stufenweisen Detaillierung können nicht alle Ansätze „durchgeplant“ werden. KÜSTER [31] empfiehlt deshalb übereinstimmend mit PETERSEN [45], in den frühen Planungsstufen eine optimale Gesamtkonfiguration anzustreben und nur ausgewählte Varianten in der Detailplanung weiter zu verfolgen. MANGER [35] hält dazu fest:

„Der Weg zu einer optimalen Projektlösung führt stets über die Erarbeitung von Lösungsvarianten und deren umfassende, unvoreingenommene Begutachtung anhand von sorgfältig ausgewählten Bewertungskriterien. Der Entscheidungsweg sollte transparent und nachvollziehbar sein.“

### **3.3.3.4 Der Grundsatz der Projekttreue**

Da sich die Planungsphase eines umfangreichen Anlagenprojekts auch über mehrere Jahre erstrecken kann [31], sind immer wieder neue Erkenntnisse, Änderungen im Planungsumfeld oder in den Zielsetzungen für die Planung gegeben. Nach dem Grundsatz der Projekttreue (bzw. der Planungstreue) sollte die Planung trotzdem nur dann angepasst werden, wenn entweder schwerwiegende Fehler bzw. Versäumnisse vorliegen oder erhebliche Vorteile für eine Anpassung sprechen. Vor einer „gleitenden Planung“ wird u. a. mit Blick auf die Planungskosten und die rasche Realisierung eines Projekts grundsätzlich gewarnt [35].

### **3.3.3.5 Der Vereinheitlichungsgrundsatz**

Der Vereinheitlichungsgrundsatz zielt darauf ab, wiederkehrenden Aufwand bei der Planung zu vermeiden, indem für geeignete Teilprobleme „Projektbausteine“ mit abgegrenztem Funktions-

umfang und definierten Schnittstellen gepflegt werden. Durch dieses Modularisieren und Standardisieren von Technik und Methodik sollen die Qualität und die Wirtschaftlichkeit der Planung verbessert werden [35]. Nach MANGER [35] nutzen die verschiedenen Anbieter für die Brau- und Malzindustrie dieses Potenzial in unterschiedlichem Umfang und überwiegend unternehmensintern. In Bezug auf das „Angebotsproblem“ weist er an anderer Stelle darauf hin, dass firmenspezifische Standardangebote „im Allgemeinen nicht die Anforderungen einer technischen Ausschreibung erfüllen.“ [23] In Zusammenhang mit dem Vereinheitlichungsgrundsatz sei hier außerdem auf den folgenden Kommentar von PETERSEN hingewiesen:

„Bei der Industrieplanung wird in der Regel nach eingefahrenen *Systemen* und Methoden vorgegangen, wobei häufig einzelne Begriffe unterschiedlich angewandt werden und dadurch oft genug Verwirrung gestiftet wird.“ [45]

### **3.4 Aspekte der Produktionsplanung**

#### **3.4.1 Gegenstand der Produktionsplanung**

Die Gesamtaufgabe der Produktionsplanung definiert ELFNER [16] wie folgt:

„Entwicklung einer gedanklichen Ordnung für ein effizientes Zusammenwirken von Produktionsfaktoren zur Hervorbringung von Produkten unter Berücksichtigung [...] arbeitswissenschaftlicher und technologischer Erkenntnisse sowie wirtschaftlicher Ziele.“

Als wichtigstes der hier angesprochenen Ziele darf grundsätzlich die langfristige Gewinnmaximierung betrachtet werden [70]. Unter anderem durch den Einsatz von Systemen zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS-Systeme) sollen deshalb niedrige Durchlaufzeiten und Bestände bei hoher Kapazitätsauslastung und Lieferbereitschaft erreicht werden [54].

Wie in Bild 14 dargestellt, überbrückt der Aufgabenbereich der Produktionsplanung alle organisatorischen Ebenen von der Unternehmensleitebene bis zur Feldebene und wirkt damit als Transmission zwischen der dispositiven Führung und der operativen Ausführung der Produktion [46]. Als Schnittstelle zwischen Ablaufplanung und Realisierung fungiert dabei die hier nicht als eigenständige Funktion abgebildete Produktionssteuerung, die neben der Steuerung selbst auch die Erfassung und Analyse von Betriebsdaten einschließt [34]. Für die Produktionsplanung können ggf. auch direkte Rückkopplungen aus der Prozessleit- oder Feldebene, z. B. zur aktuellen Verfügbarkeit von Material und Ressourcen, sinnvoll sein.

Innerhalb der Produktionsplanung sind die Aufgabenbereiche *Programmplanung* und *Ablaufplanung* zu unterscheiden, die in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt werden. Ein weiter gefasster Begriff der Produktionsplanung nennt daneben als weitere Aufgabe die „Bereitstellung der zur Produktion erforderlichen Produktionsfaktoren“ [70] bzw. die „Planung des Produktionspotentials“ [68]. Diese dritte Komponente betrifft vor allem die Koordination mit angrenzenden

Aufgabenkomplexen wie Anlagenplanung, Materialwirtschaft und Logistik, die hier nicht explizit erörtert werden sollen.

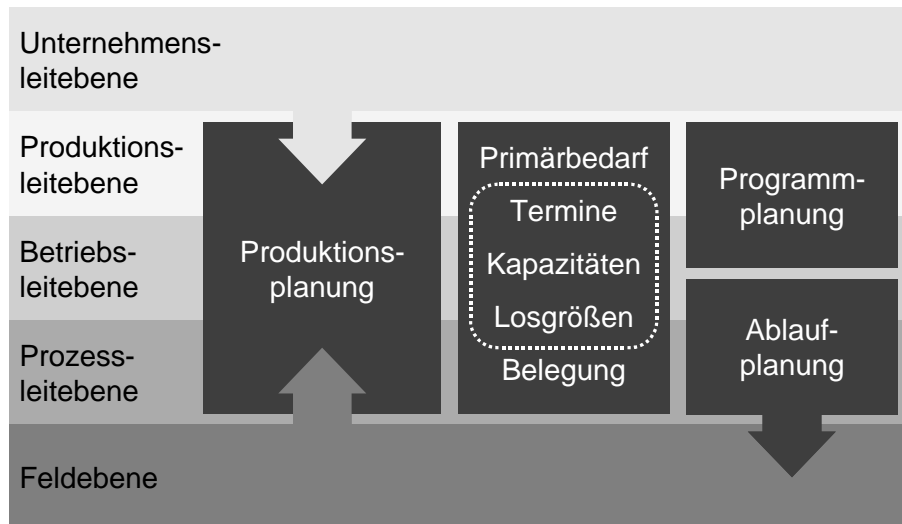


Bild 14: Position und Aufgabenbereiche der Produktionsplanung im Ebenenmodell der Produktion

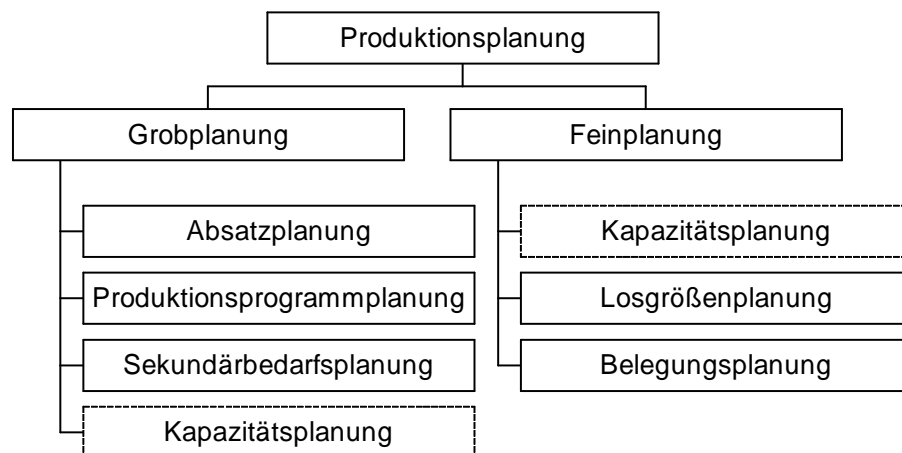


Bild 15: Aufgaben der Produktionsplanung nach SCHARBRODT [48]

Die vertikale Position der in Bild 14 mittig angegebenen Inhalte der Produktionsplanung soll in Bezug auf das hinterlegte Ebenenmodell und die Aufgaben der Programm- und Ablaufplanung nur eine tendenzielle Zuordnung ausdrücken. Besonders für die Planung von *Terminen*, *Kapazitäten* und *Losgrößen* greift keine verbindliche Zuordnung, Reihenfolge oder Hierarchie. Diese Teilprobleme müssen insgesamt und oft auch simultan bewältigt werden, um aus einem durch das Produktionsprogramm definierten *Primärbedarf* einen nicht nur zulässigen sondern im Idealfall auch kostenoptimalen Ablaufplan ableiten zu können. Die in Bild 14 gestrichelt eingerahmten Aspekte können mit unterschiedlichem Umfang und Gewicht sowohl in der Programmpla-

nung als auch in der Ablaufplanung enthalten sein. Dabei erfolgt für einen bestimmten Zeithorizont bzw. ab einer gewissen Detaillierungsstufe meist ein Übergang von einer mengenorientierten zu einer auftragsorientierten Sichtweise der Planung.

Die *Belegungsplanung*, also das konkrete Zuordnen von Losen bzw. Produktionsaufträgen zu Betriebsmitteln, ist dagegen eindeutig ein Bestandteil der Ablaufplanung. Diese Zuordnung wird bei der Übergabe eines Auftrags an die Produktionssteuerung durch die im Bild nicht dargestellte *Auftragsfreigabe* fixiert [34], soweit die endgültige Betriebsmittelauswahl nicht dynamisch, also erst zur Laufzeit des Auftrags und auf einer der unteren Ebenen erfolgt [46]. SCHARBRODT [48] schlägt für die Brauerei die in Bild 15 dargestellte Aufgabenverteilung zwischen Grobplanung und Feinplanung vor, allerdings ohne sich bezüglich der Zugehörigkeit der Kapazitätsplanung festzulegen.

Neben dieser klassischen Zweiteilung, die sich häufig auch in einem zweistufigen hierarchischen Planungsablauf widerspiegelt, sind auch Ansätze denkbar, die vermittelnde Funktionen zwischen den Stufen vorsehen bzw. auf eine strenge Abstufung zwischen Grob- und Feinplanung komplett verzichten. FÖRSTER, JÄNICKE UND THÄMELT [17] diskutieren für den besonderen Bedarf der Chargenproduktion in Mehrprodukt-Mehrzweckanlagen einen Regelkreis, in dem die *strategische Steuerung* als „ein noch selten als eigenständige Aufgabe erkannter Planungsbestandteil“ identifiziert wird. Deren Aufgabe ist das „Anpassen der mittelfristigen Planungsaufträge an veränderte Bedingungen“ auf der Grundlage eines detaillierten Produktionsmodells, welches „das interaktive Erkennen und Beseitigen von Planungskonflikten durch menschliche Entscheidungen“ ermöglicht. Auch wenn dies kaum anhand von Veröffentlichungen belegt werden kann, sei hier aufgrund eigener Anschauung angemerkt, dass vergleichbare Ansätze in Brauereien bereits erfolgreich praktiziert werden. Allerdings sind sie dort meist nicht oder nur ansatzweise in Form von Software manifestiert, sondern vielmehr wesentlicher Bestandteil des weitgehend undokumentierten Know-hows der Planer und Disponenten.

### 3.4.1.1 Produktionsprogrammplanung

Auf den Begriff des Produktionsprogramms und seine Rolle für die Anlagenplanung wurde bereits in den Abschnitten 2.1.3 und 3.1 eingegangen. Innerhalb der Produktionsprogrammplanung wird zwischen kurzfristigen und mittel- bis langfristigen Aufgaben unterschieden [70]. Das Ergebnis ist jeweils ein Produktionsprogramm, das meist für „mehrere Planungsperioden im voraus“ [34] das Sortiment und die Produktionsmengen definiert [15]. Als Basis für die Programmplanung dienen „Erwartungen über die weitere ökonomisch-technische Entwicklung“, die sich in einem Absatzplan bzw. einer Absatzprognose niederschlagen [70]. Diese sollten neben den absoluten historischen Absatzzahlen [45] auch periodische Schwankungen, Trends und geplante Änderungen am Sortiment berücksichtigen. Welche Rolle Produktionskapazitäten, Lagerkapazitäten und -bestände sowie der Beschaffungsbereich [70] als Nebenbedingungen bei der Produktions-

programmplanung spielen, hängt einerseits vom Planungshorizont und andererseits von der Verfügbarkeit geeigneter Informationen ab.

Für eine kurzfristige Produktionsprogrammplanung sind sowohl das Sortiment als auch das Kapazitätsangebot als weitgehend unveränderlich anzusehen [70], sodass lediglich die absoluten Produktionsmengen und deren Verteilung auf definierte Planungsperioden und ggf. Kapazitäten variabel sind. Dagegen sind für die mittel- und langfristige Produktionsprogrammplanung das Sortiment sowie die Produktions- und Lagerkapazitäten durch strategische oder taktische Entscheidungen beeinflussbar. Änderungen am Sortiment können dabei unterschiedlichsten Zielen dienen (z. B. Diversifikation, Bereinigung, Kapazitätsauslastung, Markterschließung, Reorganisation nach dem Zusammenschluss von Unternehmen [15]).

Aus dem Absatzplan ergibt sich ein Zeit-Mengen-Gerüst für die Produktion, das sich auf den Primärbedarf bzw. Endprodukte und wesentliche Zwischenprodukte bezieht, und damit die Basis für eine Sekundärbedarfsplanung liefert [48]. Für mehrstufige Prozesse setzt dies allerdings voraus, dass die Zeitabläufe der Produktion zumindest näherungsweise determinierbar sind. Auf dieser Grundlage kann eine grobe Kapazitätsplanung aufsetzen, durch die zukünftige Lastschwankungen und vor allem Lastspitzen bzw. Überlasten frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können [34]. Vor allem bei einer langfristigen Planung können qualitative und quantitative Änderungen am Produktionsprogramm auch wesentliche Impulse oder Vorgaben für die Anlagenplanung liefern [15] [45].

### 3.4.1.2 Produktionsablaufplanung

Zwischen der Produktionsplanung auf der Produktionsleitebene und der Prozesssteuerung auf der Prozessleitebene nennt UHLIG [56] als zusätzliche Funktionen die Produktionsdisposition und die Rezeptverwaltung (bzw. Chargenverwaltung). An anderer Stelle lokalisiert er auf der Betriebsleitebene eine „feine“ und auf der Produktionsleitebene eine „grobe“ Produktionsdisposition, durch die eine „detaillierte Festlegung der Ablauforganisation“ auf Chargenebene [56] sowie „die langfristige Bereitstellung von Ressourcen [...] in einem Wochenrhythmus“ [56] erfolgt.

POLKE [46] beschreibt in einem Systementwurf für die operative Betriebsführung verfahrenstechnischer Betriebe ähnliche Funktionen, durch die aufgrund von Anforderungen seitens Produktionsplanung, Produktlogistik und Anlagenbetreuung sogenannte „Maßnahmen“ definiert, disponiert und anschließend aktiviert und ausgeführt werden. Im Kontext der Disposition unterscheiden ARENDT UND POLKE [46] dabei statische Datenbestände zur Anlagen- und Verfahrensdefinition und dynamische Datenbestände, wie Plandaten und Materialbeständen.

SCHARBRODT [48] demonstriert die „Feinplanung“ (vgl. Bild 15) am Beispiel einer fiktiven Brauerei, wobei ausgehend von Produktionsanforderungen Lose bzw. Chargen gebildet und diese unter Beachtung detaillierter Restriktionen eingeplant werden. Dabei wird eine näherungs-



weise Optimierung hinsichtlich Terminvorgaben, Reihenfolge-Präferenzen, Umstellzeiten und Bestandsverlauf verfolgt.

Wie detailliert, wie präzise und mit Bezug zu welchen Bewertungskriterien, Restriktionen und Freiheitsgraden die Produktionsablaufplanung in der Praxis gehandhabt wird, hängt analog zur Anlagenplanung (vgl. 3.3.3.1, S. 39) davon ab, was technisch möglich, aber vor allem auch wirtschaftlich sinnvoll ist. Abhängig vom angewendeten Detaillierungsgrad kann bzw. muss die Produktionsablaufplanung mehr oder weniger intensiv mit den „unteren“ Ebenen kommunizieren. Der Funktionsumfang von für verfahrenstechnische Anlagen mit Rezeptfahrweise gebräuchlichen Prozessleitsystemen überschneidet sich dabei vor allem mit den Aufgaben der Disposition und Steuerung der Produktion. Angesichts der derzeit verstärkt angestrebten totalen Integration sämtlicher produktionsbezogener Informationsflüsse und Arbeitsabläufe in MES<sup>1</sup>-Konzepten erscheint der Versuch einer allgemeingültigen detaillierten Definition und Isolation von Teilaufgaben innerhalb der Produktionsablaufplanung wenig sachdienlich.

## 3.4.2 Produktionsplanung in Brauereien

### 3.4.2.1 Rahmenbedingungen der Produktionsplanung in Brauereien

Die Produktionsplanung beschäftigt sich nach WÖHE [70] „besonders mit Betrieben, die ein Sortiment standardisierter Erzeugnisse anbieten“ und diese auf Lager produzieren. Nachdem dies im Unterschied zur Auftragsproduktion im Brauereibereich absolut üblich ist, spielt die Produktionsplanung eine umso wichtigere Rolle, je komplexer das Sortiment strukturiert ist und je knapper die Lagerbestände geführt werden sollen oder, z. B. mangels Lagerkapazität, müssen. Besondere Aspekte und Probleme der Produktionsplanung in Brauereien beleuchtet SPITZ [54], der sich dabei auf den langwierigen Produktionsprozess, die Unsicherheit über die reale Absatzentwicklung und die saisonalen Absatzschwankungen bezieht.

Wie Bild 16 zeigt wird die Bierherstellung vorwiegend nach *prognostizierten* („Plan“), die Bierabfüllung nach *tatsächlichen* („Ist“) Absatzzahlen geplant. Zumindest für „gängige“ Hauptsorten kann im Vollgutlager meist nur eine begrenzte Reichweite vorgehalten werden, sodass die Bierabfüllung auf kurzfristige Planänderungen und Planabweichungen innerhalb von Tagen oder sogar Stunden reagieren muss. Dagegen bedingt der Prozess der Bierherstellung eine erhebliche „Totzeit“ von mehreren Wochen für die Bereitstellung von abfüllfertigem Bier. Während die Speicherkapazität des Lagerkellers über dessen primäre technologische Funktion hinaus durchaus zum mittelfristigen Puffern genutzt werden kann (vgl. S. 22), sollte abfüllfertiges Bier im Drucktank nur tageweise gepuffert werden (vgl. Abschnitt 2.2.4), was die Filtration eng an die Abfüllung bindet.

---

<sup>1)</sup> engl.: *manufacturing execution system*

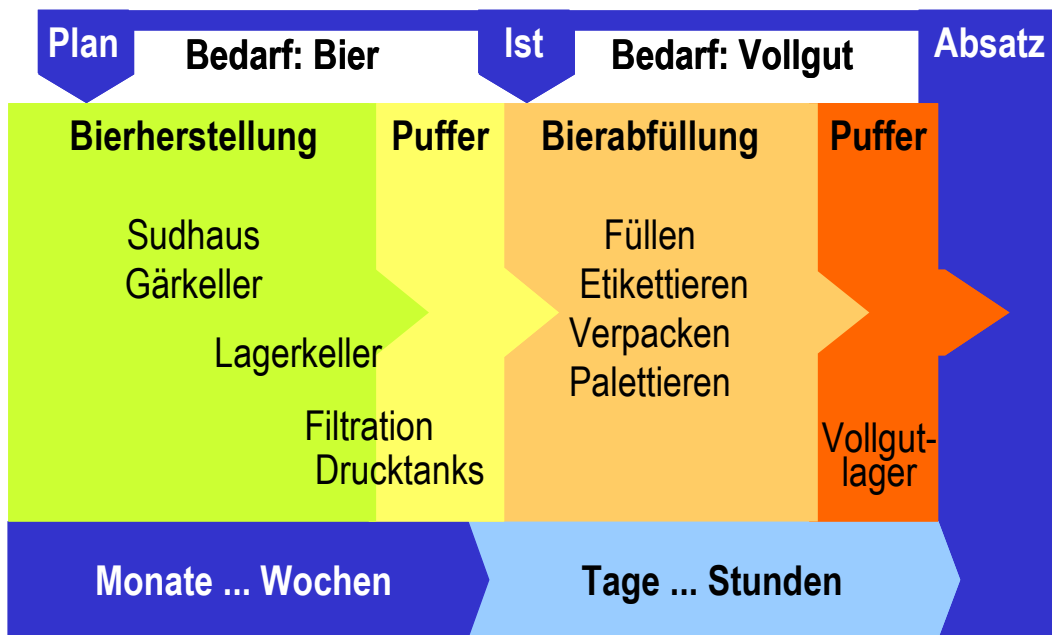


Bild 16: Absatzorientierte Produktionsplanung von Bierherstellung und Bierabfüllung

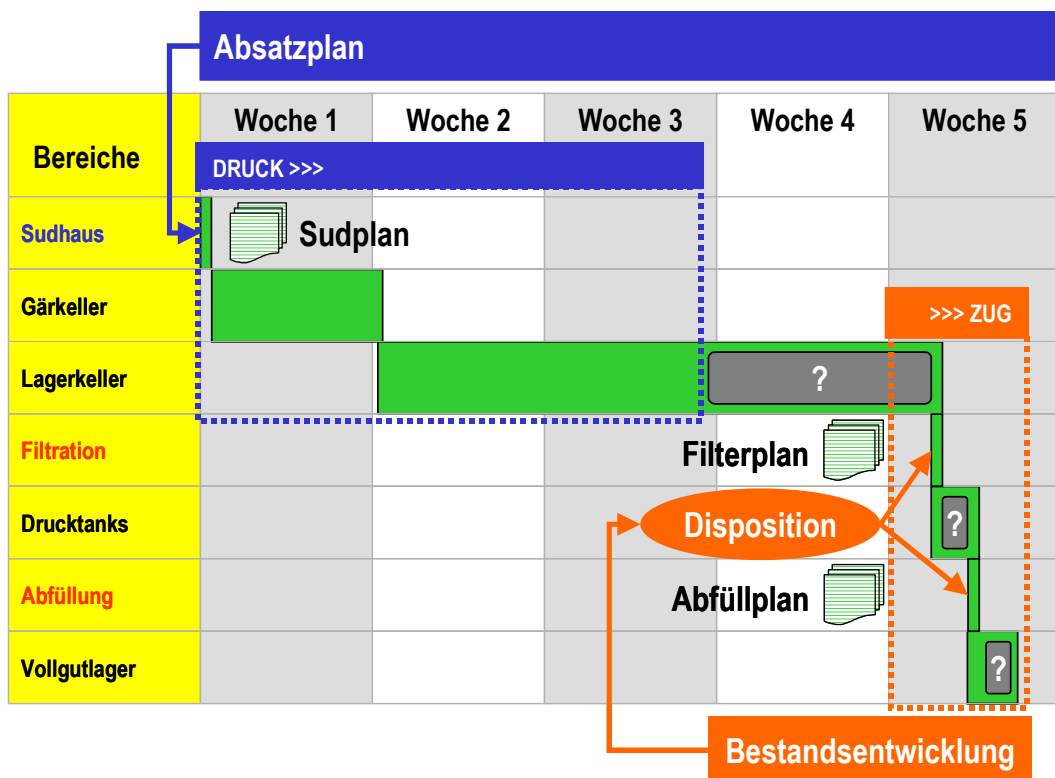


Bild 17: Überblick über die zeitlichen Zusammenhänge bei der Produktionsplanung in der Brauerei  
Das Symbol „?“ kennzeichnet Belegungen von variabler Dauer.

Bild 17 verdeutlicht die zeitlichen und logischen Zusammenhänge für die Planung von Bierherstellung und -abfüllung anhand eines schematischen Gantt-Charts. Der aus dem Absatzplan abgeleitete Sudplan dominiert nach dem Prinzip einer Drucksteuerung den Produktionsablauf weitgehend bis zum technologisch definierten Endzustand im Lagertank. Danach steht das Bier für die Filtration zur Verfügung. Abfüllplan und Filterplan werden zunächst wochenweise grob koordiniert und danach pro Tag oder Schicht im Detail disponiert. Dabei können neben den grundsätzlichen technischen und organisatorischen Zielvorgaben und Rahmenbedingungen in den Abteilungen Filtration, Drucktanks und Abfüllung und ggf. der begrenzten Lagerkapazität für Voll- und Leergut auch wenig vorhersehbare Faktoren wie Eilaufträge, Anlagenstörungen, sowie für Mehrwegprodukte die Verfügbarkeit und Sortierung von Leergut berücksichtigt werden. Die Abläufe vom Lagerkeller bis zum Vollgut-Lager wurden hier als „zugesteuert“ gekennzeichnet, da Filtration und Abfüllung vor allem auf das kurzfristige Absatzgeschehen und die resultierende Bestandsentwicklung im Lager reagieren.

Allerdings bestehen auch in den Bereichen der Würzproduktion und Fermentation gewisse Spielräume und Nebenbedingungen, die eine detaillierte Disposition erfordern können. Dies betrifft einerseits Materialkreisläufe im Prozess (Kohlendioxid-Rückgewinnung, Wärmehaushalt, Hefewirtschaft, Glattwasser- und Heißtrubverwertung) und andererseits die Belegung von „geteilten“ Ressourcen (Leitungswege, Fördertechnik, Kühl- und Heizvorrichtungen, Reinigungskapazitäten), für die Zugriffskonflikte bzw. Warteschlangen-Effekte zu vermeiden sind. Ob und ggf. mit welchem Zeithorizont solche Aspekte Gegenstand der Produktionsplanung für das Sudhaus und die Fermentation sind, hängt dabei davon ab, wie kritisch die Auslastung der betreffenden Ressourcen in Relation zur jeweiligen Lastsituation im Gesamtsystem einzustufen ist.

### 3.4.2.2 Systeme zur Produktionsplanung in Brauereien

Nachdem die CIM-Idee (*computer integrated manufacturing*), die „den integrierten EDV-Einsatz in allen mit der Produktion zusammenhängenden Betriebsbereichen“ in der Fertigungsindustrie [54] zum Ziel hat, schon vor einigen Jahrzehnten als CIP (*computer integrated processing*) für die Prozessindustrie adaptiert wurde, wächst die Bedeutung einer systematischen Integration der Informationssysteme auch in industriell arbeitenden Brauereien mit ihrer typischen Kombination aus Fertigungs- und Verfahrenstechnik. Nach AHRENS UND POLKE [46] lässt sich in Zusammenhang mit CIP in der Prozessindustrie besonders für den Bereich der Produktionsleitung belegen, dass „Information zum Produktionsfaktor geworden ist.“

Planungsaufgaben sind im Kontext von CIM bzw. CIP weitgehend auf den Komplex PPS (Produktionsplanung und -steuerung) konzentriert. Mit den Themen CIM und PPS im Brauereiumfeld haben sich KEHL [27], SPITZ [54] und SCHARBRODT [48] intensiv beschäftigt. Hier sollen daher nur ausgewählte Aspekte aufgegriffen werden. Hinsichtlich der Literatur zum Thema PPS sei auf SCHARBRODT verwiesen, der warnt:

„Hinsichtlich Aufbau und Abwicklung der PPS existiert ein undurchschaubares Dickicht an Definitionen, Ansätzen und Meinungen.“ [48]

Dieses „Dickicht“ resultiert nicht zuletzt aus dem heterogenen Umfeld der Produktionsplanung, das aufgrund der großen vertikalen Spannweite im Unternehmen (vgl. Bild 14, S. 42) von der Koexistenz, Konkurrenz bzw. Konfrontation unterschiedlicher Perspektiven, Denkweisen, Begriffswelten, Ansprüche, Zielsetzungen und Verantwortlichkeiten und einem grundsätzlichen Konflikt zwischen „Theorie“ und „Praxis“ bzw. „Theoretikern“ und „Praktikern“ geprägt ist. Daneben ist auch der Transfer von Ergebnissen und Erfahrungen zwischen Branchen oder Betrieben problematisch, da das individuelle Einsatzumfeld entscheidend für die Praxistauglichkeit einer bestimmten PPS-Lösung sein kann. In verfahrenstechnischen Betrieben findet man für die operative Planung häufig eine „unternehmensspezifisch erstellte Computerunterstützung“, wenn auch ein zunehmender Bedarf nach Standardlösungen festzustellen ist, die den speziellen Planungsanforderungen der Produktionstechnologie gerecht werden [17].

Für den besonderen Bedarf der Brauerei stellt SCHARBRODT [48] einen Ansatz für ein branchenspezifisches PPS-System vor, an dem die Besonderheiten der Produktionsplanung im Brauereibereich und spezifische Lösungsmöglichkeiten gezeigt werden. Als Charakteristika für die Produktionsplanung in der Brauerei werden die Planung mehrstufiger Prozesse, das Anwenden hierarchischer Zeitraster (Tage, Wochen, Monate) für eine kombinierte Kapazitäts- und Belegungsplanung, die systematische Unterscheidung von Haupt- und Randsorten im Sortiment und ein rollierender Zeithorizont für eine Belegungsplanung mit fixierten Aufträgen genannt. Zur Produktionsprogrammplanung bzw. Grobplanung hält er fest:

„Aufgrund ihrer Orientierung an die höheren Managementebenen brauchen produktionstechnische Gegebenheiten in der Grobplanung nicht berücksichtigt zu werden, sodass häufig ein einziges Grobplanungssystem über alle Fertigungsstufen genügt.“

Für diese Aufgabe sehen übergeordnete ERP<sup>1</sup>-Systeme ein weitgehend unspezifisches Standardinstrumentarium vor. SCHARBRODT [48] nutzt für die Feinplanung eine Bibliothek von parametrisierbaren Algorithmen bzw. einen Algorithmenbaukasten, mit deren Hilfe das Scheduling für jede Prozessstufe individuell gestaltet werden soll. Analog zur Darstellung in Bild 17 werden dabei zwei zunächst unabhängige Planungsstufen unterschieden, die über die Sekundärbedarfsplanung verknüpft werden: Die erste Stufe dient der Planung der Würzproduktion, aus der die Belegung der Fermentationstanks abgeleitet wird. In der zweiten Stufe wird die Abfüllung für Haupt- und Randsorten geplant, die durch eine untergeordnete Filter- und Drucktankbelegung ergänzt werden kann. SCHARBRODT [48] selbst verweist in Bezug auf die untergeordneten Teilpläne für Fermentation, Filtration und Drucktanks auf starke Vereinfachungen, was einen weitgehenden Entwicklungsbedarf andeutet.

---

<sup>1</sup> engl.: *enterprise resource planning*

Mittlerweile bieten immer mehr Software- und Systemhäuser branchenspezifische „Getränkösungen“ an, die teilweise auch die Produktionsplanung abdecken (z. B. [69]). Diese Ansätze basieren häufig auf Adaptionen aus mehr oder weniger verwandten Branchen (z. B. Chemie, Pharma, Fertigung) und unterscheiden sich z. B. hinsichtlich der grundsätzlichen Konzeption (von der maßgeschneiderten Individuallösung bis hin zum durch den Endkunden konfigurierbaren Baukastensystem), dem Detaillierungsgrad der Planung (von der reinen Mengenbilanzierung bis zum hochauflösenden „*detailed scheduling*“) und den Integrationsmöglichkeiten mit bzw. den Anforderungen an das Systemumfeld (vom „*stand-alone*“-Produkt bis zum ERP-gestützten Planungsmodul mit minimaler eigener Stammdatenhaltung).

In der Praxis bewältigen die Produktionsplaner in Brauereien beliebiger Größe – wie in vielen anderen Branchen auch – ihr Tagesgeschäft häufig erfolgreich auf der Basis von selbst erstellten meist sehr umfangreichen und komplexen, gewachsenen Lösungen auf der Basis von Tabellenkalkulations- und/oder Datenbank-Applikationen, die ggf. über Schnittstellen Daten mit ERP-, Lagerverwaltungs- oder Prozessleitsystemen austauschen. Sofern die Planungsproblematik dabei nicht die technische Leistungsfähigkeit der verwendeten Basissoftware überstrapaziert, ist ein intelligent angelegter und souverän gehandhabter „Eigenbau“ einem Umfeld, das ständig schnelle und flexible Reaktionen auf veränderliche Rahmenbedingungen erfordert, unter Umständen eher angemessen bzw. besser gewachsen. Nicht selten bilden deshalb selbst in Großbetrieben sogar „Bleistift und Papier“ die operative Endstufe der Produktionsplanung.

## 4 Simulation als Hilfsmittel der Planung

Dieses Kapitel stellt die Simulation als Modellierungstechnik und besonderes Hilfsmittel der Planung vor. In den folgenden Abschnitten soll daher zunächst ein Überblick zur Definition, zu den Eigenschaften und zum Nutzen von Modellen in der Planung vorausgeschickt werden. Anschließend werden zum besseren Verständnis der nachfolgenden Kapitel die Grundlagen der im Zuge dieser Arbeit angewendeten Techniken vorgestellt, ohne dass die umfangreichen Felder der Modellierung oder der Simulation hier erschöpfend diskutiert werden könnten. Nicht zuletzt reicht die Bedeutung von Modellen weit über den Bereich der Planung hinaus.

### 4.1 Planen mit Modellen

Der Begriff „Modell“ geht auf die Verkleinerungsform *modellus* des lateinischen Ausdrucks *Modulus* (Maßeinheit, Standard) zurück. Im modernen Sprachgebrauch kann ein Modell sowohl ein *Urbild* (z. B. Fotomodell), ein *Abbild* (z. B. Modellauto) oder einen *Typ* (z. B. Automodell) darstellen. In Zusammenhang mit der Planung überwiegt dabei der imitierende Charakter im Sinn eines Abbilds, sogar wenn das Modell lange vor dem realen Bezugssystem entsteht, oder das geplante Vorhaben nie umgesetzt wird. Schließlich soll das Modell die Eigenschaften des zu errichtenden Systems vorwegnehmen, also abbilden, und nicht umgekehrt. Die enge Verwandtschaft zwischen Modell- und Systembegriff wird auch in der folgenden Definition des Modells nach DIN 19222 deutlich:

[Ein Modell ist eine] „Abbildung eines Systems oder Prozesses in ein anderes begriffliches oder gegenständliches System, das aufgrund der Anwendung bekannter Gesetzmäßigkeiten, einer Identifikation oder auch getroffener Annahmen gewonnen wird und das System oder den Prozeß bezüglich ausgewählter Fragestellungen hinreichend genau abbildet.“ [11]

#### 4.1.1 Aspekte der Modellbildung

Als Hauptmerkmale aller Modelle werden in Verbindung mit der zentralen Eigenschaft der *Abbildung* die *Verkürzung* und die *Pragmatik* genannt [46] [54].

Der Begriff „Plan“, der sich vom lateinischen *planus* (eben, flach) ableitet, bezog sich ursprünglich auf Grundrisse oder Landkarten, also zweidimensionale, vereinfachte Abbildungen der dreidimensionalen Welt [21], was bereits einen wesentlichen Schritt der Modellbildung, die Abstraktion, impliziert. Diese beruht auf folgenden Techniken [65]:

„Verallgemeinerung, Entnahme des Allgemeinen aus dem Besonderen, Außerachtlassen von Unerwünschtem, Loslösung vom Gegenständlichen, Ableitung des Wesentlichen vom Zufälligen“

Auch der Gebrauch des Begriffs „Plan“ im übertragenen Sinn, z. B. in Bezug auf ein Vorhaben oder ein Handlungsschema bzw. dessen Dokumentation beinhaltet die Abstraktion der geplanten

Abläufe in einzelne, wesentliche Aktionen und Vorgänge, die im Plan in Beziehung zueinander gebracht werden. Generell kann ein Plan als „geordneter Komplex von Informationen“ bezeichnet werden [18].

Bild 18 zeigt in Anlehnung an KÜSTER [31] Stufen und Schritte der Modellbildung auf dem Weg von einem realen System über gedankliche Modelle zu einem operativen Modell, die abhängig vom konkreten Anwendungsfall vollständig oder teilweise zu absolvieren sind. Der Begriff des *formalen* Modells wird in der Modelltheorie in Kontrast zu *anschaulichen* Modellen gebraucht [54]. Vor allem mit Blick auf die Gestaltungsmöglichkeiten für Simulationsmodelle sei hier allerdings darauf hingewiesen, dass gerade die Anschaulichkeit eines formalen Modells über seinen praktischen Nutzen oder zumindest seine Nutzung in der Praxis entscheiden kann. Darüber hinaus können auch rein anschauliche Modelle operativ genutzt werden wobei der Schritt der „Formalisierung“ nach Bild 18 entfällt.

Verschiedene Merkmale von Modellen bzw. einer modellgestützten Arbeitsweise sollen hier am Beispiel einer Landkarte illustriert werden. Diese bildet in der Regel einen bestimmten Ausschnitt der *dreidimensionalen* Erdoberfläche<sup>1</sup> nach einer bestimmten Vorschrift *zweidimensional* ab. Abhängig vom Verwendungszweck werden dabei nur ausgewählte Eigenschaften der realen Welt in unterschiedlicher Präzision und Gewichtung wiedergegeben (Küstenlinien, Flussläufe, Verkehrswege, usw.). Aber nicht nur die gezielte Reduktion bzw. Selektion von Details, sondern auch die Abbildungsvorschrift ist unter pragmatischen Gesichtspunkten auf den Verwendungszweck abzustimmen. So werden für Navigationskarten in Polnähe und in Äquatornähe unterschiedliche Projektionsverfahren bevorzugt. Reale physische Gegebenheiten werden stilisiert oder symbolisch dargestellt (Wälder, Siedlungsgebiete, Hochbauten). Karteneinträge können sich aber auch auf immaterielle Gegebenheiten (Staatsgrenzen, Bauvorhaben, Höhenlinien, Fahrverbindungen, usw.) beziehen oder unscharf abgegrenzte Strukturen zu Zonen mit Objektcharakter zusammenfassen.

Das Beispiel der Landkarte als Hilfsmittel zur Orientierung oder Planung, z. B. von Reisen oder Feldzügen, veranschaulicht weitere Aspekte, die auch für viele andere Modelle zutreffen:

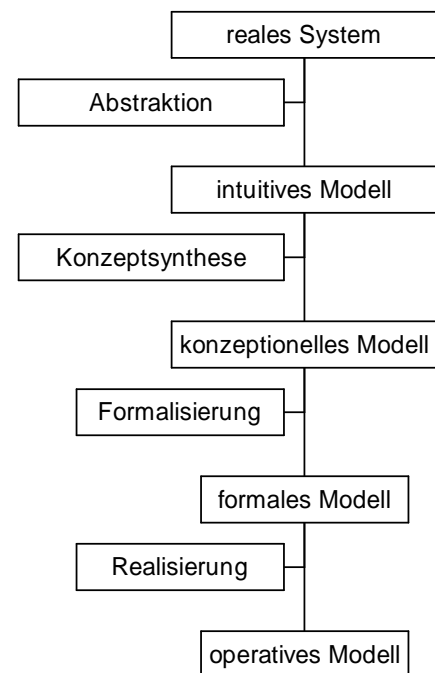


Bild 18: Stufen der Modellbildung nach KÜSTER [31]

<sup>1)</sup> Auch der Begriff „Erdoberfläche“ bezeichnet ein rein gedankliches Konstrukt, das einen nicht unerheblichen Abstraktionsschritt voraussetzt.

- Es wird meist nur ein „überschaubarer“ Ausschnitt der Erdoberfläche durch einen geeigneten Verkleinerungsmaßstab in einem handlichen Format wiedergegeben.
- Die begrenzte und selektive Detailtreue schafft Transparenz und Übersicht und erleichtert das Erstellen und Pflegen der Karte.
- Eine flache, zweidimensionale Karte ist im Vergleich zu einem dreidimensionalen topographischen Modell relativ einfach zu (re-)produzieren und zu transportieren.
- Die Karte kann gezielt mit Informationen angereichert werden, die im realen System nicht oder nur implizit enthalten sind (z. B. Entfernungsangaben, Wetterdaten).
- Individuelle Erweiterungen der Karte (Ergänzungen, Korrekturen, einsatzspezifische Informationen wie Wegpunkte) können vom Anwender permanent oder reversibel vorgenommen werden.
- Abhängig von der gewählten Projektionsmethode (Winkeltreue, Längentreue, usw.) ermöglicht die Karte den Einsatz bestimmter geometrischer Werkzeuge und Methoden.
- Verwenden mehrere Benutzer den gleichen Kartensatz oder sogar dieselbe(n) Karte(n), kann das einheitliche Referenzsystem die Kommunikation wesentlich erleichtern, selbst wenn für jeden Anwender andere Merkmale wichtig sind.
- Der Ausschnitt und die inhaltliche Gestaltung der Karte müssen dem Verwendungszweck angemessen, Vereinfachungen und Unzulänglichkeiten sollten allen Benutzern bekannt und bewusst sein.
- Dieselbe Karte kann für vielfältige Zwecke eingesetzt werden (Standortbestimmung, Ziel-suche, Bewerten von alternativen Routen, Fortschrittskontrolle, Dokumentation).
- Allein die Existenz einer prinzipiell aussagekräftigen Karte löst ein Orientierungs- oder Planungsproblem keineswegs. Nur durch die korrekte Interpretation der in der Karte enthaltenen Informationen in Relation zum realen System (z. B. Standort, Blickrichtung, Längenmaßstab) und ggf. in Kombination mit besonderen Auswertungsmethoden entfaltet die Karte ihr volles Potenzial als Hilfsmittel.

#### 4.1.2 Modellgestütztes Problemlösen

Grundsätzlich bilden gedankliche Modelle die Basis jeglichen problemlösenden Denkens. Da eine am Modell entwickelte Lösung dabei nur das Modellproblem löst, hängt die Qualität einer Lösung wesentlich davon ab, ob das Modell alle relevanten Merkmale des Originalproblems korrekt wiedergibt [38] und ob die am Modell gewonnenen Erkenntnisse richtig interpretiert und auf die Realität übertragen werden (vgl. Bild 19).



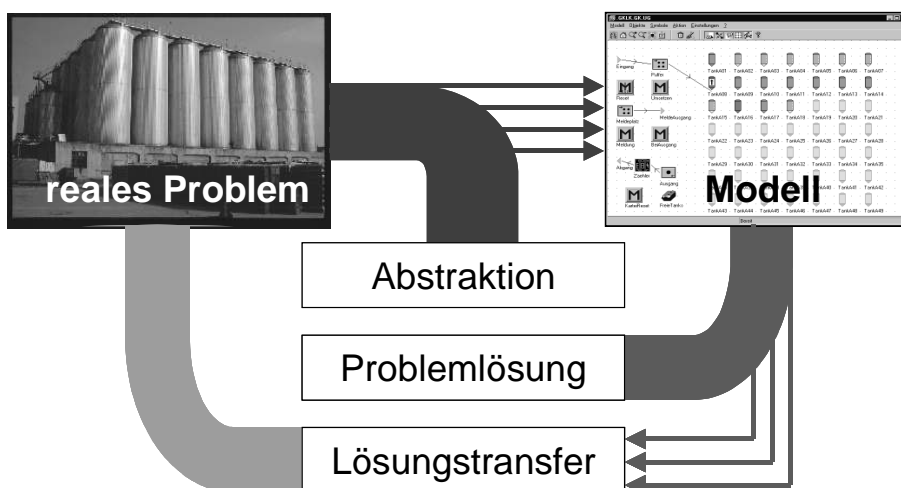


Bild 19: Modellgestütztes Problemlösen

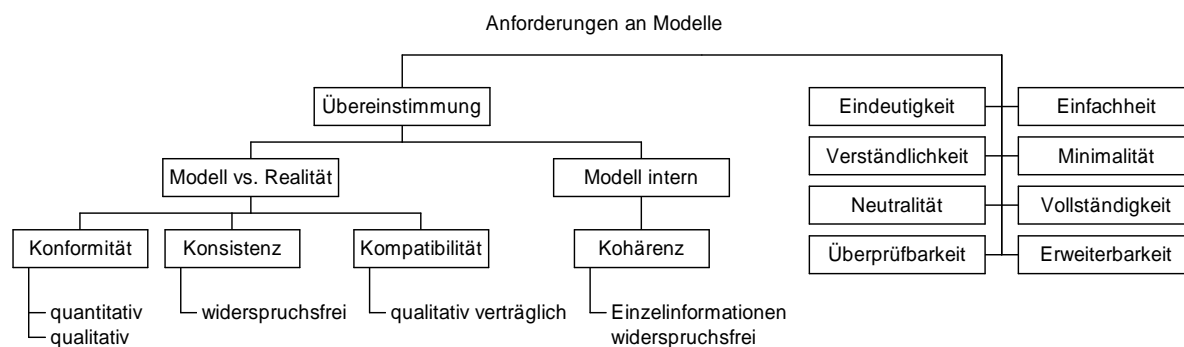


Bild 20: Anforderungen an Modelle nach KÜSTER [31]

Nach BOMZE [8] bestehen als allgemeine Anforderungen an Modelle Genauigkeit, Robustheit, Einfachheit, Flexibilität und Transparenz, wobei diese teilweise in Konkurrenz zueinander stehen, sodass ein Modell immer einen Kompromiss zwischen diesen Teilzielen darstellt. Bild 20 gibt weitere Anforderungen an Modelle nach KÜSTER [31] wieder. Zur zentralen Rolle der Modellbildung für die industrielle Planung stellt ARNOLD [3] fest:

„Eine der häufigsten kreativen Aufgaben des Ingenieurs besteht darin, die mit wissenschaftlichen Methoden meist nicht exakt abzubildende Realität mittels Abstraktionen und Vereinfachungen in sogenannten *Modellen* darzustellen“

Auch wenn Modelle ein wichtiges Hilfsmittel zum Lösen von Problemen darstellen, ist zu beachten, dass sie dabei vor allem eingesetzt werden, um Voraussetzungen für die Anwendung bestimmter Lösungsverfahren oder Algorithmen zu schaffen, deren problemspezifische Anwendbarkeit und Wirksamkeit erfolgsbestimmend ist. Verschiedene modellgestützte Methoden und deren Einsatz zur Planung von Produktionssystemen diskutiert KOŠTURIK [29]. BOMZE [8]

behandelt Relationen zwischen unterschiedlichen Modelltypen, Lösungszugängen und Planungsphasen im Kontext des *Operations Research* (OR).

### 4.1.3 Motivation für den Einsatz von Modellen in der Planung

Abhängig von der grundsätzlichen Aufgabenstellung bzw. dem Zweck der Modellentwicklung kann man zwischen *Erklärungsmodellen* zur Analyse bestehender Systeme und *Gestaltungsmodellen*, die zur Planung von Systemen eingesetzt werden, unterscheiden [29]. In beiden Fällen dienen Modelle zur „leichteren Informationsableitung über einen zu betrachtenden Weltausschnitt“ [31]. Der primäre Nutzen eines Modells ergibt sich dabei direkt aus der Verkürzung im Zuge der Abstraktion, durch die komplexe Zusammenhänge handhabbar werden, deren „vollkommene Beschreibung in allen Einzelheiten nicht möglich und auch wegen des damit verbundenen Aufwandes nicht sinnvoll ist“ [8]. Soweit ein reales System existiert, das für empirische Experimente als Alternative zum Modelleinsatz überhaupt in Frage kommt, erleichtern Modelle den Erkenntnisgewinn fast immer durch einen geringeren Zeitwand und/oder geringere Kosten [8] [29].

Im Kontext der *Anlagenplanung* sollen reale technische Systeme neu aufgebaut, erweitert oder restrukturiert werden, sodass das reale System, wenn überhaupt vorhanden, für empirische Experimente ungeeignet ist. Eine denkbare Ausnahme bildet der geplante Abbau von Produktionskapazität, der z. B. durch das vorübergehende Einhalten virtueller Restriktionen im laufenden Betrieb praxisnah „durchgespielt“ werden kann. Unabhängig von der Planungsaufgabe kann es hilfreich sein, bereits existierende Systeme zu analysieren, die dem Zielsystem möglichst ähnlich sind. Doch selbst wenn geeignete reale Vorbildsysteme für ein Anlagenprojekt existieren, können aus Zeit- und Kostengründen kaum ausreichend viele reale Experimente ausgeführt werden, um dem Variantengrundsatz (vgl. Abschnitt 3.3.3.3) gerecht zu werden.

Bei einem Modelleinsatz im Kontext der *Produktionsplanung* ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob ein Modell lediglich die Produktionsabläufe bzw. das *Durchführungssystem* repräsentieren soll oder ob darüber hinaus das *Planungssystem* selbst als ggf. veränderlicher Bestandteil des Modells betrachtet wird [20].

Im ersten Fall werden Modelle als operative Komponente der Produktionsplanung eingesetzt, um die Plausibilität der Planungsergebnisse durch eine „Proberechnung“ über den zu erwartenden Produktionsablauf zu überprüfen. Einen vergleichbaren Ansatz fordert EPPLE [46] für die sichere Disposition von operativen Maßnahmen in verfahrenstechnischen Betrieben. Da diese Verifikation der Planung per Definition parallel zum Betrieb des realen Systems stattfindet, kann sie nur anhand eines Modells vollzogen werden.

Im zweiten Fall soll die dynamische Interaktion zwischen Planungssystem und Durchführungssystem in einer virtuellen Testumgebung analysiert oder optimiert werden. Selbst wenn dabei kein Zeitvorteil gegenüber entsprechenden Versuchen im realen System bestehen sollte, spricht

das Kostenrisiko bei entsprechenden experimentellen Eingriffen in die laufende Produktion für den Einsatz von Modellen. Generell ist bei Untersuchungen in realen Produktionssystemen von „beschränkten Möglichkeiten aktiven Experimentierens am technologischen Objekt“ [64] auszugehen.

#### 4.1.4 Eigenschaften und Klassen von Ersatzmodellen

Modelle können nach vielfältigen Kriterien klassifiziert werden, wie verschiedene Ansätze belegen [8] [20] [29] [31] [65]. Verbreitet sind Klassifikationen in Form von hierarchischen Baumstrukturen, Netzwerken oder Tabellen, wobei trotz begrifflicher Überschneidungen und Parallelen zwischen den ausgewerteten Quellen weder die Auswahl noch die relative Anordnung der Merkmale und Ausprägungen einheitlich oder konsistent ausfällt. Auf eine derartige Darstellung und den Anspruch auf Vollständigkeit soll hier daher ausdrücklich verzichtet werden. Stattdessen werden in den folgenden Abschnitten gezielt ausgewählte Kategorien und Gliederungsaspekte für Modelle vorgestellt, die neben der Simulation als Ersatzmodelle für die Planung verwendet werden.

Ein verbreitetes grundsätzliches Kriterium zur Klassifikation von Modellen unterschiedlicher Art ist das Zufallsverhalten, wobei meist *deterministische* und *stochastische* Modelle unterschieden werden [8] [29]. In Bezug auf Modelle von Produktionssystemen steht der Stellenwert des Zufalls häufig in engem Zusammenhang mit dem Abstraktionsgrad. Lulay [34] stellt ein dreistufiges Modellkonzept vor, in dem er unterscheidet zwischen rein deterministischen Grobmodellen, Warteschlangenmodellen mit stochastischem Auftragsaufkommen bis hin zu Detailmodellen, in denen die Bearbeitungszeiten, das Störverhalten von Maschinen, Steuerungsentscheidungen und die Qualitätsmerkmale der Produkte vom Zufall bzw. von Zufallszahlen abhängen können.

##### 4.1.4.1 Physikalische Modelle

Das wesentliche Merkmal aller *physikalischen* Modelle ist die materielle, körperliche Abbildung des darzustellenden Systems, weshalb diese auch als *physische* Modelle bezeichnet werden. Eine strenge Auslegung der Begriffe könnte vermuten lassen, dass einerseits die *Physik* und andererseits die *Physis* eines Originalsystems modelliert wird. Tatsächlich beziehen sich beide Termini meist auf dieselbe Modellklasse, was nicht zuletzt damit zusammenhängen dürfte, dass im Englischen für beide Varianten das Adjektiv *physical* verwendet wird. Hier soll daher einheitlich von physikalischen Modellen die Rede sein.

Innerhalb der physikalischen Modelle ist zwischen verhaltensanalogen und physikalisch analogen (z. B. maßstäblichen) Modellen zu unterscheiden, die in den vergangenen Jahrzehnten als Planungshilfen und Marketinginstrumente u. a. zur Raumplanung von Produktionsanlagen oder zur Demonstration von Funktionsprinzipien dienten [31]. Heute findet man physikalische Modelle vor allem als repräsentativen Blickfang oder als Anschauungsobjekt in Besucherzentren sowie

auf Fachmessen. Aber auch in der Forschung und Entwicklung werden noch maßstäbliche Modelle z. B. für strömungstechnische Experimente in Wind- oder Wellenkanälen benutzt [31] [16].

Bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen wurden früher dreidimensionale physikalische Modelle vor allem in Großprojekten für die Layout- und Rohrleitungsplanung eingesetzt [7], während diese Aufgaben heute weitgehend mit Computerunterstützung bearbeitet werden.

Während durch die physikalische Repräsentation komplexe Sachverhalte buchstäblich „plastisch“ und „greifbar“ werden, bringt die Bindung an die Physik der realen Welt auch Einschränkungen hinsichtlich der Handhabung und Flexibilität der Modelle mit sich: In Verbindung mit dynamischen Prozessen ist das Zeitverhalten mehr oder weniger stark an die Echtzeit gekoppelt, was sowohl vorteilhaft als auch nachteilig sein kann. Aufbau und Umbau physikalischer Modelle erfordern oft einen hohen Aufwand hinsichtlich Zeit, Material und Technik. Allgemeine Aspekte spiegeln sich auch in den folgenden Aussagen zum Einsatz von physikalischen Modellen in der Brauereianlagenplanung [45]:

„Ein Modell lässt weniger Missverständnisse aufkommen, und dort wo sie vorhanden sind, lassen sie sich leichter klären.“

„Mit Hilfe eines Modells kann man allen beteiligten Stellen die Gestaltung der Anlage anschaulich machen und evtl. sich widersprechende Forderungen einzelner Planer oder Planungsgruppen in Einklang bringen.“

„Leider sind Modelle nicht gerade billig.“

#### 4.1.4.2 Mathematische Modelle

Im Unterschied zu den physikalischen Modellen fehlt mathematischen Modellen häufig die einleitend angesprochene unmittelbare Anschaulichkeit und Transparenz [29], bedingt durch eine für „Nicht-Mathematiker“ oft ungewohnte Notation und einen besonders hohen Abstraktionsgrad bei der eigentlichen Problemrepräsentation. Allerdings kann man bereits einfache „Faustformeln“ und funktionale Zusammenhänge für die Planung als mathematische Modelle betrachten. Konventionelle Ansätze für die systematische Brauereiplanung, wie sie bei PETERSEN [45], UNTERSTEIN [63] und VEY [66] beschrieben werden, beruhen weitgehend auf relativ einfachen mathematischen Modellen, in denen Kennzahlen für die Planung gebildet und miteinander verknüpft werden, um mit einem möglichst geringen Bedarf an Detailinformation bereits in frühen Planungsstadien Richtwerte für die Anlagendimensionierung ermitteln zu können. Während PETERSEN [45] die Berechnungsmethoden für einzelne Prozessstufen noch weitgehend isoliert betrachtet, entwickelt UNTERSTEIN [63] eine geordnete Planungssystematik als „Grundkonzeption einer Brauereiplanung“, die er als Vorstufe einer „DV-gestützten Anlagenplanung“ bezeichnet. Diesen Gedanken konkretisiert VEY [66], der ein Programm für die rechnergestützte Brauereiplanung auf der Basis der Tabellenkalkulation vorstellt. Als wesentliche Vorteile eines solchen übergreifenden Rechenschemas nennt UNTERSTEIN [62]:

- den systematischen Zugriff auf einmalig einzugebende Kenngrößen,
- die „Geschwindigkeit, mit der die Ergebnisse und auch eventuelle Änderungen und Ergänzungen im Rahmen der Projektbearbeitung zur Verfügung stehen“, sowie
- die unmittelbare Transparenz von Wechselwirkungen zwischen Detailentscheidungen in unterschiedlichen Bereichen.

Gleichzeitig weist er mehrfach auf die Sorgfaltspflicht beim Ermitteln der individuellen Kenngrößen und allgemeinen Modellparameter hin, für die er teilweise eine einmalige grafische Ermittlung anhand von Belegungsdiagrammen voraussetzt. Durch diesen wiederum modellierenden und vereinfachenden Schritt wird der komplexe, vor allem durch die Überlagerung paralleler Prozesse bestimmte Betrieb von Brauereianlagen bzw. die bei einer bestimmten Kombination aus Anlagenkonfiguration, Verfahrensvorschriften und Systemlast resultierende Belegung von Ressourcen in den Kontext eines statischen mathematischen Modells eingebunden.

Eine wichtige Teilmenge der mathematischen Modelle bilden die analytischen Modelle, die vor allem in Verbindung mit analytischen Methoden zur systematischen Lösungssuche bzw. Optimierung nützlich sind. Analytische Ansätze sind vor allem attraktiv, wenn das Gesamtproblem so stark vereinfacht werden kann, dass diskrete Entscheidungsvariablen keine wesentliche Rolle spielen, oder wenn Teilprobleme isoliert betrachtet werden können, für die entsprechende Vereinfachungen zulässig sind. In Bezug auf die „Analyse und Synthese“ von Produktionssystemen stellt SCHMIDT [50] dazu allgemein fest:

„Analytische Verfahren sind hinsichtlich der erfaßbaren Systemkomplexität stark eingeschränkt. Diese Tatsache hat dazu geführt, daß heuristische Verfahren entwickelt wurden, die definierte Systemkonstellationen durchspielen.“

Auch KOŠTURIK [29] verweist auf die Komplexitätsgrenzen für analytische Modelle und mehrere Quellen, nach denen diese „nur für die Grobplanung von Produktionssystemen geeignet sind“ und „als eine Vorstufe vor der Simulation angewandt werden“ können.

Für die Brauereiplanung eignet sich der analytische Ansatz demnach nur bedingt, da dabei zahlreiche diskrete Entscheidungsvariablen (z. B. Auswahl von Verfahren, Strategien und Strukturvarianten) sinnvoll aufeinander abzustimmen sind, ohne dass diese Koordination vollständig durch Algorithmen beschrieben und damit automatisiert werden könnte.

RÄDLER [47] befasst sich mit der Modellierung von Abfülllinien und nennt als Argumente für den Einsatz analytischer Ansätze in Verbindung mit entsprechenden Lösungs- und Optimierungsverfahren die Genauigkeit der Lösungen, die kürzere Rechenzeit und das tiefere Systemverständnis im Vergleich zu Approximation und Simulation. Gleichzeitig weist er darauf hin, dass trotz eines starken wissenschaftlichen Interesses an analytischen Modellen für die Produktion in der Praxis überwiegend problemspezifische Simulationsmodelle eingesetzt werden, die

vor allem mit Blick auf umfangreiche Nebenbedingungen besser an die Realität angepasst werden können.

Der Konflikt zwischen der Detailtreue von Modellen und der Anwendbarkeit analytischer Methoden spiegelt sich auch in der Entwicklung der Petri-Netze, die ursprünglich zur grafischen bzw. mathematischen Beschreibung ereignisdiskreter Systeme in der Informationstechnik entwickelt wurden, aber prinzipiell auch in der Produktionslogistik und der Verfahrenstechnik eingesetzt werden können [28] [34] [46] [50] [56]. Ausgehend von einem einfachen primär grafischen bzw. logischen Modellkonzept, das mit Knoten, Kanten und beweglichen „Marken“ die Ablaufstruktur dynamischer Systeme wiedergibt, haben sich durch Erweiterungen unterschiedliche Klassen von Petri-Netzen entwickelt, die immer komplexere Anwendungen ermöglichten. Allerdings greifen die mathematischen Instrumente zur Analyse solcher Netzwerke nur für die „einfachen Netzklassen“, während die höher entwickelten, erweiterten Ansätze nur mit Computerunterstützung ausgewertet werden können [46] [50]. Das Konzept der Petri-Netze bildet dabei mehr oder weniger offensichtlich die Basis für viele erweiterte Modellkonzepte und Mischformen zwischen mathematischen Modellen und Simulationsmodellen [28] [31] [50].

#### 4.1.4.3 Systemtheoretische Modelle

„Der systemtheoretische Zugang versteht das System als Ganzes, die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Teilen des Problems steht im Vordergrund.“ [8]

Das Hauptanliegen der Systemanalyse ist es dabei, „die Systeme durch ein Zerlegen in möglichst elementare Teile mit einfachen Schnittstellen beherrschbar zu machen.“ [54]. Der Prozess der Modellentwicklung zerfällt dabei in zwei komplementäre Abschnitte, die als *Dekomposition* und *Komposition* bezeichnet werden [24] [64]. Zunächst werden in der sogenannten *Dekomposition* Strukturelemente und funktionale bzw. kausale Beziehungen im realen (oder geplanten) System identifiziert, die im Modell als elementare Einheiten wiedergegeben werden sollen. Dabei können über die obligatorische *Abstraktion* hinaus durch das *Klassenbilden* Ähnlichkeiten zwischen Elementen berücksichtigt werden, die durch einheitliche Modellstrukturen repräsentiert werden können. In der anschließenden *Komposition* werden solche Modellelemente hierarchisch angeordnet und ausgestaltet, um das Gesamtsystem abzubilden. SPITZ [54] stellt unterschiedliche methodische Ansätze der Systemanalyse gegenüber, weist aber darauf hin, dass diese auch in Kombination eingesetzt werden können.

Die systemorientierte Perspektive bzw. Vorgehensweise kommt den Anforderungen in der Anlagen- und Produktionsplanung besonders entgegen, da zur Beschreibung der Produktionsabläufe in der Regel ein konkretes und strukturiertes Detailwissen über „elementare“ technische Komponenten und Produktionsmethoden vorliegt, während deren komplexes dynamisches Zusammenspiel in individuellen Projekten, Projektstadien, Planungsvarianten oder Planungsperioden aufgrund der zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten meist eine individuelle Evaluation erfordert. Für dieses Aufgabengebiet stellt die Computersimulation bereits seit mehreren Jahrzehnten

Werkzeuge und Methoden bereit, deren Leistungsfähigkeit und Akzeptanz mit der wachsenden Verfügbarkeit von Rechenkapazität stetig zunimmt [15] [20] [24] [29]. Auf die Simulation von Produktionssystemen geht der folgende Abschnitt ausführlicher ein.

Das *Systems Engineering* nutzt unterschiedliche Modellklassen für „die Planung, Gestaltung und den Betrieb von komplexen technischen Systemen“ [29] auch in Kombinationen oder hybriden Ansätzen. Ursprünglich rein gedankliche oder symbolische Modelle werden dabei meist als lauffähige und damit experimentierbare Softwaremodelle implementiert (vgl. Bild 18, S. 51), um ihren Wert als Planungswerkzeug zu erhöhen [31]. Die operative „Experimentierbarkeit“ spielt vor allem für *dynamische* Modelle eine Rolle, mit denen detaillierte Szenarien oder Lösungsansätze quasi-empirisch entwickelt oder analysiert werden sollen. Andererseits können auch *statische* Modellansätze, wie die unter 4.1.4.2 erwähnten Ansätze zur Brauereiplanung oder mathematisch-analytische Komponenten, im Rahmen einer ganzheitlichen Experimentierumgebung genutzt werden. Solche modellgestützten Berechnungen zur Prognose oder Optimierung bezeichnet GÜNZEL [20] als „Simulation im weiteren Sinne“. Allgemein zählt die Simulation zu den wichtigsten Methoden des Systems Engineering [29].

#### 4.1.5 Einsatz von Simulationsmodellen

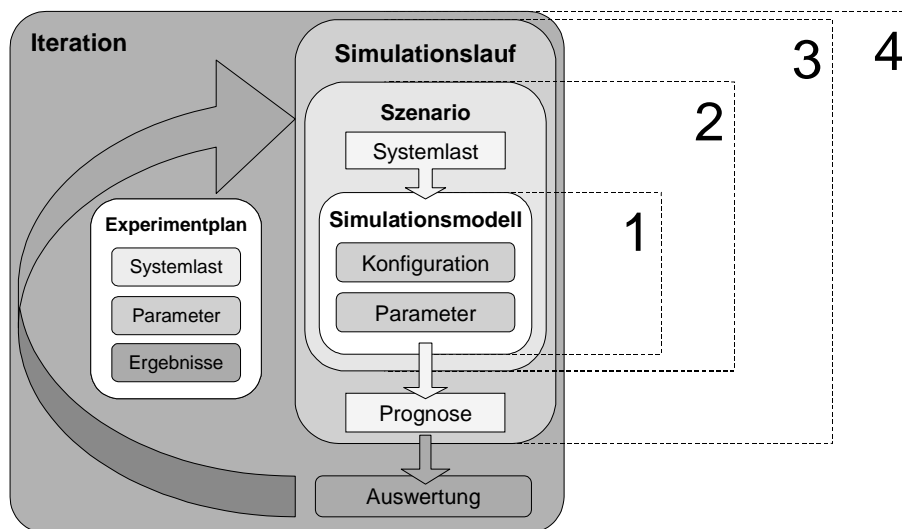


Bild 21: Schema für den Einsatz von Simulationsmodellen

Die prinzipielle Vorgehensweise beim Einsatz von Simulationsmodellen soll einführend unabhängig von einer besonderen Zielsetzung und der konkreten Modellgestaltung beschrieben werden. Dabei wird durchgehend von einer *computergestützten* Simulation ausgegangen, die für die meisten Anwendungsgebiete einen Standard ohne wirkliche Konkurrenz darstellt. Bild 21 zeigt ein allgemeines Schema für den Simulationseinsatz in vier Schritten, deren Nummerierung mit den folgenden Abschnitten (4.1.5.1 bis 4.1.5.4) korrespondiert.

#### 4.1.5.1 Modellrealisierung und -überprüfung

Simulationsmodelle werden typischerweise als operative Modelle angelegt, was einen mehrstufigen Modellbildungsprozess nach Bild 18, S. 51, voraussetzt. Im Zuge der Modellrealisierung wird dabei mit Hilfe von mehr oder weniger aufwendigen Werkzeugen oder Programmiersprachen ein lauffähiges Softwaremodell erstellt. Dieses Modell definiert einerseits Aufbau- und Ablaufstrukturen von eher statischem Charakter, die in Bild 21 als *Konfiguration* des Modells bezeichnet werden. Daneben sind *Parameter* im Modell enthalten, durch die veränderliche Eigenschaften des Modells hinsichtlich Aufbau- oder Ablaufstruktur beeinflusst werden können.

Die Parametrierung kann dabei genutzt werden, um Alternativen innerhalb desselben Projekts zu darzustellen, oder um ein vorkonfiguriertes Basismodell an ein bestimmtes Projekt anzupassen. Besonders flexibel können Konfiguration und Parametrierung beim Einsatz von objektorientierten Werkzeugen gehandhabt werden, die das Baukastenprinzip verwenden (vgl. 4.3.1.2). Dabei bestimmen der Grad der Kapselung der Bausteine und die Verfügbarkeit und Gestaltung grafischer Benutzerschnittstellen, auf welche Modelleigenschaften der Anwender als Parameter zugreifen kann, und welche nur im Zuge der Modellkonfiguration, und damit nur mit besonderen Kenntnissen und Zugriffs- oder sogar Lizenzrechten, zugänglich sind.

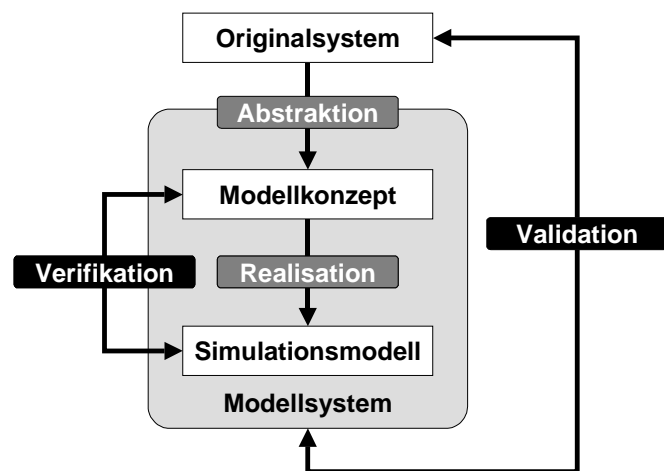


Bild 22: Verifikation und Validation von Simulationsmodellen

Vor dem Einsatz eines Simulationsmodells sollte dessen Tauglichkeit für das vorgesehene Aufgabenspektrum sorgfältig überprüft werden. In diesem Zusammenhang sind zwei Teilaufgaben zu unterscheiden (vgl. Bild 22): Durch die *Verifikation* ist zunächst zu prüfen, ob die in einem konzeptionellen oder formalen Modell festgelegten Definitionen im Simulationsmodell korrekt abgebildet sind. Die anschließende *Validation* des Modells soll ergeben, inwieweit das Modellsystem als Ganzes (Konzept *und* Realisierung) aussagekräftige Ergebnisse liefert. Zumindest für die Validation müssen dabei auch die nachfolgend beschriebenen Schritte der Modellnutzung vollzogen werden [31].

#### 4.1.5.2 Definition eines Szenarios

Nachdem im Zuge der Modellrealisierung die als wesentlich erkannten strukturellen Merkmale eines Systems in ein lauffähiges Simulationsmodell übertragen wurden, sollte der Betrieb dieses Modells das dynamische Zusammenspiel der nachgebildeten Komponenten widerspiegeln. Für die Simulation von Produktionsabläufen sind dazu ein virtuelles Zeitsystem, die *Simulationszeit*,



und die *Systemlast*, also Produktionsziele oder Aufträge für das virtuelle System, zu definieren. Daneben können weitere Angaben z. B. zur Initialisierung oder Vorbelegung des Systems, zum Betriebszeitmodell oder zur geplanten Instandhaltung von Ressourcen im Simulationszeitraum eine Rolle spielen. Die Verbindung eines konfigurierten und parametrisierten Simulationsmodells mit einer definierten Systemlast soll dabei als *Szenario* bezeichnet werden (vgl. Bild 21). Die Definition der Systemlast muss dabei nicht unbedingt außerhalb des Modells in expliziter Form gegeben sein. Vielmehr können z. B. Produktionsaufträge auch erst zur Laufzeit des Modells zufällig, situationsabhängig oder nach periodisch wiederholten Mustern erzeugt werden. In diesen Fällen besteht die Definition der Systemlast in der entsprechenden Parametrierung der jeweiligen „Generatoren“.

#### 4.1.5.3 Ausführen eines Simulationslaufs

Ausgehend von durch ein Szenario vorgegebenen Eingangsdaten wird in einem *Simulationslauf* die dynamische Entwicklung des Gesamtsystems während der Simulationszeit prognostiziert. Die Berechnungslogik wird dabei entweder unmittelbar bei der Modellrealisierung programmiert oder ergibt sich aus der Interpretation von Szenario und Modelldefinition durch einen Simulator. Simulationsmodelle werden in der Regel mit endlicher Laufzeit betrieben, wobei als Abbruchbedingung neben dem manuellen Zugriff eines Bedieners der Ablauf einer bestimmten Simulations- oder Rechenzeit, oder das Erreichen eines erwünschten oder unerwünschten Systemzustands („alle Aufträge abgearbeitet“, „System ist blockiert“, usw.) in Frage kommen. Das prognostizierte Systemverhalten kann bereits zur Laufzeit visualisiert (Animation, Monitoring) oder durch das Speichern von Daten für eine spätere Analyse dokumentiert werden. Sofern eine zustandsabhängige Abbruchbedingung definiert wurde, kann bereits die bis zum Erreichen der Abbruchbedingung verstrichene Simulationszeit (nicht Rechenzeit!) ein aussagekräftiges Simulationsergebnis darstellen. In der Regel erfordern die vielfältigen Ergebnisse eines Simulationslaufs allerdings eine umfassende Auswertung und kritische Interpretation.

#### 4.1.5.4 Iteratives Ausführen von Simulationsläufen

Der Erkenntnisgewinn durch das Ausführen eines einzigen Simulationslaufs wird den Aufwand für die Modellentwicklung und die Definition eines Szenarios selten rechtfertigen. Der Nutzen eines Simulationsmodells ergibt sich vielmehr durch den wiederholten Einsatz in unterschiedlichen Szenarien mit wechselnder Systemlast, Konfiguration oder Parametrierung des Modells. Sofern ein Simulationsmodell stochastische Komponenten enthält, sollten sogar für jedes Szenario mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen Zufallszahlen ausgeführt werden, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten.

Prinzipiell sollte eine Serie von Simulationsläufen mit einem definierten Untersuchungsziel systematisch geplant und durchgeführt werden. Moderne Simulationswerkzeuge unterstützen diese Vorgehensweise durch Automatisierungsfunktionen, mit deren Hilfe z. B. ein Versuchsplan zur

systematischen Parametervariation angelegt und automatisch abgearbeitet werden kann. Dieser Ansatz eignet sich auch für eine systematische Sensitivitätsanalyse, die qualitative und quantitative Effekte der Variation von Eingangsgrößen auf in der Simulation ermittelte Kennzahlen zum Gegenstand hat.

Über eine Iteration von einzelnen oder zu Experimenten gruppierten Simulationsläufen kann die Simulation interaktiv genutzt werden, indem das Modell bzw. das korrespondierende Plansystem in einem evolutionären Prozess schrittweise entwickelt wird [29]. Im Unterschied zu einem festgelegten Versuchsplan, durch den die Simulation als objektiver Prüfstand für den Vergleich von vorab definierten Szenarien genutzt wird, können dabei die sukzessive gewonnenen Simulationsergebnisse und die subjektive Intuition des Anwenders unmittelbar in den Gang der Untersuchung einfließen. Soll das simulierte System bzw. Szenario nicht nur analysiert sondern anhand der Simulationsergebnisse zielgerichtet gestaltet werden, dient die Simulation der Optimierung, mit der sich der folgende Abschnitt beschäftigt.

## 4.1.6 Simulation und Optimierung

### 4.1.6.1 Optimierungsprobleme

Aus der Existenz von Entscheidungsspielräumen ergibt sich in Verbindung mit einer konkreten Zielsetzung das Problem einer optimalen Entscheidungsfindung, das PAPAGEORGIOU [44] wie folgt formuliert:

„Unter Berücksichtigung der Entscheidungsrestriktionen und -auswirkungen bestimme diejenige Entscheidung, die die spezifizierte Zielsetzung am ehesten erfüllt.“

Im analytischen Kontext wird eine „Entscheidung“ als Lösungsversuch für ein Optimierungsproblem häufig als Vektor repräsentiert, der aus einer endlichen Anzahl von Entscheidungsparametern besteht. Die Entscheidungsrestriktionen werden als Einschränkungen für den Wertebereich der einzelnen Parameter sowie für deren Kombination durch sogenannte *Nebenbedingungen* abgebildet, durch die der *zulässige Bereich* für Lösungsvektoren definiert wird. Eine eindeutige *Zielfunktion* muss jede zulässige Lösung skalar bewerten, wobei entweder minimale oder maximale Werte als „optimal“ betrachtet werden [8]. Ein Optimierungsproblem kann auch als Suchproblem formuliert werden. Die Entscheidungsparameter spannen dabei einen multidimensionalen Suchraum auf, der den *zulässigen Bereich* als Teilmenge enthält. Bei der Suche nach einer optimalen zulässigen Lösung kann dabei auch das Auswerten unzulässiger bzw. partieller Lösungen sinnvoll sein [38]. Aus analytischer Sicht wird „die Bestimmung eines Punktes [...], für den die Zielfunktion [...] optimal wird“ [8] als globale Lösung des Optimierungsproblems betrachtet. Dieses strenge Optimalitätskriterium ist allerdings nur in den folgenden Fällen sicher gewährleistet:

- Die Optimalität einer gefundenen Lösung kann aufgrund einer geeigneten (meist analytischen) Problemrepräsentation mathematisch bewiesen werden.

- Der Wert der Zielfunktion für eine Lösung stimmt mit deren definitionsgemäßem Grenzwert für eine maximale Zielerreichung (Maximum oder Minimum) überein.
- Es wurden sämtliche zulässigen Lösungen evaluiert, aber keine besseren gefunden.

Für viele praktische Anwendungsfälle bzw. „reale Probleme“ kann keine dieser Forderungen mit vertretbarem Aufwand erfüllt werden. Stattdessen greift oft nur ein pragmatischer und weiter gefasster Optimalitätsbegriff, der sich z. B. auf eine definierte Annäherung an einen bekannten oder hypothetischen Grenzwert der Zielfunktion oder die innerhalb eines Suchverfahrens mit begrenzter Laufzeit gefundene Bestlösung beziehen kann. Ein Näherungsverfahren muss aus praktischer Sicht vor allem Lösungen von ausreichender Güte in angemessener Zeit liefern [28]. Bei der Auswahl und Parametrierung von Suchmethoden für die Praxis kann bzw. muss dabei in Abhängigkeit von der Zielsetzung und der Struktur des Suchraums zwischen der Breite und der Tiefe der Suche gewichtet werden, was wiederum ein Optimierungsproblem darstellt [51]. Beim Vergleichen von Optimierungsverfahren spielen neben der Antwortzeit und der Qualität der Lösungen auch der Implementierungsaufwand sowie die Robustheit gegenüber wechselnden Anforderungen und Problemstellungen eine Rolle [38] [43].

#### **4.1.6.2 Kombination von Simulation und Optimierung**

„Simulationstechnik beinhaltet, im Gegensatz zu den analytischen Methoden, kein systematisches Verfahren, das über einen Algorithmus automatisch zu einer optimalen Lösung führt.“ [29]

Auch in anderen Veröffentlichungen [20] [31] [50] [53] wird diese Tatsache ausdrücklich und oft bereits im einleitenden Kapitel betont, was auf eine verbreitete gegenteilige Erwartungshaltung an die Simulation hinweist. Das besondere Verhältnis zwischen Simulation und Optimierung soll das folgende anschauliche Beispiel illustrieren:

Das Erstellen eines Simulationsmodells löst Planungsprobleme so wenig, wie sich durch den Kauf einer Straßenkarte die Auswahl der Fahrtroute zu einem Reiseziel erübrigt. Selbst wenn bereits ein validiertes Modell zur Planungsunterstützung vorliegt (Straßenkarte, Verkehrsnetz-Datenbank), setzt eine optimale Entscheidungsfindung voraus, dass neben dem primären qualitativen Ziel (Erreichen eines Reiseziels) ein quantitatives Bewertungskriterium für den Vergleich von Lösungsvarianten gegeben ist (Reisezeit, Wegstrecke, Kosten o. ä.) und eine Methode existiert, mit der zulässige Lösungen von ausreichender Güte in endlicher Zeit gefunden werden. Sofern ein geeigneter Algorithmus diesen Ansprüchen genügt, kann der Entscheidungs- bzw. Optimierungsprozess dann auch automatisiert werden (Routenplaner, Navigationssystem).

Unabhängig davon, ob die Lösungssuche manuell oder automatisch betrieben wird, verbleibt das Aufstellen einer adäquaten Zielfunktion als – vor allem in Verbindung mit konkurrierenden Kriterien – nicht unerhebliches Entscheidungsproblem [20]. Daher kann auch der Aufwand für das problemspezifische Formulieren oder Parametrieren der Zielfunktion über den Praxisnutzen eines Optimierungssystems entscheiden, was auch im Beispiel des Navigationssystems nachvollziehbar ist. So wird ein Autofahrer in „bekanntem Terrain“ bevorzugt anhand seines Erfahrungswissens „navigieren“ und dabei mehr oder weniger bewusst vielfältige Nebenbedingungen (Zwischenziele, Verkehrslage, Straßenzustand, Lärmschutz, Veranstaltungen, persönliche Vorlieben und Abneigungen, usw.) einbeziehen, während er sich in unbekannter Umgebung eher auf den Vorschlag eines Navigationssystems verlassen wird, das wesentlich weniger subtile Kriterien berücksichtigt.

Die im Navigationssystem als Modell genutzte Verkehrsnetz-Datenbank kann allerdings, beispielsweise für die Tourenplanung einer Spedition, auch mit wesentlich komplexeren Nebenbedingungen bzw. Zielfunktionen und leistungsfähigeren Optimierungsmethoden kombiniert werden.

Analog besteht ein Eigenwert eines Simulationsmodells unabhängig vom Einsatz eines Optimierungsverfahrens in der Repräsentation von Systemwissen. Während Simulationsmodelle im Vergleich zu analytischen Modellen weniger stark an eine bestimmte Lösungsmethodik angepasst sind, können sie meist einfacher und flexibler an spezifische und ggf. wechselnde Problemstellungen angepasst werden.

Die Simulation dient dabei zur Evaluation von Lösungsvorschlägen in iterativen Verfahren und wird entweder direkt im Optimierungszyklus (vgl. Bild 23) oder zur Plausibilitätsprüfung von ausgewählten Lösungsvorschlägen (vgl. Bild 24) eingesetzt, die anhand eines Grobmodells entwickelt wurden. GÜNZEL [20] weist auf die analog ausführbare Möglichkeit einer Rückkopplung zwischen Simulationsmodellen und Expertensystemen in einem iterativen Prozess hin.

Grundsätzlich können in iterativen Verfahren wissensbasierte, kombinatorische, heuristische, statistische und evolutionäre Methoden angewendet werden, um neue Lösungsvorschläge bzw. Varianten für die Simulation zu erzeugen [29]. VAVILOV stellt dazu fest:

„Auch hier braucht man ‚intelligente‘ Strategien; denn jedes blinde Suchen führt auch nur zufällig zu einem Optimum.“ [64]

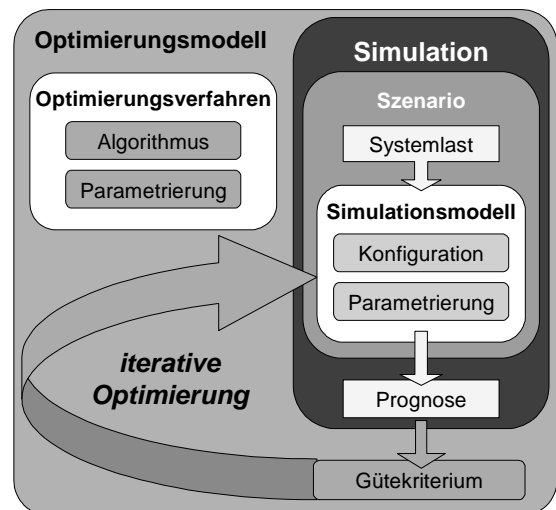


Bild 23: Simulation gestützte Optimierung

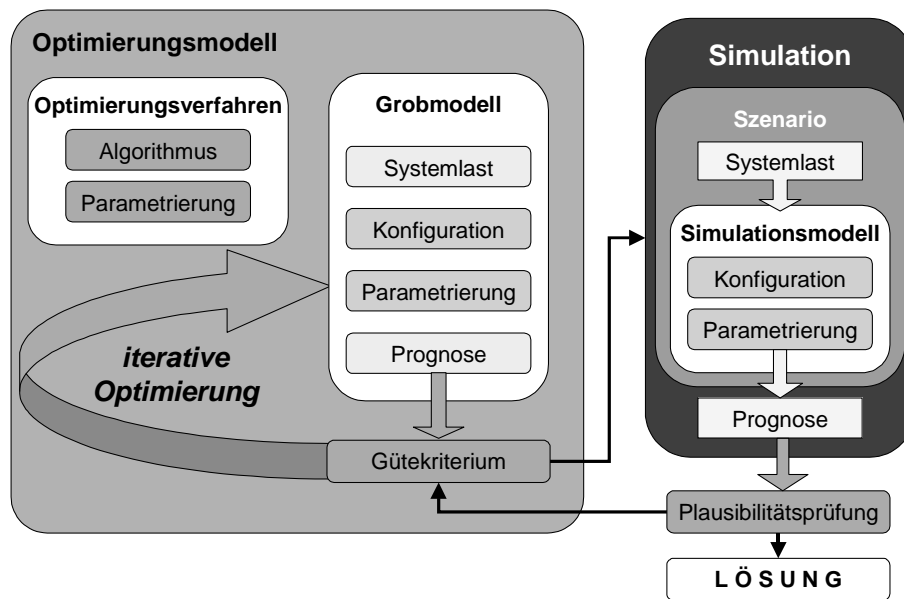


Bild 24: Simulation zur Plausibilitätsprüfung für ausgewählte Lösungsvorschläge

Für die besondere Schwierigkeit von „Problemen der realen Welt“ nennt MICHALEWICZ [38] fünf verbreitete Ursachen:

- (1) Die Größe des Suchraums,
- (2) die Komplexität des Problems,
- (3) die Unschärfe oder Zeitvarianz der Zielfunktion,
- (4) die starke Beschränkung des Suchraums durch vielfältige Restriktionen sowie
- (5) die unzureichende Qualifikation oder psychologische Barrieren der mit dem Problem konfrontierten bzw. befassten Person.

Im Umfeld der Anlagen- und Produktionsplanung liegen diese bereits isoliert höchst problematischen Symptome nicht selten sogar in Kombination vor. Auch wenn die Computersimulation keine ursächliche Abhilfe für diese Probleme bietet, können angemessen detaillierte aber transparent strukturierte Simulationsmodelle als Schnittstelle zwischen menschlicher Intuition und programmierbarer Logik den gedanklichen Problemzugang verbessern (vgl. Punkte 2 und 5). Als Basis für eine computergestützte Optimierung implizieren sie besonders im Vergleich zu mathematisch-analytischen Modellen weniger Einschränkungen hinsichtlich der Komplexität (vgl. Punkte 2 und 4). Durch ihre höhere Anschaulichkeit können außerdem die menschliche Kreativität, Intuition und Urteilskraft besser in den Lösungsprozess einfließen, was die Punkte 1, 3 und 4 entscheidend entschärfen kann. Mit Blick auf Punkt 5 sei abschließend zitiert:

”Modeling – the process of taking the real world and describing it in such a way that we can turn our engines on it – is intellectually very difficult and hard to teach.“  
*(Robert Daniels, Director, Dash Associates) [5]*

### 4.1.6.3 Genetische Algorithmen

Im Kontext dieser Arbeit wurden Simulationsmodelle zur Optimierung in Verbindung mit *Genetischen Algorithmen (GA)* eingesetzt, die neben den *Evolutionstrategien (ES)* einen besonderen Typ innerhalb der *Evolutionären Algorithmen (EA)* darstellen. Diese Gruppe von Optimierungsverfahren betrachtet die natürliche Evolution „als Vorbild [...] für die Lösung komplizierter technischer und wirtschaftlicher Optimierungs- und Adaptionsprobleme“ [51]. Bezüglich Details zur Historie und den unterschiedlichen Entwicklungsrichtungen dieser Verfahren sei hier auf die Literatur, z. B. NISSEN [43] oder SCHÖNEBURG [51], verwiesen.

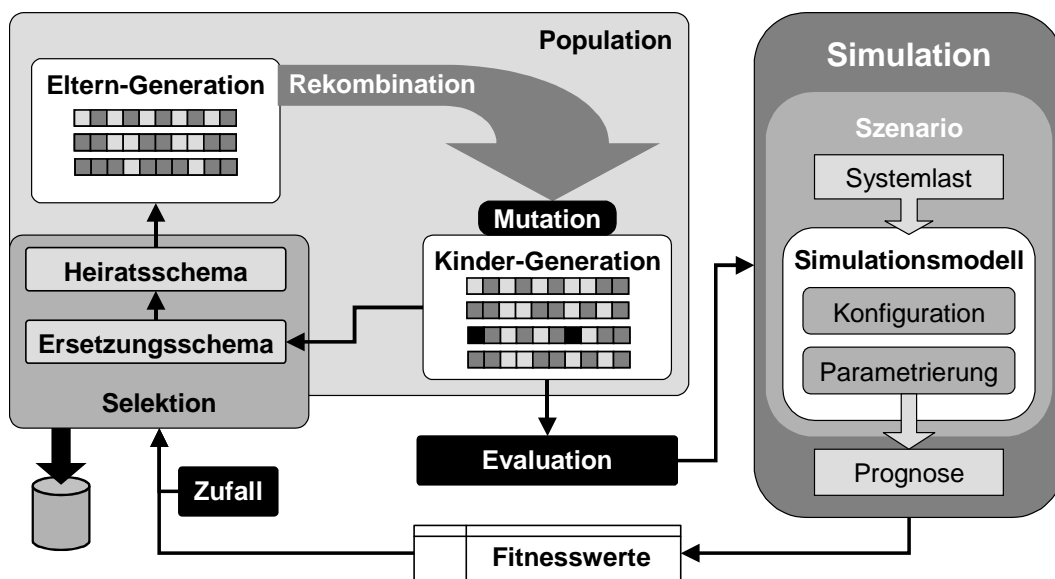


Bild 25: Genetischer Algorithmus mit Simulationsmodell zur Evaluation

Evolutionäre Algorithmen lehnen sich an die in natürlichen Populationen beobachtbaren Adaptionsmechanismen zur Variation und Selektion an und kombinieren in einem prinzipiell unspezifischen Suchverfahren gerichtetes und ungerichtetes sowie paralleles und serielles Suchverhalten zu einem intelligenten Suchprozess mit stochastischen Elementen [43] [51]. Die Grundlage für diesen synthetischen Evolutionsprozess bilden sequenzielle Datenstrukturen („Chromosomen“) in Form von Bitfolgen oder anderen Vektoren, in denen die Entscheidungsvariablen eines Optimierungsproblems („Gene“) codiert sind [43], sowie eine Zielfunktion, die die konkreten Lösungsvorschläge skalar bewertet („Fitness“). Für jeden Lösungsvorschlag („Individuum“) sind die chromosomalen Vektoren mit konkreten Werten zu besetzen, die im Zuge der Evaluation interpretiert („exprimiert“) und beim Erstellen neuer Lösungsvorschläge („Vererbung“) durch genetische Operatoren manipuliert werden. Anders als in anderen iterativen Verfahren wird in jedem Zyklus eine ganze Gruppe („Generation“) von Lösungsvorschlägen generiert, die unabhängig voneinander – und damit prinzipiell auch parallel – evaluiert werden können.

In mehr oder weniger starker Abhängigkeit von den ermittelten Fitnesswerten findet eine Selektion statt, durch die bestimmt wird, welche Individuen überhaupt bzw. bevorzugt zum Erzeugen der Folgegeneration herangezogen werden. Während bei den sogenannten *Evolutionstrategien (ES)* dabei ausschließlich Mutationen für mehr oder weniger zufällige punktuelle Veränderungen am sequenziell codierten „Erbgut“ sorgen, verwenden die *Genetischen Algorithmen (GA)* auch rekombinierende genetische Operatoren, durch die z. B. ganze Abschnitte von Chromosomen zwischen zwei oder mehreren nach einem „Heiratsschema“ kombinierten Individuen („Eltern“) ausgetauscht werden („Crossover“), um eine bestimmte Anzahl von „Nachkommen“ zu erzeugen. Der Begriff „Population“ fasst dabei die Individuen einer Elterngeneration mit deren Nachkommen zusammen, wobei das sogenannte „Ersetzungsschema“ beim Generationenwechsel bestimmt, wie viele und welche Individuen in die folgende Elterngeneration übernommen werden und ob die Populationsgröße über mehrere Generationen zunimmt, abnimmt oder stabil bleibt. Die Selektionsmechanismen, die bei den Genetischen Algorithmen das Heiratsschema und das Ersetzungsschema regulieren, können deterministisch oder stochastisch arbeiten und dabei die Fitness berücksichtigen oder nicht. Insgesamt sollte ein gewisser Einfluss der Fitnesswerte an mindestens einer Stelle im evolutionären Zyklus gegeben sein, damit eine Rückkopplung der in der Evaluation gewonnenen „Erkenntnisse“ stattfindet.

Sofern die Anordnung der Entscheidungsparameter in der Codesequenz nicht rein willkürlich bzw. zufällig vorgenommen wird, sondern die „Nähe“ zwischen den codierten Einzelinformationen innerhalb eines Chromosoms eine Form von Zusammengehörigkeit widerspiegelt, werden durch den Austausch von Codeabschnitten beim „Crossover“ zwischen Individuen auch häufiger komplexe Merkmale vererbt, die eine bestimmte Konstellation mehrerer benachbarter Gene bzw. Entscheidungsparameter erfordern (Polygenie) [51]. Ausgehend von einer ggf. zufällig bestimmten Startpopulation soll der im Verlauf der Generationen durch den von der Fitnessfunktion gesteuerten Selektionsdruck dazu führen, dass im „Genpool“ der sich entwickelnden Population günstige Teilsequenzen angereichert und im Erbgut von immer besser an die Evaluationsbedingungen adaptierten Individuen aggregiert werden [51]. Besonders bei Populationen von geringer Größe besteht dabei allerdings die Gefahr einer *frühzeitigen Konvergenz*, durch die der Genpool z. B. durch einen sprunghaft erreichten relativen Selektionsvorteil suboptimaler Individuen bis zur totalen Homogenität verarmen kann, was den Effekt der Rekombination neutralisiert. Parallel zur Rekombination angewendete Mutationsoperatoren können dieses „Festfahren“ der Evolution in lokalen Optima der Fitnessfunktion [51] verhindern und gleichzeitig sicherstellen, dass der Genpool nicht auf die in der Startpopulation vorhandenen Allele beschränkt bleibt.

## 4.2 Simulation der Produktion

### 4.2.1 Inhalte für die Simulation der Produktion

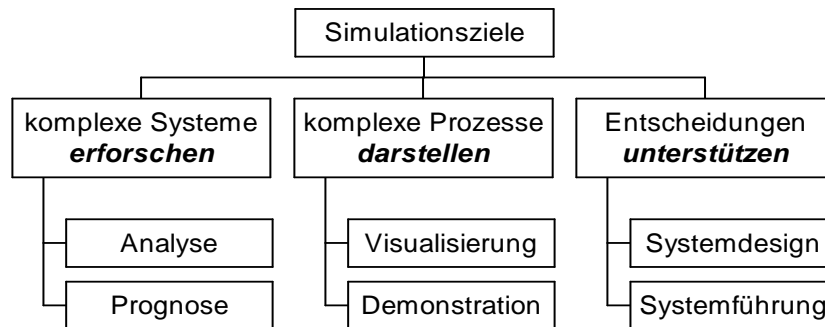


Bild 26: Anwendungsgebiete für den Einsatz von Simulationsmodellen nach KOŠTURIÁK [29]

Im Kontext der industriellen Produktion werden Simulationsmodelle in sämtlichen der in Bild 26 dargestellten Anwendungsgebieten genutzt. Der Einsatzzweck, die konkrete Aufgabenstellung und die Besonderheiten der jeweiligen Branche bestimmen dabei, ob sich Funktion und Gestalt der verwendeten Modelle eher an den materiellen Produktionsmitteln oder den abstrakten Produktionsabläufen orientieren. Neben der *Technik* (Anlagen, Produktionssysteme) und der *Technologie* (Prozesse, Verfahren) kommt auch der *Organisation* der Betriebsabläufe als weiterer Dimension ein erheblicher Stellenwert zu. Eine zentrale Aufgabe ist dabei das Erzeugen und Verwalten von Vorgaben für die Produktion (Produktionsprogramme, Aufträge). Nicht selten sind Technik, Technologie und Organisation so eng miteinander verflochten, dass eine isolierte Sichtweise unangebracht, wenn nicht sogar unmöglich ist. Moderne Simulationssoftware ermöglicht es dabei, umfangreiche Detailinformationen zu diesen drei Dimensionen der Produktion übersichtlich und anschaulich zu organisieren und deren logisches und dynamisches Zusammenspiel transparent darzustellen. Das Erstellen eines lauffähigen Simulationsmodells bedingt dabei hohe Anforderungen an die Kohärenz (vgl. Bild 20, S. 53), Detaillierung und Vollständigkeit der Eingangsdaten. Widersprüchliche Angaben müssen bereinigt, Lücken und Unschärfen im Informationsangebot durch konkrete Daten oder explizite Annahmen kompensiert werden. Während Vereinfachungen und Einschränkungen in mathematischen Modellen meist implizit enthalten und damit zumindest für einen reinen Modellanwender nicht unmittelbar präsent sind, erfordert die Simulation ausdrückliche und bewusste Festlegungen auch für Aspekte, die nicht unmittelbar im Fokus der Aufmerksamkeit stehen.

Die Vielfalt der Anwendungsgebiete für Simulationsmodelle in Zusammenhang mit der Produktion ergibt sich einerseits aus der großen Gestaltungsfreiheit bei der Modellierung und andererseits aus der Flexibilität beim Modelleinsatz, da technische, technologische und organisatorische Parameter nach Bedarf als veränderliche Größen gehandhabt werden können. Dasselbe Simula-



tionsmodell kann also für unterschiedlichste Fragestellungen genutzt werden, während für einen einzelnen Simulationslauf prinzipiell die immer gleiche Aufgabe besteht: die dynamische Entwicklung für ein konkretes Szenario zu prognostizieren.

#### 4.2.2 Simulationseinsatz im Lebenszyklus von Produktionssystemen

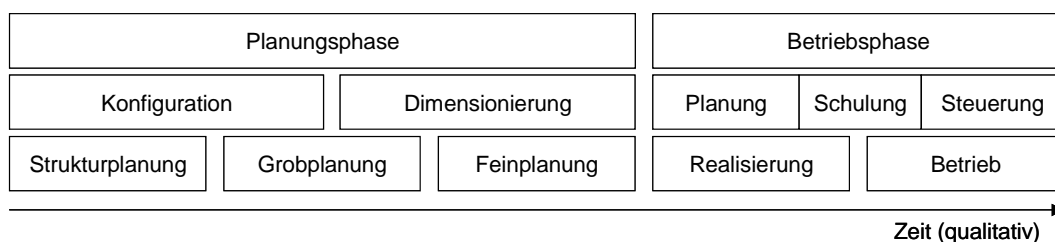


Bild 27: Aufgaben für Simulationsmodelle im Lebenszyklus von Produktionssystemen  
frei nach [20] [29] [31] [53]

Simulationsmodelle können während der Entwicklung, der Realisierung, der Inbetriebnahme und dem Betrieb von Produktionssystemen unterschiedliche Aufgaben unterstützen. Bild 27 orientiert sich an Vorschlägen von GÜNZEL, KÜSTER, KOŠTURIK und SKUDELNY für eine Klassifikation dieser Aufgaben und zeigt über die naheliegende Unterscheidung zwischen Planungs- und Betriebsphase hinaus inhaltliche Schwerpunkte und Teilaufgaben innerhalb dieser Abschnitte.

Die Planung für den Aus- oder Umbau bereits in Betrieb befindlicher Systeme, die ebenfalls ein wichtiges Einsatzgebiet für Simulationsmodelle darstellt, wird hier nicht ausdrücklich wiedergegeben. Derartige Maßnahmen können allerdings als Rücksprung in die Planungsphase interpretiert werden, wobei diese abhängig vom Ausmaß der geplanten Veränderungen ganz oder teilweise erneut zu durchlaufen ist. Durch die Verfügbarkeit eines realen Referenzsystems bestehen dabei allerdings für die Simulation hinsichtlich Datenlage und Detaillierungsgrad völlig andere Rahmenbedingungen als bei einer Neuplanung.

Da die Simulation grundsätzlich den gesamten Lebenszyklus eines Systems begleiten kann, muss im konkreten Anwendungsfall entschieden werden, *ob*, *wann* und *in welchem Umfang* ihr Einsatz wirtschaftlich sinnvoll ist. KOŠTURIK [29] verweist diesbezüglich auf eine Tendenz der Praxis, in der Planungsphase „zu spät“ auf Simulationsuntersuchungen zurückzugreifen, nämlich wenn die Entscheidungsspielräume bereits weitgehend ausgeschöpft und die Projektkosten kaum noch beeinflussbar sind. Im ungünstigsten Fall kann dann die Simulation eine vorherige Fehlplanung lediglich im Sinn eines „Erklärungsmodells“ diagnostizieren.

KÜSTER [31] sieht die Simulation ausdrücklich als „Querschnittstechnologie“ und als verbindendes Element zwischen Planung und Realisierung. GÜNZEL [20] weist darauf hin, dass dieselben Simulationsmodelle oft für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt werden können. Dabei müssen Simulationsmodelle während der Planungsphase bei strukturellen Entscheidungen immer wieder

reorganisiert und mit dem Planungsfortschritt im Sinn des Stufengrundsatzes (vgl. Abschnitt 3.3.3.2, S. 40) schrittweise verfeinert werden, was durch einen modularen Aufbau optimal unterstützt werden kann [29].

Während die VDI-Richtlinie 3633 [65] Planung, Realisierung und Betrieb als Anwendungsfelder für die Simulation technischer Systeme nebeneinanderstellt [29], wurde in Bild 27 die Realisierung der Betriebsphase zugeordnet, da sie sich wie der eigentliche Betrieb der Anlage auf ein spezielles, konkretes und weitgehend unveränderliches System bezieht, während in der Planungsphase in der Regel hypothetische und veränderliche Systeme bzw. entsprechend dem Variantengrundsatz (vgl. Abschnitt 3.3.3.3, S. 40) alternative Konzepte untersucht werden. Auch wenn für den Einsatz in den hier als Planungsphase und Betriebsphase bezeichneten Bereichen prinzipiell dieselben Simulationswerkzeuge oder sogar Modelle geeignet sein können, ergeben sich aus diesem grundsätzlichen Gegensatz unterschiedliche, teilweise widersprüchliche Anforderungen z. B. hinsichtlich Flexibilität, Detailtiefe, Rechengeschwindigkeit, Visualisierung und Bedienkomfort, die bei der Auswahl der Werkzeuge, der Modellkonzeption und der Modellgestaltung zu beachten sind. Soweit der Einsatz von Simulationsmodellen in unterschiedlichen Lebensabschnitten eines Produktionssystems überhaupt *a priori* geplant wird, ist demnach abzuwägen, ob ein Mehrzweckmodell geschaffen werden kann, das einen zufriedenstellenden Kompromiss zwischen den konkurrierenden oder wechselnden Anforderungen darstellt, oder ob mehrere spezialisierte Ansätze verfolgt werden sollen. Einen Mittelweg stellt der Zugriff spezialisierter Planungswerkzeuge und Simulationsmodelle auf eine gemeinsame Datenbasis bzw. Datenbank dar, die individuelle Sichten auf ein sich entwickelndes Planszenario ermöglicht. Diese Option ist auch in Verbindung mit der fortschreitenden Verbreitung und Integration von allgemeinen Unternehmensdatenmodellen, z. B. in ERP-Systemen, zu sehen, auch wenn sich diese hinsichtlich Struktur und Inhalt vorwiegend an operativen Aufgaben orientieren.

Während beim aufgabenspezifischen Einsatz von Simulationswerkzeugen unterschiedlicher Anbieter mit einem erhöhten Aufwand für Lizenzgebühren und die Qualifikation der Nutzer (Modellentwickler und Anwender) auszugehen ist, sind für den universellen Einsatz derselben Simulationssoftware für unterschiedliche Modelle und problemspezifische Modellkonzepte entsprechende Synergieeffekte zu erwarten, die eventuell durch Abstriche hinsichtlich der Adaptionfähigkeit oder einen höheren Adaptionaufwand erkaufte werden.

## 4.2.3 Erfolgsfaktoren für die Simulation der Produktion

### 4.2.3.1 Qualifikation und Kompetenz

„Die Idee der interaktiven Simulation basiert auf der Überzeugung, daß der Experimentator [...] über ein Wissen verfügt, das ihm während der Simulation einen effektiven und operativen Umgang mit dem Modell auch in den schwierigsten Fällen gestattet.“

VAVILOV 1983 [64]

Auch wenn diese Aussage von VAVILOV [64] aus den frühen 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts stammt und damit um mindestens eine „Simulatorgeneration“ zurückliegt [29] [50], spricht sie mit den hohen Anforderungen an die Qualifikation einen Umstand an, der trotz erheblicher Fortschritte bei Leistungsfähigkeit und Bedienkomfort moderner Simulationswerkzeuge weiterhin aktuell bleibt. Zehn Jahre später stellt GÜNZEL [20] fest:

„Obwohl in den vergangenen Jahren sehr viele Anstrengungen unternommen wurden, die Simulation durch Anreicherung mit komfortablen Bedienoberflächen und integrierten Entwicklungsumgebungen benutzerfreundlicher zu machen, bleibt die Simulation weiterhin eine Domäne für Experten. Die Utopie von der Simulation als selbstverständliches Hilfsmittel des Planers, in der Einfachheit und Verbreitung ihrer Benutzung dem Taschenrechner gleichgestellt, ist noch weit von ihrer Verwirklichung entfernt.“

GÜNZEL 1993 [20]

Diesem Statement, das sich bereits auf die Simulatoren der derzeit aktuellen fünften Generation bezieht, stellt den *Simulationsexperten* und den *Planer* als komplementäre Akteure gegenüber. Gleichzeitig kommt das Fernziel zum Ausdruck, diese Funktionen mithilfe geeigneter Software in Personalunion ausfüllen zu können. Auf die vielfältigen Qualifikationsanforderungen in Zusammenhang mit der Simulation von Produktions- und Logistik-Systemen weist auch SCHMIDT [50] hin. In der Praxis kooperieren häufig Spezialisten mit direktem Projektbezug mit projekt-internen oder -externen Simulationsexperten, was zusätzlichen Aufwand (Koordination, Kosten, Zeit) und gewisse Konfliktpotenziale (Kommunikationsbarrieren, unerwünschter Know-how-Transfer, konträre wirtschaftliche Interessen) bedingt [20] [31].

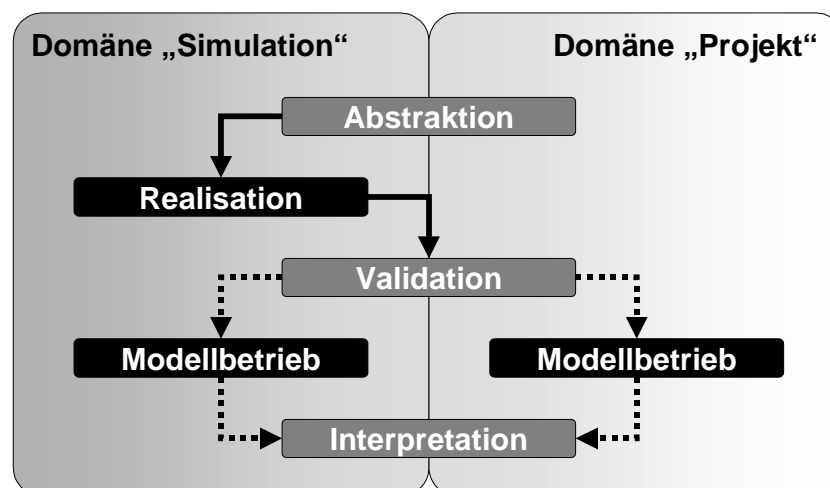


Bild 28: Zusammenspiel der Kompetenzbereiche bei Entwicklung und Einsatz von Simulationsmodellen

Verschiedene Aufgaben bei der Entwicklung und dem Einsatz von Simulationsmodellen erfordern einen intensiven Austausch zwischen den in Bild 28 als „Domänen“ gegenübergestellten Kompetenzbereichen der Simulation als Fachgebiet und dem individuellen Projektkontext, der in

der Regel wiederum einen nicht unproblematischen Brennpunkt verschiedener Fachdisziplinen darstellt. Die beiderseitige Platzierung der Phase „Modellbetrieb“ soll andeuten, dass der projektbezogene Einsatz eines Simulationsmodells mehr oder weniger stark in den Projektzusammenhang integriert sein kann. Als Extremfälle sind dabei der einmalige Einsatz eines Modells in einer einstufigen Studie durch einen externen Simulationsexperten im Gegensatz zur interaktiven projektbegleitenden Simulation durch einen Anwender im Projektteam zu sehen. Unabhängig von der Aufgabenverteilung im Modellbetrieb stellen die Abstraktion bei der Modellbildung, die Validation des Modells und die Interpretation der Ergebnisse obligatorische Schnittstellenfunktionen dar, die Kompetenz für beide Domänen bzw. die enge Kooperation von Experten aus beiden Bereichen voraussetzen.

Die hier dargestellte Problematik besteht zwar grundsätzlich auch beim Einsatz anderer Modelltypen. Allerdings kommt der Forderung nach übergreifender Qualifikation und Kompetenz wegen der für die Simulation kennzeichnenden hohen Flexibilität hinsichtlich Modellstruktur, Detailtiefe und Einsatzmöglichkeiten besonderes Gewicht zu. Während beispielsweise analytische Modelle in der Regel bereits auf spezielle Lösungsverfahren abgestimmt sind, die vom Anwender lediglich parametrisiert und „programmgemäß“ exerziert werden müssen, besteht der besondere Nutzen der Simulation gerade in der Offenheit für Interaktivität und Kreativität beim Aufbau und Betrieb des Modells. Dieses Potenzial wird zwar durch die permanente Weiterentwicklung bausteinorientierter Simulationssysteme mit grafischer Benutzeroberfläche immer einfacher zugänglich. Allerdings stehen dabei Flexibilität und Bedienkomfort meist in Konkurrenz, da der Anwender oft nur in dem Umfang von elementaren Aufgaben und Kenntnissen entlastet und von der zugrunde liegenden Simulationstechnik abgeschirmt werden kann, in dem ihm Gestaltungsmöglichkeiten vorenthalten werden [29]. So kann der Modellaufbau in solchen Systemen zwar meist per *drag & drop* und die Parametrierung über Dialogfenster abgewickelt werden, während die Lauffähigkeit und das praxisgerechte Verhalten eines Modells selten ohne problemspezifische Erweiterungen, z. B. prozedurale Komponenten, zu erreichen ist [31]. Umgekehrt bedingt die höhere Flexibilität eines Simulationssystems, dass dem Anwender mehr Entscheidungsvariablen bzw. allgemeiner gehaltene Bausteine zur Verfügung stehen, was einen höheren Aufwand bei der Modellerstellung erfordert [20].

#### **4.2.3.2 Kommunikation und Kooperation**

Kommunikation und Kooperation spielen bei der modellgestützten Planung allgemein und besonders beim Einsatz von Simulationsmodellen in zweifacher Hinsicht eine wichtige Rolle:

Einerseits verlangen Modellbildung und Modellbetrieb einen gewissen „Input“, der mindestens die Schnittstelle zwischen den Domänen „Projekt“ und „Simulation“ (vgl. Bild 28) überwinden muss. Dieser Informationstransfer wird in der Literatur als problematischer und kritischer Aspekt der Simulation beschrieben [20] [29] [31]. Allerdings kann bereits die Auswahl der wesentlichen Informationen im Zuge der Abstraktion einen wesentlichen informationellen Mehrwert für das

Planungsprojekt darstellen. Der für die Simulation typische erhöhte Bedarf an konkreten Angaben und Detailinformationen zu den vielfältigen Aspekten eines Projekts kann damit auch den projektinternen Austausch stimulieren:

„Die Modellerstellung ist für den Erfolg einer Simulationsstudie von großer Bedeutung und erfordert enge Zusammenarbeit aller Beteiligten.“ [31]

„Simulation entdeckt Denkfehler und unterstützt eine fach- und organisationsübergreifende Zusammenarbeit und Kreativität ...“ [29]

Andererseits kann ein Simulationsmodell auch als direktes Kommunikationsmedium bei der Planung dienen. Der Informationsfluss kann dabei entweder gerichtet (Visualisierung, Demonstration) oder ungerichtet (interaktiver Einsatz der Simulation) sein. Selbst wenn im Vergleich zu konventionellen Planungsmethoden oder subjektiven bzw. kollektiven Erfahrungen keine zusätzlichen oder abweichenden Ergebnisse erwartet werden, ermöglicht die Simulation als gemeinsame Projektionsfläche unterschiedlicher Perspektiven eine transparentere und effektivere Argumentation zwischen komplementären Parteien (Auftraggeber, Auftragnehmer, Projektleitung), konkurrierenden Interessen (Produktion, Logistik, Vertrieb, usw.) der unterschiedlichen Fachdisziplinen (Verfahrenstechnik, Prozesstechnologie, Automatisierung, Maschinenbau, usw.).

MÄRZ [37] beschreibt den besonderen Wert der Simulation als Vertriebswerkzeug im Anlagenbau als Vermittlungsebene für die Demonstration von Kompetenz und den gezielten Austausch von Know-how im Dialog zwischen Anbieter und Auftraggeber.

#### 4.2.3.3 Modellstruktur und Abstraktionsgrad

„Aufgrund der hohen Komplexität, die bereits Teilbereiche von unternehmensweiten technischen Systemen und Prozessen aufweisen, ist es im allgemeinen nicht sinnvoll, eine möglichst detaillierte Abbildung des Originalsystems im Modell anzustreben.“ [31]

Für den Zeitanteil, der innerhalb einer Simulationsstudie auf die Vorbereitungsphase bis zur Durchführung von Experimenten entfällt, geben verschiedene Quellen einen Erfahrungswert von 75 % an [20] [31]. Auch wenn die Aussagekraft einer solchen Pauschale ohne genaueren Hintergrund zur Datenbasis sehr begrenzt ist, weist der Wert auf einen erheblichen Aufwand für Konzeptentwicklung und Modellbildung hin. Als bestimmende Faktoren für diesen Aufwand nennt GÜNZEL [20] die Komplexität des abzubildenden Systems, die in der Regel nicht direkt beeinflusst werden kann, und den Detaillierungsgrad bzw. Abstraktionsgrad des Modells, der in visueller und funktionaler Hinsicht zielorientiert festzulegen ist. KÜSTER [31] spricht von einem überproportionalen Einfluss der Abbildungsgenauigkeit auf die Kosten. LULAY [34] stellt fest, dass „zwar der Bedarf bekannt ist, geeignet zu abstrahieren, jedoch darüber hinaus bei der konkreten Bestimmung des passenden Abstraktionsgrades wenig methodische Unterstützung gegeben wird.“

Vom Abstraktionsgrad hängen neben dem Aufwand zur Informationsbeschaffung, Modellrealisation, Verifikation und Validation auch die Handhabbarkeit und das Laufzeitverhalten im Modellbetrieb ab. Bild 29 stellt einige Merkmale der Simulation paarweise gegenüber, um den tendenziellen Einfluss des Abstraktionsgrades zu verdeutlichen. Hier wird unterstellt, dass ein Mehraufwand für die höhere Detaillierung eines Modells eine höhere Aussagekraft der Ergebnisse zur Folge hat. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass für diesen Zusammenhang ein un stetiger Verlauf und ein begrenzter „Wertebereich“ angenommen werden muss, da einerseits nicht jedes zusätzliche Modelldetail mehr oder besseren „Output“ garantiert und andererseits mit zunehmender Detaillierung Sättigungseffekte und eine limitierende Wirkung durch die begrenzte Verfügbarkeit von Eingangsinformationen zu erwarten sind. Umgekehrt steigt mit zunehmender Abstraktion und damit Verkürzung im Modell der Aufwand für die Interpretation der Ergebnisse. Obwohl diese weniger ausführlich und umfangreich ausfallen werden, muss kritischer und aufwendiger geprüft werden, ob sie plausibel und auf die Realität übertragbar sind.

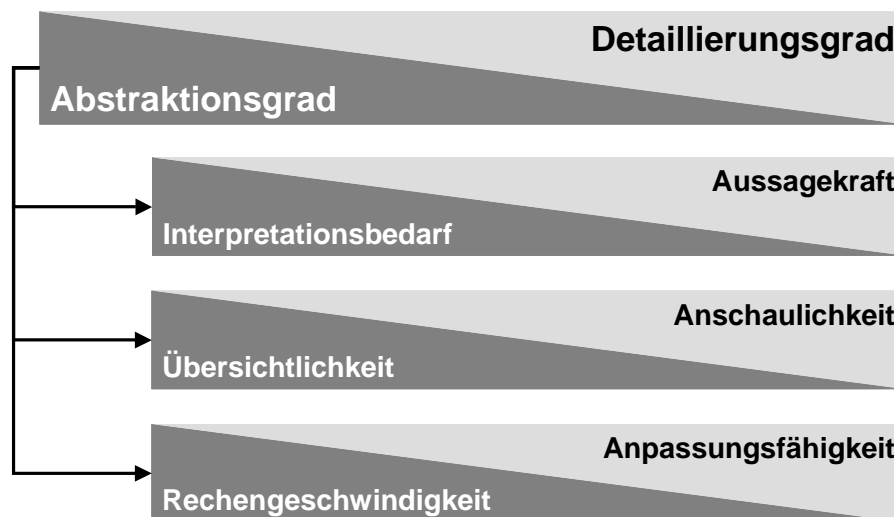


Bild 29: Einfluss des Detaillierungsgrades eines Simulationsmodells auf andere Eigenschaften

Die Problematik der Wahl des angemessenen Abstraktionsgrades wird durch den Umstand verschärft, dass die Simulation im Dienst der Planung auf ein dynamisches Umfeld trifft, weshalb ein Modell an veränderliche Zielsetzungen und Anforderungen adaptierbar sein sollte. Dies kann nach LULAY [34] durch eine *selektive Hierarchisierung* erreicht werden, bei der die Detaillierung des Modells analog zur fortschreitenden Konkretisierung des Planungsprojektes stufenweise verfeinert wird. Einen erweiterten Ansatz stellt die *hierarchisch strukturierte Modellierung* dar, die einen „iterativen und wahlweisen Wechsel des Abstraktionsgrades“ [34] in der Betriebsphase des Modells ermöglichen soll. Durch eine *hierarchisch strukturierte Visualisierung* kann die Übersichtlichkeit detaillierter Modelle ohne wesentliche Einbußen bei der Anschaulichkeit gesteigert werden.

Die Detaillierung eines Simulationsmodells wirkt sich in der Regel unmittelbar auf das Laufzeitverhalten aus, da jedes zusätzliche Detail – sofern es für das simulierte Szenario überhaupt relevant ist – zusätzliche Rechenoperationen bedingt. Durch eine weniger abstrakte bzw. reduzierte Form der Repräsentation steigt die Anpassungsfähigkeit eines Modells, da mehr Ansatzpunkte für eine individuelle Gestaltung enthalten sind. Mit Blick auf die Wiederverwendbarkeit und die möglichst vielseitige Einsatzfähigkeit eines Modells kann es dabei sinnvoll sein, in einer primär eher abstrakten Modellstruktur auf optionale Verfeinerungsschritte Rücksicht zu nehmen.

#### 4.2.3.4 Ergebnisdarstellung und Interpretation

Durch die Simulation eines Szenarios wird ausgehend von einem definierten Anfangszustand eine Prognose für die Entwicklung des modellierten Systems für ein endliches Zeitfenster erstellt. Abhängig vom Einsatzzweck der Simulation interessiert dabei eher der Endzustand des Modells oder der Verlauf der simulierten Entwicklung. Letztere kann ggf. bereits während eines Simulationslaufs anhand einer mehr oder weniger aufwendigen Visualisierung (Monitoring oder Animation) untersucht werden. Dabei können auch interaktive Funktionen eine Rolle spielen, deren Umfang von der Kontrolle über den Zeitablauf (z. B. Einzelschritt-Modus) bis zum umfassenden Zugriff auf Bewegungsdaten und die Modellstruktur zur Laufzeit reichen kann. Derartige Funktionen sind vor allem in der Phase der Modellentwicklung und -überprüfung vorteilhaft (vgl. [31]).

Der Stellenwert der Animation im Modellbetrieb hängt dabei wiederum stark vom Einsatzzweck der Simulation ab: Dient das Simulationsmodell primär als Kommunikationsmedium, so steht eine möglichst realitätsnahe Animation des modellierten Systems oder ausgewählter Komponenten mit Echtzeit-Bezug und schematischer oder maßstäblicher zwei- oder dreidimensionaler Grafik im Vordergrund. Dagegen spielt die Beobachtung einzelner Simulationsläufe für Aufgaben im Kontext der Systemanalyse oder Entscheidungsunterstützung eine untergeordnete Rolle, da hier gesicherte Erkenntnisse nur durch umfangreichere Experimente mit zahlreichen Simulationsläufen erzielt werden können (vgl. Abschnitt 4.1.5.4, S. 61). Entsprechend stellt SCHMIDT fest:

„Die Ergebnisstatistiken eines Simulationsexperimentes sind noch vor der Animation das wichtigste Mittel zur Beurteilung des Modellverhaltens.“ [50]

Auf die Bedeutung und Vielfalt von Methoden zur Auswertung und Darstellung von Simulationsergebnissen weist auch GÜNZEL hin:

„Die gehobenen Ansprüche im Bereich Business-Grafiken haben sich auch in der Simulationstechnik bei der Visualisierung von Simulationsergebnissen niedergeschlagen.“ [20]

Viele Simulationswerkzeuge unterstützen dabei auch ein *Monitoring* [65], also die grafische oder numerische Wiedergabe von Kennzahlen während eines Simulationslaufes. Alternativ oder parallel zum Monitoring können Simulationsdaten direkt oder in verdichteter Form gespeichert und

zu einem späteren Zeitpunkt „offline“ ausgewertet werden. Relevante Daten können innerhalb der Simulationsumgebung oder über Schnittstellen in externen Dateien oder Datenbanken abgelegt werden.

Sofern für den realen Kontext des modellierten Systems oder die besondere Aufgabenstellung bestimmte Auswertungsmethoden oder Ausgabeformate für Betriebsdaten und Kennzahlen etabliert sind, sollten diese in Verbindung mit der Simulation entweder direkt übernommen oder zumindest adaptiert werden, um den Interpretationsaufwand gering zu halten und die Kommunikation zu erleichtern. In Zusammenhang mit der Simulation von Produktionsabläufen kommt unter diesem Aspekt den *Gantt-Charts* besondere Bedeutung zu. Diese Diagramme, die als Komponente von Planungs- und Leitstandsystemen allgemein verbreitet sind ([28] [34] [56]), geben nach dem Prinzip einer grafischen Plantafel die wechselnden Zustände von Systemkomponenten in Form von Balken und/oder Polygon-Zügen entlang einer gemeinsamen Zeitachse wieder, sodass die zeitliche Relation von Zuständen und Zustandsänderungen auch in parallel ablaufenden Prozessen nachvollziehbar ist.

Art und Umfang der Aufzeichnung und Auswertung von Daten sollten gezielt auf die Aufgabenstellung abgestimmt sein. Während für Reihenexperimente mit definierter Zielsetzung ein einheitlicher, automatisch generierter „Standardbericht“ sinnvoll sein kann, ist häufig eine flexiblere Vorgehensweise angebracht, bei der ein zur Laufzeit der Simulation unter Umständen noch unbestimmtes Instrumentarium von Analysemethoden innerhalb und außerhalb der Simulationsumgebung zum Einsatz kommt.

### **4.3 Charakteristika der verwendeten Simulationstechnik**

Zur Simulation wurde in dieser Arbeit ein umfangreiches Softwarepaket eingesetzt, das im Lauf der vergangenen Jahre mehrfach umstrukturiert, umbenannt und kontinuierlich erweitert wurde. Die Basistechnologie geht auf das Produkt „SIMPLE++“ der AESOP GmbH zurück, das von der Firma Tecnomatix Technologies Ltd. unter dem Namen „eMPlant“ in eine umfangreiche Suite von fertigungsorientierten Softwarelösungen integriert wurde. Obwohl die Leistungsfähigkeit, der Bedienkomfort, das Schnittstellenangebot und die Qualität der Benutzeroberflächen kontinuierlich weiterentwickelt wurden, sind die logischen Prinzipien für Aufbau und Ablauf der Simulationsmodelle bisher ohne einschneidende Änderungen erhalten geblieben, sodass sie hier ohne Bezug zu einer speziellen Softwareversion einheitlich beschrieben werden können.

#### **4.3.1 Aufbau- und Ablaufprinzip**

##### **4.3.1.1 Ablaufprinzip: Ereignisorientierung**

Hinsichtlich der Zeitverwaltung in Simulationsmodellen kann man zwischen diskreter und (quasi-)kontinuierlicher Simulation unterscheiden [29]. Die Letztere basiert auf einer äquidistanten Einteilung der eigentlich kontinuierlichen Zeitdimension und entwickelt das Systemverhalten



entlang der dadurch gebildeten diskreten Intervalle inkrementell [53]. Dagegen beschränkt sich die diskrete Simulation auf die Betrachtung der Zeitpunkte, an denen im abgebildeten System definierte Ereignisse, z. B. Zustandsänderungen, eintreten. „Ereignisfreie“ Simulationszeit wird dabei nicht simuliert, sondern mit minimalem Rechenaufwand übersprungen. Als „Motor“ der Simulation dient in eMPlant der *Ereignisverwalter*, der einen Bestand zukünftiger Ereignisse verwaltet, indem er zyklisch das jeweils nächstliegende Ereignis bestimmt und auswertet. Welche Operationen dabei auszuführen sind, geht aus der logischen Struktur des jeweiligen Simulationsmodells hervor. Häufig werden beim Auswerten eines Ereignisses zusätzliche zukünftige Ereignisse festgelegt, sodass sich der Ereignisbestand in einer Kettenreaktion dynamisch entwickelt [34]. Ein Grundproblem bei diesem Verfahren sind exakt gleichzeitige Ereignisse, die nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können, sodass die Reihenfolge ihrer Auswertung eine Rolle spielt. SCHMIDT [50] schlägt vor, in solchen Fällen eine Reihenfolge „auszuwürfeln“. Im Vergleich zur kontinuierlichen Simulation arbeitet die ereignisorientierte Simulation präziser und effizienter, da sich die Auflösung der Zeitachse und damit auch der Rechenaufwand pro Simulationszeit in Abhängigkeit von der Ereignisdichte zur Laufzeit dynamisch entwickelt [50].

Neben der ereignisorientierten Simulation werden als weitere Varianten der diskreten Simulation die aktivitäts- und prozessorientierte Simulation angeführt [29] [31]. In diesen Ansätzen werden Ereignisse nicht isoliert, sondern gruppiert zu Aktivitäten (mit Anfangs- und Endereignis) bzw. Prozessen (logische Gebilde aus Ereignissen oder Aktivitäten) betrachtet. Beide Prinzipien setzen dabei eine ereignisdiskrete Sicht auf den Prozessablauf voraus, sodass sie auch in Kombination eingesetzt werden können [29]. Auch in den im Zuge dieser Arbeit erstellten Modellen wird die primär ereignisorientierte Basisfunktionalität von eMPlant in unterschiedlicher Weise genutzt, um übergeordnete Ablaufstrukturen darzustellen.

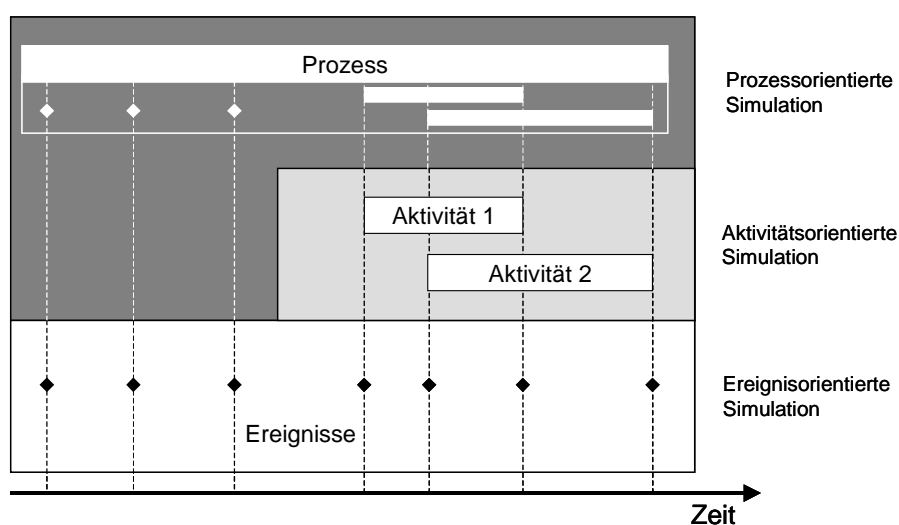


Bild 30: Relation zwischen unterschiedlichen Varianten der diskreten Simulation

### 4.3.1.2 Aufbauprinzip: Objektorientierung

„Der Mensch ist gewohnt, in Objekten und Objektstrukturen zu denken.“ [31]

Da das Konzept der Objektorientierung dementsprechend vielseitig angewendet wird (Systemanalyse, Softwareentwicklung, Datenbanktheorie, usw.), existiert keine allgemeinverbindliche Definition für den Objektbegriff. Einen Überblick über die Grundlagen der Objektorientierung bieten mit unterschiedlicher Akzentuierung SPITZ [54] (Objektorientierte Analyse) oder KÜSTER [31] (Objektorientierte Modellbildung in der Produktionstechnik). Im Kontext von Simulationsmodellen reicht die Bedeutung der Objektorientierung von der intuitiven Abstraktion bis zur formalen Realisation. Dieser Absatz bezieht sich allerdings nur auf ausgewählte Aspekte der verwendeten Software.

Wie die meisten modernen Systeme zur diskreten Simulation bietet eMPlant die Möglichkeit, individuelle Modelle auf der Grundlage vorgefertigter Standardbausteine mit elementarem Funktionsumfang aufzubauen [50]. Die grobe Einteilung dieser Bausteine folgt dabei der verbreiteten Klassifikation in bewegliche und stationäre Objekte [16] [50]. Schon das Vorgängerprodukt SIMPLE++ wurde als „stark grafisch orientiertes System“ bezeichnet [20], da seine Bedienoberfläche eine schematische Repräsentation der Modellstruktur durch animierte Bitmaps verwendet. In Verbindung mit dem Bausteinkonzept unterstützt eMPlant einen modularen und hierarchischen Modellaufbau und das objektorientierte Arbeiten mit den folgenden Schlüsselfunktionalitäten:

- Klassenbildung und hierarchische Vererbung über mehrere Stufen
- Synthese von benutzerdefinierten Objekten bzw. Klassen („Netzwerke“)
- hierarchischer Modellaufbau durch Verschachteln von Netzwerken
- Zugriff auf Bausteine und deren Attribute und Funktionen über Klartext-Pfade
- proprietäre Skriptsprache zur Definition individueller Funktionalitäten

Das Bausteinkonzept verbindet dabei die *top-down*- mit der *bottom-up*-Entwurfsmethodik [31] [50], nachdem einerseits Standardbausteine oder in benutzerdefinierten Bibliotheken verwaltete Modellstrukturen zur Synthese komplexerer Module bzw. Modelle bereitstehen (*bottom-up*) und andererseits die Module innerhalb des hierarchischen Modellaufbaus nach Bedarf in immer detailliertere Substrukturen aufgelöst werden können (*top-down*).

Ein modularer Modellaufbau bietet in Verbindung mit der Objektorientierung außerdem die Möglichkeit der Kapselung, die ein wesentliches Hilfsmittel zur Komplexitätsbewältigung und damit auch zur effizienten Kommunikation sein kann (vgl. Abschnitt 4.2.3). Im Umgang mit Simulationsmodellen sollen für jeden Zweck bzw. Anwender genau diejenigen Informationen möglichst transparent und einfach verfügbar sein, die er für seine Aufgabe (Modellaufbau, Experimentplanung, Simulationsdurchführung, Auswertung, Pflege von Bausteinbibliotheken, Fehler-

suche und -beseitigung, usw.) benötigt. Die Kapselung bietet dabei die Möglichkeit, das „Innenleben“ eines Objekts abzuschirmen und seine externe Kommunikation auf definierte Schnittstellen zu beschränken. *eMPlant* unterscheidet dabei zwischen *Methoden* und *Attributen* eines Objektes. In der grafischen Benutzeroberfläche können durch den selektiven Zugriff auf diese Schnittstellen unterschiedliche Sichten auf dasselbe Objekt bereitgestellt werden, die anwender- bzw. aufgabenspezifischen inhaltlichen und formalen Anforderungen entsprechen.

Abgegrenzte Module können außerdem weitgehend unabhängig voneinander entwickelt, validiert und betrieben werden, während ein unstrukturiertes „Gesamtmodell“ weniger übersichtlich, aufwendiger in der Handhabung und damit auch anfälliger für Fehler ist [53]. Auch die Wiederverwendbarkeit von Modellkomponenten wird durch eine hierarchische Organisation des Modellaufbaus einerseits und die Vererbungslogik andererseits begünstigt.

### 4.3.2 Allgemeine Modellstrukturen

Bevor in Kapitel 5 unterschiedlich detaillierte Modellierungsansätze für die Bierherstellung vorgestellt werden, sollen hier die wichtigsten Strukturelemente von *eMPlant* kurz beschrieben werden. Es handelt sich dabei um Strukturen mit so elementarem Charakter, dass sie in ähnlicher Form in den meisten zu *eMPlant* vergleichbaren Simulationssystemen zu finden sein dürften. Auf allgemeine Elemente mit unterstützender Funktion (Datenverwaltung, Modellsteuerung, Visualisierung usw.) sei an dieser Stelle ausdrücklich verzichtet.

#### 4.3.2.1 Bewegliche Elemente

Eine Schlüsselrolle für die Ablaufsimulation mit *eMPlant* spielen „bewegliche Elemente“ (kurz: BE, *pl.*: BEs), die sich angetrieben durch einen zentralen „Ereignisverwalter“ in hierarchisch verschachtelbaren Netzwerken aus Knoten bzw. „stationären Bausteinen“ (vgl. 4.3.2.2) und Kanten bewegen und dabei Ereignisse auslösen, Kapazitäten beanspruchen aber auch Transportkapazität für andere bewegliche Elemente bieten können. Im Unterschied zu „Tokens“ in klassischen Petri-Netzen können sie zur Laufzeit des Modells von sogenannten „Quellen“ erzeugt und in „Senken“ vernichtet werden. Sie können beliebig parametrisiert, mit wechselnden Bitmaps animiert und mit benutzerdefinierten Prozeduren ausgestattet werden.

Im Kontext dieser Arbeit wurden bewegliche Elemente vorwiegend eingesetzt, um diskrete Chargen zu symbolisieren (vgl. 4.4.3). Gelegentlich dienen sie auch als reine Informationsträger im Sinn von „Aufträgen“, „Merkern“ oder „Nachrichten“.

#### 4.3.2.2 Stationäre Bausteine

„Stationäre Bausteine“ mit einer begrenzten Aufnahmekapazität für bewegliche Elemente werden durch Kanten miteinander verbunden, um mögliche Wege für den Fluss von BEs in einem Modell festzuschreiben. *eMPlant* unterscheidet zahlreiche Basisklassen von stationären Bausteinen.

nen: Sie dienen z. B. der Bearbeitung („Einzelstation“, „Parallelstation“, usw.), dem Transport („Puffer“, „Förderstrecke“, usw.), der Lagerung („Lager“) oder dem Erzeugen und Vernichten („Quelle“, „Senke“) von beweglichen Elementen und sind wie diese parametrierbar, animierbar und programmierbar. Neben einer Aufnahmekapazität für bewegliche Elemente verfügen stationäre Bausteine über umfangreiche Standardfunktionalitäten (Warteschlangen- und Verriegelungsfunktionen für Ein- und Ausgänge, Auswahlstrategien bei Verzweigungen, usw.), die den Fluss der BEs durch das Modell maßgeblich bestimmen.

In den nachfolgend vorgestellten Modellen wurden stationäre Bausteine eingesetzt, um Kapazitäten, Ressourcen, Prozessstufen oder Prozessschritte der Bierherstellung abzubilden. Häufig werden solche Entitäten der realen Welt aber auch aus mehreren verknüpften Bausteinen konstruiert. Jeder einzelne stationäre Baustein übernimmt dann nur eine Teilfunktion, wobei die resultierende Gliederung nicht an Entsprechungen im realen System oder Prozess gebunden ist.

#### **4.3.2.3 Dienste, Broker und Exporter**

Gemeinsam genutzte Ressourcen oder andere übergreifende Kapazitätsrestriktionen sind direkt im Material- bzw. Informationsfluss, also mit stationären Bausteinen und Kanten, in vielen Fällen nur unvollständig oder sehr umständlich abbildbar. Stattdessen bietet *eMPlant* das Konzept der „Dienste“ an, die von stationären Bausteinen während bestimmter Vorgänge („Rüsten“, „Bearbeiten“, „Entstören“) beansprucht werden können. Bausteine vom Typ „Exporter“ bieten bestimmte Dienste in begrenzter Kapazität an. Sogenannte „Broker“-Bausteine vermitteln dabei zwischen der Nachfrage durch stationäre Bausteine und dem Angebot der Exporter.

Mit diesen Elementen, die ebenfalls durch benutzerdefinierte Prozeduren erweiterbar sind, wurden verschiedene komplexere Szenarien für den Ressourcenzugriff bewältigt.

#### **4.3.2.4 Netzwerke, Schnittstellen und Klassen**

Sämtliche Strukturelemente in *eMPlant* werden in sogenannten Netzwerken angeordnet und soweit zulässig direkt miteinander verknüpft. Ganze Netzwerke können außerdem ineinander verschachtelt und mit dem Bausteintyp „Schnittstelle“ untereinander sowie mit anderen Bausteinen verknüpft werden, sodass Modelle modular und hierarchisch strukturiert werden können. Ganze Netzwerke mit fast beliebig komplexer Substruktur können als „Klassen“ in Bibliotheken verwaltet und nach Bedarf instanziiert, dupliziert aber auch „bastardisiert“ werden, indem die Vererbungsbeziehung zur Klasse für eine bestimmte Instanz aufgehoben wird. Auch Netzwerke können dabei wie die stationären Standard-Bausteine parametrierbar, animiert und mit benutzerdefinierten Prozeduren, Eigenschaften und sogar Kontext-Menüs ausgestattet werden.

## 4.4 Ablaufsimulation der Chargenproduktion

Der Begriff der *Chargenproduktion* wird nachfolgend in Anlehnung an die Klassifikation von Produktionseinrichtungen nach ISA-S95 [1] (*equipment hierarchy model*) gebraucht, die innerhalb der Produktion *Chargenprozesse*, *kontinuierliche Prozesse* und *diskrete Prozesse* nebeneinanderstellt und letztere weiter in repetitive und nicht-repetitive Prozesse unterteilt. Repetitive diskrete Prozesse können in Verbindung mit einem diskontinuierlichen Produktionsablauf dabei auch Züge einer Chargenproduktion aufweisen, wie dies auch die Definition der *Chargenfertigung* nach KAHLE [26] nahelegt. Trotzdem sollen hier als Chargenprozesse ausschließlich diskontinuierliche aber verfahrenstechnisch geprägte Produktionsabläufe im Gegensatz zu diskreten Fertigungs- und Montageprozessen verstanden werden.

### 4.4.1 Chargenprozesse im Vergleich zu Fertigung und Montage

Wie in Abschnitt 4.2.1 erläutert, sind bei der Simulation von Produktionsprozessen die Bereiche *Technik*, *Technologie* und *Organisation* und deren Wechselwirkungen in geeigneter Weise zu berücksichtigen. Da dieser Anspruch unabhängig vom Typ des abzubildenden Systems besteht, sollen nachfolgend ausgewählte Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Chargenprozessen einerseits und Fertigung und Montage andererseits hingewiesen und deren Bedeutung für die Ablaufsimulation diskutiert werden.

#### 4.4.1.1 Charakteristika von Fertigungs- und Montageprozessen

Gegenstand von Fertigungs- und Montageprozessen sind typischerweise Festkörper, die eine Folge von Bearbeitungs- und/oder Montageschritten durchlaufen und dabei ggf. zwischen unterschiedlichen Arbeits- und Lagerplätzen bzw. Puffern bewegt werden. Die einzelnen Schritte erfolgen fast immer sequenziell und zeitlich sowie oft auch räumlich voneinander isoliert. Die Bearbeitungsdauer kann dabei zumindest für einen automatisierten Einzelschritt bei störungsfreiem Verlauf als nahezu konstant betrachtet werden. Bei Serien- oder Massenproduktion mit einer häufigen Wiederholung jedes Einzelschritts in Verbindung mit in unregelmäßigen Abständen auftretenden Störungen von unterschiedlicher Dauer wird häufig eine stochastische Betrachtungsweise gewählt. Auch die Qualitätsmerkmale der einzelnen Produkte können dabei schwanken bzw. zufällig streuen, sodass mit fixen oder variablen Quoten für Nachbearbeitung oder Ausschuss zu rechnen ist. In Prozessketten treten außerdem unproduktive Liegezeiten auf, deren Dauer sich aus der Arbeitsweise und Verfügbarkeit der aufeinanderfolgenden Stationen ergibt und damit sowohl von zufälligen als auch von deterministischen Einflüssen abhängt.

Für die Ablauforganisation werden zwischen den Extremfällen der *Fließfertigung* nach dem *Prozessfolgeprinzip* und der *Werkstattfertigung* nach dem *Verrichtungsprinzip* zahlreiche Übergangsformen beschrieben, durch die eine wirtschaftliche Arbeitsweise bei unterschiedlichen technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen ermöglicht werden soll. Die Auswahl

eines *Organisationstyps* bzw. die konkrete Gestaltung der Organisation steht dabei in engem Zusammenhang mit dem vorgesehenen *Fertigungstyp* (Einzelfertigung, Serienfertigung, Sortenfertigung oder Massenfertigung) [68]. Für beide Auswahlentscheidungen sind oft vor allem die Rahmenbedingungen im Absatzmarkt und die Charakteristika der jeweiligen Branche ausschlaggebend. Hinter der Wirtschaftlichkeit der Produktion als Gesamtziel konkurrieren dabei als wichtige Teilziele ein hoher Automatisierungsgrad, eine hohe Auslastung der Teilsysteme und eine hohe Flexibilität der Prozessabläufe. *Flexible Fertigungssysteme (FFS)* sollen zwischen solchen Teilzielen optimal vermitteln [52] [53].

#### 4.4.1.2 Charakteristika von Chargenprozessen

Ein typischer Gegenstand von Chargenprozessen sind flüssige Medien sowie Stoffgemische mit unterschiedlichen Phasen, die mehrstufige chemisch-physikalische Prozesse durchlaufen und dabei zwischen unterschiedlichen Apparaten und Pufferbehältern gefördert werden. Überlagerungen und die Nebenläufigkeit von Teilprozessen sind dabei eher die Regel als die Ausnahme. Eine einzelne Charge, deren Menge (Masse bzw. Volumen) sich meist an technologischen Restriktionen oder den Abmessungen der verwendeten Apparate orientiert, kann zumindest für einen begrenzten Prozessabschnitt als insgesamt manipulierbare Einheit ähnlich einem Werkstück betrachtet werden. Solche Chargen-, „Werkstücke“ können allerdings bei Bedarf in homogene Teilchargen gesplittet, in heterogene Teilchargen fraktioniert oder zu größeren Chargen mit intermediären Eigenschaften vermischt werden.

Während der Prozessablauf bei Fertigung und Montage häufig unmittelbar anschaulich ist, entziehen sich die Abläufe in Chargenprozessen oft der direkten Beobachtung, weil sie ohne sichtbare Veränderungen und/oder in geschlossenen Behältern ablaufen. Zur Prozesskontrolle sind daher zur Sicherung der Produktqualität und optimaler Abläufe in nachfolgenden Prozessstufen zahlreiche Messgrößen und Analysewerte zu überwachen.

Die Prozessführung folgt üblicherweise einem strukturierten Rezept, das formale Parallelen zur Definition einer Arbeitsgangfolge für Fertigung und Montage aufweisen kann. Während die Arbeitsgangfolge eine gezielte Komposition von auszuführenden Verrichtungen darstellt, beschreibt das Rezept lediglich ein „Außenskelett“ von Vorgaben und Maßnahmen, durch die der kontrollierte Ablauf eines komplexen Prozesses erreicht werden soll. Der tatsächliche Prozessverlauf unterliegt dabei letztendlich einer prozessimmanenten Dynamik, die für jede Charge individuell bestimmt, ob oder nach welcher Zeit ein gewünschter Endzustand erreicht wird, bzw. welche qualitativen Eigenschaften nach einer vorgegebenen Prozessdauer vorliegen. Die qualitative *Varietät* zwischen einzelnen Chargen desselben Produkts wird dabei auch durch Qualitätsunterschiede der eingesetzten Rohstoffe oder Vorprodukte beeinflusst [25]. Beide Effekte sollten durch regulierende Maßnahmen bei der Prozessführung weitgehend kompensiert werden, um eine möglichst einheitliche Qualität zwischen nach demselben Rezept produzierten Chargen zu erzielen. Der Aspekt der Qualitätssicherung bzw. Qualitätskonstanz trägt neben Betriebssicher-

heit und Rentabilität wesentlich zum besonderen Stellenwert der Automatisierung im Bereich der Chargenprozesse bei [56]. Nach einem irregulär verlaufenen Prozessabschnitt kann eine Charge aus technologischen Gründen meist nicht „nachbearbeitet“ werden. Gleichzeitig ist eine „Auschussquote“ für ganze Chargen aus wirtschaftlicher Sicht meist ebenfalls inakzeptabel, sodass „fehlerhafte“ Chargen nur in Extremfällen verworfen, in der Regel aber z. B. durch Verschneiden verwertet werden. Diese Methode kann auch als regulärer Verfahrensschritt zur Qualitätskonstanz beitragen.

Die Rezeptsteuerung stellt, als Methode der Wahl für die Automatisierung von Chargenprozessen, eine gewisse grundsätzliche Flexibilität in der Ablaufgestaltung sicher, da sich unterschiedliche Rezepte prinzipiell nicht nur hinsichtlich ihrer quantitativen Parameter sondern auch strukturell unterscheiden können. Die Freiheitsgrade für die per Rezept realisierbaren Abläufe sind dabei durch die nur begrenzt verfügbaren Anlagenkomponenten nach Anzahl und Typ und deren mehr oder weniger flexible Verschaltung zu einer bestimmten Topologie eingeschränkt. Während eine einsträngige Einproduktanlage – z. B. als Verkettung spezialisierter Apparate, die von allen Chargen durchlaufen werden – deutliche Parallelen mit seriellen Anordnungen von Maschinen in der Fließfertigung aufweist, ähnelt die Fahrweise von Mehrzweck-Anlagen, in denen mit vernetzten multifunktionalen Apparaten unterschiedlichste Verfahren dargestellt werden können, eher der Werkstattfertigung bzw. der Arbeitsweise Flexibler Fertigungssysteme. Im Gegensatz zur Werkstattfertigung, für die „logisch und chronologisch ungebundene Produktionsabläufe“ [34] mit Zwischenlagern und Warteschlangen typisch sind, bestehen für die Reihenfolge und den Zeitablauf der Prozessschritte innerhalb eines Chargenprozesses meist vergleichsweise strikte Restriktionen. Wie bei Fertigung und Montage existieren zwischen den hier dargestellten Extremen in der Praxis vielfältige Übergangsformen, die den wirtschaftlichen, organisatorischen und technologischen Besonderheiten im Einzelfall Rechnung tragen.

## **4.4.2 Anforderungen an die Ablaufsimulation von Chargenprozessen**

### **4.4.2.1 Simulation der Rezeptfahrweise**

Die getrennte Behandlung und Beschreibung von Anlagen und Verfahren hat sich in Zusammenhang mit der Rezeptfahrweise für Chargenprozesse (vgl. Abschnitt 2.1.2.3) weitgehend durchgesetzt. Für den Bereich der Automatisierung von Chargenprozessen sei hier auf die gängigen Ansätze zur Standardisierung NAMUR NE33 [40] und ANSI/ISA S88 [2] verwiesen. Durch eine anlagenunabhängige Verfahrensbeschreibung wird die Übertragbarkeit eines Rezepts auf unterschiedliche Anlagen erleichtert. Umgekehrt ermöglicht die nicht verfahrensspezifische Definition des Funktionsumfangs von Anlagen oder deren Subsystemen als Repertoire allgemeiner Grundoperationen und/oder Grundfunktionen deren flexiblen Einsatz, z. B. im Mehrproduktbetrieb mit wechselnden Schrittfolgen oder auch zur Darstellung dynamisch veränderlicher Prozeduren innerhalb eines Verfahrens. Die logische Entflechtung von Anlagensicht und Verfahrens-

sicht beruht auf einer weitgehenden Abstraktion und Formalisierung, was die Konzeption von Simulationsmodellen erleichtern kann. Die erhöhte Flexibilität durch die Entkopplung erfordert dabei einerseits einen Mehraufwand, da neben den Anlagen auch die Rezepte im Simulationsmodell verwaltet und zur Laufzeit verarbeitet werden müssen. Andererseits können Modellkomponenten, die einen flexiblen Ablauf unterstützen, mit größerer Wahrscheinlichkeit bzw. geringerem Aufwand an wechselnde Aufgaben angepasst und damit vielseitiger eingesetzt werden.

Ob oder inwieweit eine explizite formale Trennung zwischen der Anlagen- und Verfahrensdefinition bei der Ablaufsimulation von Chargenprozessen tatsächlich erforderlich oder vorteilhaft ist, hängt demnach von den Gegebenheiten im konkreten Fall ab:

Die Argumente, die für die Rezeptfahrweise im realen Betrieb einer Anlage sprechen, müssen für die Ablaufsimulation nicht relevant sein. Unter Umständen unterscheiden sich Rezepte nur auf einer höheren Detaillierungsstufe, als es die Aufgabenstellung der Simulation erfordert. In diesem Fall kann für das Simulationsmodell ein einheitlicher Ablauf angenommen und auf die Rezeptverarbeitung verzichtet werden. Dies trifft auch zu, wenn sich bei Mehrproduktbetrieb die Unterschiede zwischen Rezepten auf die Parametrierung (z. B. Mengenangaben, Schrittdauern, Einsatzstoffe) beschränken, was für den Brauprozess häufig zutrifft (vgl. Tabelle 3, S. 15).

Der Mehraufwand für ein rezeptorientiertes Modellkonzept sollte in Relation zur Zeitersparnis bei einer strukturellen Reorganisation im Anlagen- und/oder Verfahrensbereich betrachtet werden. Der Projektkontext bestimmt dabei, wie viele Varianten oder Szenarien anhand der Simulation untersucht werden sollen und welche strukturelle Spannweite dabei abzudecken ist. Der Aufwand für das Rezeptmanagement im Modell hängt dabei nicht zuletzt von der Qualifikation der Anwender und der verwendeten Software ab. Während flexible, rezeptähnliche Abläufe für einen kompetenten Simulationsanwender mit elementaren Programmierkenntnissen meist vergleichsweise einfach zu realisieren sind, setzt die Verwaltung frei definierbarer Abläufe über grafische Benutzerschnittstellen umfangreiche, für viele Zwecke unverhältnismäßig aufwendige Funktionalitäten voraus. Soweit solche Funktionen Bestandteil eines Simulationssystems sind, zielt der angebotene Funktionsumfang oft primär auf eine möglichst vielseitige Anwendbarkeit, was zwangsläufig mit dem Ziel einer möglichst einfachen und zweckmäßigen Bedienoberfläche gemäß den individuellen Bedürfnissen des Anwenders in Konflikt steht.

#### **4.4.2.2 Ereignisorientierte Prozesssimulation**

Grundsätzlich ist eine ereignisorientierte Perspektive für den Bereich der Verfahrenstechnik nur eingeschränkt anwendbar, wie auch LULAY feststellt:

„Die hohe Realitätsnähe der ereignisdiskreten Modellierung ist nur bei der Abbildung ereignisdiskreter Prozesse, wie es Produktionsprozesse in der Stückgutfertigung sind, gegeben. Für kontinuierliche Prozesse, etwa aus dem Bereich der Verfahrenstechnik, gilt dies keineswegs.“ [34]



Ob oder inwieweit diese Einschränkung für die Modellierung und Simulation der verfahrenstechnischen Chargenproduktion zutrifft, hängt vom Gegenstand der Untersuchung und dem gewählten Detaillierungsgrad ab. Innerhalb der Verfahrenstechnik verbindet man mit dem Begriff der Chargenproduktion allgemein die Darstellung *diskontinuierlicher* Prozesse im Gegensatz zu den oben angesprochenen kontinuierlichen. Entsprechend weist die Rezeptfahrweise, wie im vorigen Abschnitt erörtert, grundsätzliche Parallelen zur diskreten Fertigung auf. Andererseits laufen die Zustandsänderungen durch chemisch-physikalische Teilprozesse innerhalb der Chargenproduktion auf elementarer Ebene grundsätzlich kontinuierlich ab. Soweit ausreichende Informationen über die zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten und Materialeigenschaften vorliegen, können Chargenprozesse auch durchaus als Kette kontinuierlicher Teilprozesse beschrieben werden. Einen hybriden Ansatz, der unter anderem das ereignisabhängige Lösen von Differenzialgleichungssystemen beinhaltet, stellen beispielsweise LIEFELDT ET AL. [32] vor.

Während die möglichst exakte und detaillierte Wiedergabe der internen Prozessdynamik in kontinuierlichen oder hybriden Modellen für Aufgaben wie die simulationsgestützte Steuerung von Chargenprozessen notwendig bzw. vorteilhaft sein kann, stehen für die Aufgaben der Anlagen- und Produktionsplanung die diskreten Aspekte der Chargenproduktion im Vordergrund. Wie bei der Modellierung von Produktionssystemen im Bereich der Fertigung und Montage muss der Durchlauf von Objekten (Werkstücke, Aufträge, Chargen) durch mehr oder weniger verzweigte Netzwerke aus Knoten (Maschinen, Apparate, Prozessstufen) und Kanten (Förderstrecken, Leitungswege, Zustandsänderungen) nach definierten statischen oder dynamischen Regeln abgebildet werden. In seriellen Anordnungen können Verzögerungsketten auftreten, die auf stochastische Effekte oder organisatorische Diskontinuitäten zurückgehen. In nebenläufigen Anordnungen „entsteht i. a. die Notwendigkeit einer Koordination der Prozesse“ [29]. Produktionsmodelle müssen dabei den dynamischen Zugriff auf exklusiv oder gemeinsam genutzte Ressourcen, deren begrenzte Kapazität und eingeschränkte Verfügbarkeit sowie ggf. ein möglichst realitätsnahes Engpassmanagement (durch Warteschlangen, Prioritätsregeln, usw.) wiedergeben.

Wie die umfangreiche Anwendungspraxis im Bereich der Fertigung und Montage belegt, entspricht die ereignisorientierte Simulation diesen Anforderungen. Auch für die Chargenproduktion typische Nebenbedingungen, wie die begrenzte Lagerfähigkeit von Materialien, Vorgaben zur Menge je Charge oder das Rüsten und Reinigen von Apparaten [32], stehen nicht in Konflikt mit einer ereignisorientierten Perspektive. Die für die Ablaufsimulation maßgebliche Dauer einzelner Prozessschritte kann durch deterministische Mechanismen oder stochastische Komponenten für viele Planungsaufgaben mit ausreichender Präzision abgebildet werden, ohne dass die zugrunde liegenden kontinuierlichen Abläufe im Detail bekannt und berechenbar sein müssen.

Für die Prozesse der Bierherstellung, die sich aufgrund ihrer Vielschichtigkeit einer umfassenden kontinuierlichen Modellrechnung ohnehin weitgehend entziehen, bieten vor allem technologische oder steuerungstechnische Vorgaben zum Zeitablauf wichtige Anhaltspunkte für eine Mo-

dellierung. Dabei wirkt sich ein hoher Automatisierungsgrad ähnlich günstig aus, wie dies GUENZEL [20] für die Simulation flexibler Fertigungs- und Montagesysteme feststellt. Nicht technologisch, sondern rein technisch bedingte Schrittdauern, z. B. für das Umpumpen von Chargen in Abhängigkeit von Menge und Transferrate, können zur Laufzeit der Simulation dynamisch berechnet werden.

#### 4.4.3 Chargen als bewegliche Elemente

Ein verbindendes Merkmal der im folgenden Kapitel vorgestellten Modellierungsansätze mit unterschiedlich detaillierter Sicht auf die Bierherstellung ist, dass die produzierten Chargen durch bewegliche Elemente repräsentiert werden, die nachfolgend als „Chargen-Objekte“ bezeichnet werden sollen. Sie werden zur Laufzeit der Simulation meist von einem Baustein des Typs „Quelle“ generiert, um den Eintritt einer Charge in den betrachteten Bereich oder deren tatsächliche Produktion abzubilden. Die „Quelle“ bietet eine Auswahl parametrierbarer Betriebsarten an, die als Basis für einfachere Anwendungsfälle geeignet und in Kombination mit anderen Bausteinen und benutzerdefinierten Methoden vielseitig anpassbar sind. Bewegliche Elemente können aber auch an beliebigen Orten im Modell mithilfe von benutzerdefinierten Prozeduren erzeugt werden. Wesentliche Parameter für das Erzeugen von beweglichen Elementen sind unabhängig vom gewählten Weg (Quelle oder Prozedur) und dem Erzeugungsort die Objektklasse und der Zeitablauf.

Bezüglich der *Objektklasse* ist grundsätzlich zu entscheiden, ob Chargen-Objekte unterschiedlicher Sorten als individuelle Objektklassen angelegt oder ausgehend von einer einheitlichen Objektklasse durch unterschiedliche Parametrierung zur Laufzeit differenziert werden sollen. Für den zweiten Weg, der einen gewissen Programmieraufwand bedingt, spricht vor allem, dass eine einheitliche Objektklasse mit geringerem Aufwand anpassbar ist. Soweit die auf Klassenebene definierten Standardwerte für die Attribute eines Chargen-Objekts (Sorte, Menge, Zusammensetzung, usw.) nicht für alle Chargen einheitlich gelten, sind Chargen-Objekte nach dem Erzeugen entsprechend zu initialisieren. Allerdings müssen nicht alle chargenbezogenen Informationen in Attributen des Chargen-Objekts verwaltet werden. Wenn eine Charge z. B. durch ein Attribut „Chargennummer“ eindeutig identifizierbar ist, kann diese Angabe bei Bedarf als Referenz für den Zugriff auf Datenquellen (Tabellen, Listen, Matrizen) innerhalb oder sogar außerhalb des Simulationsmodells dienen, sodass sich das vollständige Parametrieren jedes einzelnen Chargen-Objekts erübrigt. Mit Blick auf die Wiederverwendbarkeit eines Modells in Szenarien mit wechselndem chargenbezogenen Informationsumfang ist es meist effizienter, den Inhalt und die Struktur einer zentralen tabellarischen Datenquelle projektspezifisch anzupassen, als die Objektstruktur entsprechend zu modifizieren.

Der *Zeitablauf* für das Erzeugen von Chargen kann durch einen statischen Fahrplan (Sudplan, Filtrationsplan, Abfüllplan) vorbestimmt sein oder anhand von Vorgaben für die Betriebsweise

(Zykluszeit, Prozessdauer, Schichtplan, usw.) zur Laufzeit der Simulation berechnet werden. Dabei sind auch Mischformen möglich, wenn z. B. eine vorbestimmte Reihenfolge von Chargen bzw. Produktionsaufträgen mit unterschiedlicher Sorte (Produktionsfolge ohne explizite Zeitangaben) ab einem gewissen Starttermin mit fest oder dynamisch bestimmtem Zeitablauf abgearbeitet werden soll.

## 5 Simulation der Bierherstellung

Nach einleitenden Informationen zum Prozess der Bierherstellung (Kapitel 2) und den damit verbundenen Planungsaufgaben (Kapitel 3) wurden in Kapitel 4 der Stellenwert von Modellen und das grundsätzliche Potenzial einer simulationsgestützten Planung in der Chargenproduktion dargestellt. Das vorliegende Kapitel 5 stellt systematische Ansätze für die ereignisorientierte Simulation der Bierherstellung vor, die entlang einer Reihe von Simulationsprojekten entwickelt wurden. Die hier vorgestellte Systematik ist ein Resultat dieser mehrjährigen „Evolution“ und stand nicht etwa *a priori* als starres Gebilde fest. Sie basiert auf einer Skala von Modellperspektiven mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad, die allerdings nicht als Katalog von scharf abgegrenzten „Schubladen“ zu verstehen ist.

Tabelle 5 spannt zwischen den Prozessstufen der Bierherstellung und den mit aufsteigender Detaillierung angeordneten Modellperspektiven eine Matrix auf und verweist ggf. auf Abschnitte dieses Kapitels, in denen exemplarische Modellansätze vorgestellt werden. Diese können nur als Anhaltspunkte für eine problemspezifische „Interpolation“ bei der Entwicklung oder Spezifikation angemessen detaillierter Brauereimodelle dienen, da sowohl der Prozessausschnitt als auch die angebrachte Modellperspektive in jedem Simulationsprojekt detailliert und individuell abzugrenzen sind.

Tabelle 5: Matrix aus Modellperspektiven und Prozessstufen mit Verweisen auf die Gliederung

Textabschnitt		Prozessstufen der Bierherstellung		
Modellperspektive	Definition	Würzproduktion	Fermentation	Filtration
materialorientiert	5.1.1	-.-	-.-	-.-
kapazitätsorientiert	5.1.2	5.2.1	5.3.1	5.4.1
ressourcenorientiert	5.1.3	5.2.2	5.3.3	5.4.2
prozessorientiert	5.1.3	5.2.3	5.3.4	5.4.3
technologisch	5.1.5	-.-	-.-	-.-

### 5.1 Modellperspektiven mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad

Unterschiedliche Aufgaben der Anlagen- und Produktionsplanung erfordern unterschiedliche inhaltliche Schwerpunkte bei der Modellgestaltung. Der erforderliche Detaillierungsgrad kann dabei in sehr weiten Grenzen schwanken, weshalb in beiden Gebieten häufig zwischen „Grobplanung“ und „Feinplanung“ unterschieden wird.

Bild 31 zeigt im linken Bereich die fünf Detaillierungsebenen, jeweils durch ein Schlagwort charakterisiert, das sich auf den wesentlichen Fokus der Aufgabenstellung bzw. des Modelleinsatzes bezieht. Mit zunehmender Detailtiefe werden die hier höher eingestuften Inhalte dabei nicht hin-

fällig. Vielmehr bilden sie einerseits die kumulative Basis für weitere Detaillierungsschritte. Andererseits können detaillierte Modelle ggf. unter Einsatz geeigneter Verdichtungsfunktionen auch den Informationsbedarf höherer Ebenen bedienen.

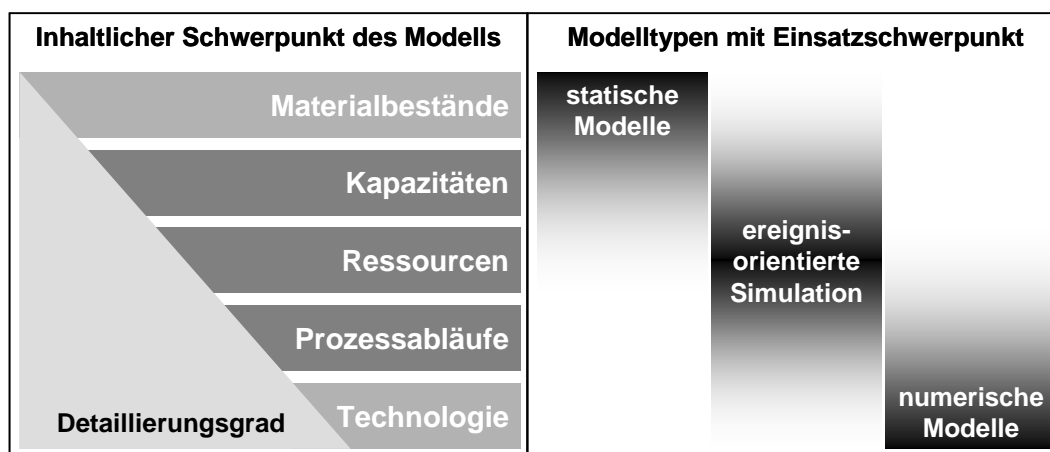


Bild 31: Einsatzschwerpunkt verschiedener Modelltypen abhängig vom Detaillierungsgrad

Der Bereich rechts lokalisiert das Einsatzgebiet der *ereignisorientierten* Simulation relativ zur links dargestellten Systematik, das schwerpunktmäßig im Bereich der mittleren, dunkler schattierten Detaillierungsebenen liegt. In den angrenzenden Ebenen dominieren andere Modelltypen, die jeweils durch ein Beispiel repräsentiert sind.

### 5.1.1 Materialorientierte Perspektive

Die Basis für alle detaillierten Ansätze zum Modellieren eines Produktionsbetriebs bildet eine materialorientierte Perspektive. Diese betrachtet die in der Produktion umgesetzten Stoffe in qualitativer und quantitativer Hinsicht. Zunächst ist dabei zu definieren, welche Rohstoffe, Zwischen- und Endprodukte für die Planungsaufgabe relevant sind. Dies setzt zumindest ein einfaches Prozessmodell voraus, das eine Gliederung in Prozessstufen und entsprechende Umwandlungsschritte zwischen den relevanten Materialien festlegt. Für den Mehrproduktbetrieb ist zu bestimmen, auf welchen Prozessstufen welche Sorten unterschieden werden. Wie ein einfaches Beispiel in Bild 32 illustriert, sind nicht für jede Sorte über alle Prozessstufen individuelle Materialien zu unterscheiden, z. B. wenn aus demselben Material verschiedene Zwischenprodukte hergestellt werden können.

Für die anhand der Prozessstufen und des Sortiments qualitativ zu unterscheidenden Materialien können Bestandsänderungen und Bedarfe im Zeitverlauf mithilfe einfacher Modelle berechnet werden, wenn Richtwerte für die Dauer und ggf. die Ausbeute der Umwandlungsschritte („Prozesse“) bekannt sind. Sofern keine individuellen Dispositionsspielräume, dynamischen Wartezeiten oder Kapazitätsengpässe zu berücksichtigen sind, kann der Durchlauf von Mengen (z. B.

Chargen oder Aufträgen) über mehrere Stufen durch statische Berechnungsmethoden vorwärts- oder rückwärtsterminiert werden, je nachdem ob als Ausgangspunkt für die Planung ein Mengenplan für den Eintritt in den betrachteten Prozessabschnitt („Druck“ durch Produktionsaufträge bzw. Wareneingang) oder für den Austritt aus dem Produktionsabschnitt („Zug“ durch Endproduktbedarfe) dient. Problematisch können dabei mehrdeutige Beziehungen für den Materialübergang im Prozess sein, die eine „Verzweigung“ in der Planungsrichtung (vorwärts oder rückwärts) darstellen. Soll die Produktion gemäß Bild 32 druckgesteuert abgebildet werden, stellt sich für die Sorte „Hell“ bei der Filtration die Frage, ob oder in welchem Verhältnis aus Unfiltrat „Hell“ Filtrat „Hell“ oder Filtrat „Hell Fass“ entstehen soll, während bei einer Rückwärtsterminierung der genaue Bedarf je Filtratsorte vorgegeben ist.

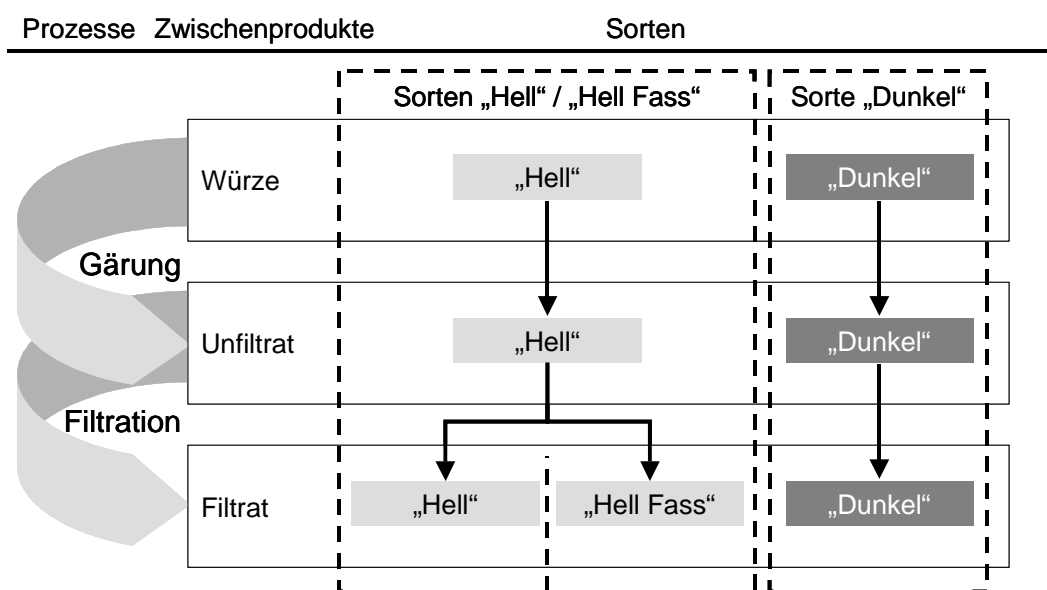


Bild 32: Materialübergänge für unterschiedliche Sorten

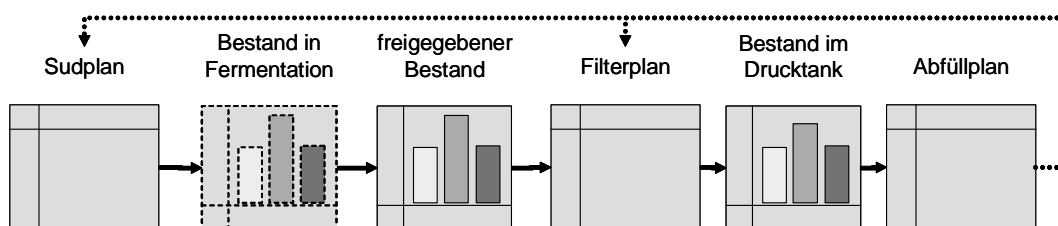


Bild 33: Mengenpläne und Bestände als materialorientiertes Modell für die Brauereiproduktion

Die Bestandsentwicklung von Zwischenprodukten kann „materialorientiert“ modelliert werden, wenn die Zu- und Abgänge von Material je Stufe direkt oder indirekt durch mehr oder weniger eigenständige Pläne bestimmt werden. Bild 33 skizziert ein einfaches Modell für die gesamte Brauereiproduktion (Bierherstellung und -abfüllung), in dem ein *Sudplan*, ein *Filterplan* und ein *Abfüllplan* formal unabhängig voneinander vorgegeben sind. Diese Angaben ermöglichen die Prognose der Bestandsentwicklung zwischen den Teilplänen, die allerdings soweit aufeinander

abgestimmt sein sollten, dass keine Mangelsituationen (Bedarfsunterdeckung) aber auch keine unrealistisch langen „Liegezeiten“ auftreten. Für die Materialentnahme aus einem Bestand sei dabei das aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht naheliegende FIFO-Prinzip („*First-in-First-out*“) unterstellt. Die Bestandsentwicklung und die Verweilzeit im Bestand ergeben sich damit deterministisch anhand der Zu- und Abgänge im Zeitverlauf, wie im Durchlaufdiagramm in Bild 34 gezeigt. Dieser Modellansatz kann z. B. verwendet werden, um die drei Teilpläne im Rahmen einer Grobplanung iterativ aufeinander abzustimmen. Bei der Bierherstellung dominiert – wie in Bild 33 durch die gestrichelten Pfeile angedeutet – meist der im Abfüllplan beschriebene Endproduktbedarf (abfüllfertiges Bier nach Sorten).

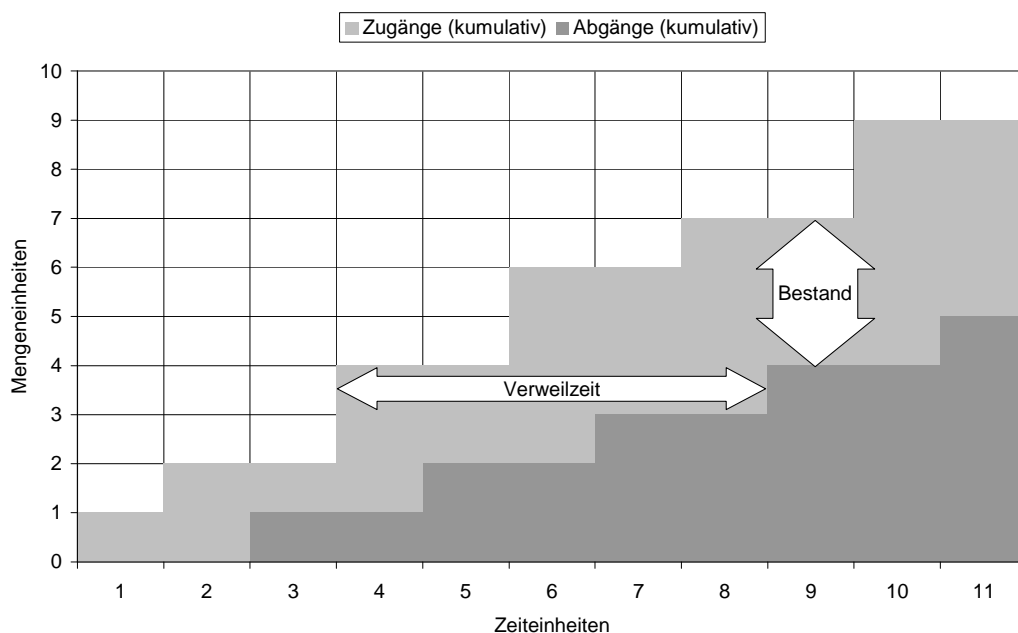


Bild 34: Bestandsentwicklung und Verweilzeit im Durchlaufdiagramm (FIFO-Zugriff)

Die materialorientierte Perspektive ist zwar grundsätzlich auch in ereignisorientierten Simulationsmodellen darstellbar. Da sie allerdings keine dynamischen Wechselwirkungen (Bestandsgrenzen, Auswahlverfahren beim Zugriff auf Bestände, usw.), sondern vor allem determinierte Bedarfe und Materialbuchungen berücksichtigt, eignet sie sich besonders für statische Modelle, die z. B. als Tabellenkalkulation oder Datenbankapplikation wesentlich einfacher zu realisieren sind. Solche Ansätze können in Kombination mit detaillierteren Simulationsmodellen als „Grobmodell“ dienen, um schlüssige Szenarien für die Simulation zu erzeugen oder die Konsistenz vorgegebener Eingangsdaten zu überprüfen.

### 5.1.2 Kapazitätsorientierte Perspektive

Da die materialorientierte Perspektive statische Beziehungen und starre Mechanismen verwendet, um Bestände fortzuschreiben bzw. Produktionsmengen und Bedarfe durch das Überlagern

von Teilplänen abzuleiten, werden Grenzwerte für Bestände oder die Rate der Bestandsänderung nicht beachtet, sodass sich rechnerisch negative Bestände oder unrealistisch hohe Bestände oder Produktionsleistungen ergeben können. Dieses „Planen gegen unbegrenzte Kapazität“ kann z. B. sinnvoll sein, um durch den Vergleich zwischen dem rechnerischen Kapazitätsbedarf und einem tatsächlichen Angebot Engpässe zu lokalisieren oder im Zuge der Grobplanung bei der Konzeption einer Anlage eine vorläufige Dimensionierung zu ermitteln. Eine Kapazitätsbetrachtung findet dabei erst im Anschluss an die eigentliche Planungsrechnung und ohne Rückkopplung zum Rechengang statt.

Die kapazitätsorientierte Perspektive stellt den Bestands- und Bedarfsmengen ein *begrenzt*es Kapazitätsangebot gegenüber, das die in den verschiedenen Bereichen verfügbaren Ressourcen in einfacher und verdichteter Form beschreibt. Die Kapazitätsgrenzen werden bereits während der Planungsrechnung bzw. Simulation überprüft und beeinflussen die dynamische Entwicklung des abgebildeten Szenarios. Bild 35 verdeutlicht in Erweiterung des materialorientierten Brauereimodells aus Bild 33, für welche Bereiche der Brauereiproduktion Produktionskapazitäten und Lagerkapazitäten zu betrachten sind.

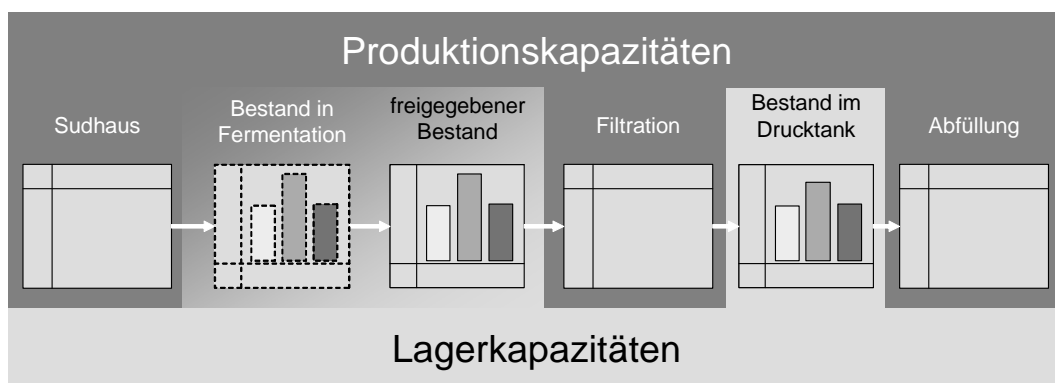


Bild 35: Produktionskapazitäten (dunkelgrau) und Lagerkapazitäten (hellgrau) bei der Brauereiproduktion

Bezüglich der Fermentation konkurrieren beide Sichtweisen, da hier dieselben Kapazitäten (Gär- und Lagertanks) sowohl produktiv als auch zur anschließenden Zwischenlagerung eingesetzt werden. Zweckmäßig ist häufig eine Interpretation des Bereichs „Fermentation“ als weitgehend unstrukturiertes FIFO-Zwischenlager mit sortenspezifischer Mindestlagerzeit bzw. Prozessdauer und begrenzter Lagerkapazität, das in Teilbereiche (z. B. funktionale Trennung zwischen Gär- und Lagerkeller und/oder sortenspezifische Unterscheidung zwischen Ober- und Untergärung) gegliedert sein kann. Die Simulation kann pauschale Grenzwerte für die Bestandsentwicklung je Bereich überwachen, sodass Tanks nicht individuell modelliert sein müssen. Im Unterschied zur *Lagerkapazität* lässt sich die *Produktionskapazität* eines Fermentationsbereichs kaum durch eine einfache Kenngröße beziffern, da die mit einer bestimmten Tanklagerkonfiguration erreichbare „Durchsatzleistung“ von zahlreichen technologischen und organisatorischen Parametern und der



konkreten Zusammensetzung und Zeitverteilung der Systemlast (Sudplan, Filterplan) abhängt (vgl. Abschnitt 2.2.3.4) und für dieselbe Anlage in weiten Grenzen variieren kann.

Aus kapazitätsorientierter Sicht sollen innerhalb eines Produktionsbereichs alle Einrichtungen zusammengefasst und als einheitliche Kapazität verwaltet werden, deren Kapazitätsangebot qualitativ kompatibel ist bzw. eine weitgehende wechselseitige Substitution zulässt. Sofern innerhalb einer Stufe Produktionslinien oder Lagerbereiche unterschieden werden, die überschneidungsfrei spezialisiert sind, ist die Zuordnung von Produktionsaufträgen eindeutig bestimmt und damit unproblematisch. Anderenfalls können deterministische oder stochastische Mechanismen für eine möglichst realitätsnahe Lastverteilung sorgen.

### 5.1.2.1 Lagerkapazitäten

Grenzwerte für den Bestand können in der Realität zu Mangelzuständen (Bestand erschöpft, keine Abgabe von Material möglich, Bedarfe bleiben unbefriedigt) und zu Blockierungszuständen (Lagerkapazität ausgeschöpft, keine Aufnahme von Material möglich, Rückstau) führen. Beide Effekte können sich in seriellen Prozessketten bzw. entsprechenden Anlagenstrukturen über mehrere Stufen fortpflanzen. Für fertigungstechnische Systeme, zu denen hier auch die Abfüll- und Verpackungsanlagen in Brauereien gezählt werden sollen, gehören Stillstände durch Stau- und Mangelzustände als Folge des Störverhaltens der verketteten Aggregate in gewissem Umfang zum Normalbetrieb. Bei der Bierherstellung wird die Speicherkapazität von Produktionseinrichtungen (Sudgefäße, Fermentationstanks, Drucktanks) aus unterschiedlichen Motiven, mit unterschiedlichen Strategien (vgl. 2.1.2.2) und in unterschiedlichem Umfang genutzt, wie Tabelle 6 zeigt.

Tabelle 6: Zwischenlagerung bei der Bierherstellung

Bereich	Behälter	Motivation	Strategie	Zeitraumen
Sudhaus	Sudgefäße	Wartezeit, Koordination	ZW / NIS	Minuten
Fermentation	Gär- und Lagertanks	Wartezeit, Disposition	NIS	Stunden, Tage, Wochen
Drucktanks	Drucktanks	Disposition	FIS	Stunden, Tage

Im Sudhaus ist eine Lagerung der chemisch-physikalisch labilen und mikrobiologisch sensiblen Zwischenprodukte aus technologischen Gründen grundsätzlich unerwünscht (ZW-Strategie), sodass abgesehen von der planmäßigen Pufferfunktion eines Vorlaufgefäßes lediglich kurze ablaufbedingte Wartezeiten im Bereich von Minuten auftreten dürfen, die durch die Speicherfunktion der einzelnen Apparate (NIS-Strategie) abgefangen werden. Da sich außerdem aufeinanderfolgende Chargen innerhalb einer Sudlinie in der Regel nicht überholen können und die Gefäßbelegung strikt exklusiv gehandhabt wird, ist es kaum sinnvoll, innerhalb des Sudhauses Materialbestände zu betrachten oder einer Sudlinie eine Lagerkapazität zuzuordnen.

Auch im Bereich der Fermentation können über die Prozessdauer (vgl. 2.1.2.4) hinaus ablaufbedingte Wartezeiten im Bereich von Stunden auftreten, z. B. wenn für das Umpumpen in einem Zweitankverfahren vorübergehend kein geeigneter Transferweg verfügbar ist. Wesentlich mehr Spielraum besteht dagegen für den gezielten Aufbau von Beständen an Unfiltrat im Lagerkeller, da hier das verhältnismäßig stabile Zwischenprodukt über die technologisch erforderliche Lagerdauer hinaus für mehrere Tage oder sogar Wochen aufbewahrt werden kann. Zur Zwischenlagerung verbleibt die Tankcharge dabei jeweils in dem Tank, der bereits für den Prozess genutzt wurde (NIS-Strategie). Die Speicherfunktion der Lagertanks entkoppelt die Produktionsplanung für Würzproduktion und Fermentation von der kurzfristiger ausgerichteten Disposition in den Bereichen Filtration und Abfüllung.

Die Drucktanks dienen hauptsächlich als Puffer zwischen Filtration und Abfüllung und ermöglichen einen asynchronen Betrieb mit einer individuellen Disposition in diesen Bereichen. Über einen gewissen Bestand an abfüllfertigem Bier in Drucktanks können außerdem kurzfristige Absatzschwankungen abgefangen werden.

### 5.1.2.2 Produktionskapazitäten

Tabelle 7: Produktionskapazitäten in der Brauerei

Bereich	Diskreter Prozess	diskrete Menge	Leistungsangabe
Sudhaus	Sud erzeugen	definiert, je Sorte	Anzahl von Suden pro Zeit
Filtration	Unfiltratmenge filtrieren	flexibel, je Auftrag	mittlere Durchflussleistung je Sorte (Filtratmenge pro Zeit)
Abfüllung	Behälter füllen	je Behälter oder Artikel definiert	mittlere Taktrate (Behälter pro Zeit)
	Produktmenge abfüllen	flexibel, je Auftrag	mittlere Durchflussleistung je Artikel (Füllmenge pro Zeit)

Das Kapazitätsangebot einer Produktionseinrichtung in einem Planungsintervall wird im Kontext der Produktionsplanung primär durch die Angabe der verplanbaren Betriebsdauer beschrieben [48]. Daneben werden Angaben zur Produktions- bzw. Durchsatzleistung verwendet, um vorgegebenen Produktionsmengen einen Kapazitätsbedarf bzw. -verbrauch zuzuordnen. Bei Mehrproduktbetrieb ist eine mittlere Durchsatzleistung ggf. je Sorte oder Artikel anzugeben. Solche Leistungsgrenzen können auch in materialorientierten Modellen *implizit* berücksichtigt sein, wenn Produktionspläne mit konkreten Mengen- und Zeitangaben vorgegeben werden. In einem kapazitätsorientierten Modell werden dagegen *explizite* Leistungsdaten verwendet, sodass der Zeitbedarf aus der Produktionsmenge abgeleitet werden kann.

Wie Tabelle 7 zeigt, werden für die Leistungsbeschreibung aufgrund der charakteristischen Betriebsweise in den Produktionsbereichen unterschiedliche Perspektiven genutzt:

- Die *Würzproduktion* wird vereinfacht als diskreter, wiederholt ausgeführter, einstufiger Produktionsprozess betrachtet, bei dem je Zyklus ein Sud erzeugt wird, dessen Menge rezeptabhängig und damit je Sorte fest definiert ist. Für die Leistungsbeschreibung steht daher die Sudfolge (Anzahl von Suden pro Zeit) im Vordergrund, die durch eine einheitliche Zykluszeit oder abhängig von der Abfolge der Sorten definiert ist (vgl. Abschnitt 2.2.2.4).
- Der reale *Filtrationsprozess* verläuft kontinuierlich und mit variabler Durchsatzleistung. Eine vereinfachte Perspektive betrachtet einen Filtrationsauftrag als diskreten Prozess, dessen Dauer von der Auftragsmenge und der verfügbaren Filterleistung abhängt. Diese kann global oder im Mehrproduktbetrieb sortenspezifisch definiert sein. Sofern in der Praxis eine gewisse dynamische Entwicklung der Filterleistung im Verlauf einer Standzeit vorliegt, ist diese für eine kapazitätsorientierte Betrachtung in konstante Durchschnittswerte zu verrechnen.
- Die *Abfüllung* spielt aus Sicht der hier vorrangig betrachteten Bierherstellung vor allem als „Abnahme von Produkt“ aus dem Drucktank eine Rolle. Das Abfüllen von Behältern kann zwar prinzipiell als einstufiger diskreter Vorgang betrachtet werden. Allerdings rechtfertigt die zumindest für kleinere Behälter wie Flaschen und Dosen meist sehr hohe Wiederholrate (>10 Hz sind üblich) auch eine quasi-kontinuierliche Sichtweise. Analog zur Filtration kann daher die Verarbeitung von Abfüllaufträgen als einstufiger diskreter Prozess modelliert werden, dessen Dauer anhand einer je Artikel oder Behältertyp zu definierenden mittleren Durchsatzleistung bestimmt wird.

### 5.1.3 Ressourcenorientierte Perspektive

Während das vereinfachte Abbilden von Kapazitäten besonders für die grobe Anlagen- und Produktionsplanung qualitativ ausreichend und vor allem sehr effizient sein kann, sind für detailliertere Untersuchungen die Anlagen- und Prozessstruktur feiner aufzulösen. Im Gegensatz zur kapazitätsorientierten Perspektive, die eine möglichst weitgehende Abstraktion der technischen Struktur vorsieht, treten bei der ressourcenorientierten Sichtweise die zur Produktion eingesetzten Entitäten – die *Ressourcen* – stärker in den Vordergrund. In einem ressourcenorientierten Modell werden *mehr* und vor allem *konkretere* Informationen mit direktem Realitätsbezug berücksichtigt, was einerseits den Aufwand für das Erstellen des Modells erhöht, aber andererseits den Interpretationsbedarf reduziert und die unmittelbare Aussagekraft der Ergebnisse steigert. Ein Modell, das mehr explizite Strukturen und Parameter enthält, ist außerdem flexibler und präziser an spezifische und eventuell veränderliche Rahmenbedingungen und Anforderungen anpassbar. Einflussgrößen, die beim Erstellen eines kapazitätsorientierten Modells in pauschalen Kennzahlen abgeschätzt oder in mathematischen Submodellen „verrechnet“ werden müssen, wirken sich bei einem dynamischen ressourcenorientierten Modell zur Laufzeit direkt auf den dynamischen Ablauf von Kausalketten aus. Dadurch wird z. B. gewährleistet, dass je nach Systemzustand bzw. Systemlast unterschiedliche Faktoren den simulierten Produktions-

prozess limitieren, ohne dass deren individuelle Relevanz oder spezifische Wechselwirkung vorab bekannt sein bzw. analysiert und modelliert werden muss.

Sollen die einzelnen Ressourcen einer Sudlinie oder eines vernetzten Sudwerks in einem Modell explizit abgebildet werden, muss auch das Prozessmodell mindestens so detailliert angelegt sein, dass die Durchlaufzeit und die Belegungszeit (vgl. Abschnitt 2.1.2.2) annähernd korrekt wiedergegeben werden. Sofern der Zeitaufwand für den Materialtransfer zwischen den Geräten und Gefäßen nicht vernachlässigt werden kann, muss außerdem während der Transferzeiten die synchrone Belegung von Quelle und Ziel sowie gegebenenfalls des verbindenden Leitungswegs modelliert werden.

In Zusammenhang mit der Kapazitätsbetrachtung für Tanklager kann der Verzicht auf das Modellieren einzelner Tanks mit erheblichen Ungenauigkeiten verbunden sein, da der Zugriff auf die Kapazität des gesamten Tanklagers in der Praxis nie stufenlos skalierbar ist. Vielmehr kann z. B. durch das nur teilweise Befüllen oder Leeren von Tanks, das vor allem im wesentlich zur Disposition genutzten Drucktankbereich die Regel ist, ein erheblicher Anteil der rechnerisch verfügbaren Kapazität unzugänglich werden, was in einem kapazitätsorientierten Modell allenfalls pauschal berücksichtigt werden kann. Dagegen liefert ein ressourcenorientiertes Modell, das einzelne Tanks als individuelle Objekte enthält, quantitative Informationen über den ungenutzten Kopfraum und damit ggf. auch Anhaltspunkte für technische oder organisatorische Optimierungspotenziale zur effizienteren Auslastung der Tankkapazität. Außerdem ermöglicht das Abbilden einzelner Tanks bei Bedarf auch den expliziten Umgang mit Transferprozessen, deren Dauer und Ressourcenbedarf (verfügbare Leitungswege) von der jeweiligen Quelle-Ziel-Kombination abhängen kann. Auch die Zeit zwischen dem Entleeren eines Tanks und dem Abschluss der Reinigung hängt in der Regel von der Verfügbarkeit gemeinsam genutzter Ressourcen ab, die nur anhand der Ereignisdynamik in einem detaillierten Modell überwacht werden kann.

Da der Prozess der Filtration zumindest während der Standzeit eines Filters in der Regel unterbrechungsfrei abläuft, spielt für diesen Bereich aus ressourcenorientierter Sicht vor allem das technische und organisatorische Umfeld der Filterlinie eine Rolle. Der Betrieb einer Filterlinie hängt in vielen Details von den Zuständen und Abläufen in den angrenzenden Tanklagern (Lagerkeller als Unfiltrat-Quelle, Drucktanks als Filtrat-Senke) ab. So kann sich die innerhalb einer Filter-Charge filtrierte Menge nach der Restmenge im Lagertank oder der verbleibenden Aufnahmekapazität im Drucktank richten. Außerdem sind bei der Definition und Disposition von Filtrationsaufträgen der möglicherweise begrenzte Zugriff auf geeignete Leitungswege sowie der Schichtplan bzw. die Personalverfügbarkeit als potenzielle Restriktionen zu berücksichtigen. Viele der genannten Aspekte stellen weiche Restriktionen für die Feinplanung dar, zwischen denen in der Praxis oft situationsabhängig und kurzfristig abzuwägen ist. Das Hauptproblem beim Modellieren des Filtrationsbetriebs besteht daher weniger in der korrekten Wie-

dergabe der durch harte Restriktionen begrenzten technischen Möglichkeiten, sondern vielmehr in der Definition von Strategien und Regeln, durch die das praxisübliche Entscheidungsverhalten angemessen nachgebildet wird.

#### 5.1.4 Prozessorientierte Perspektive

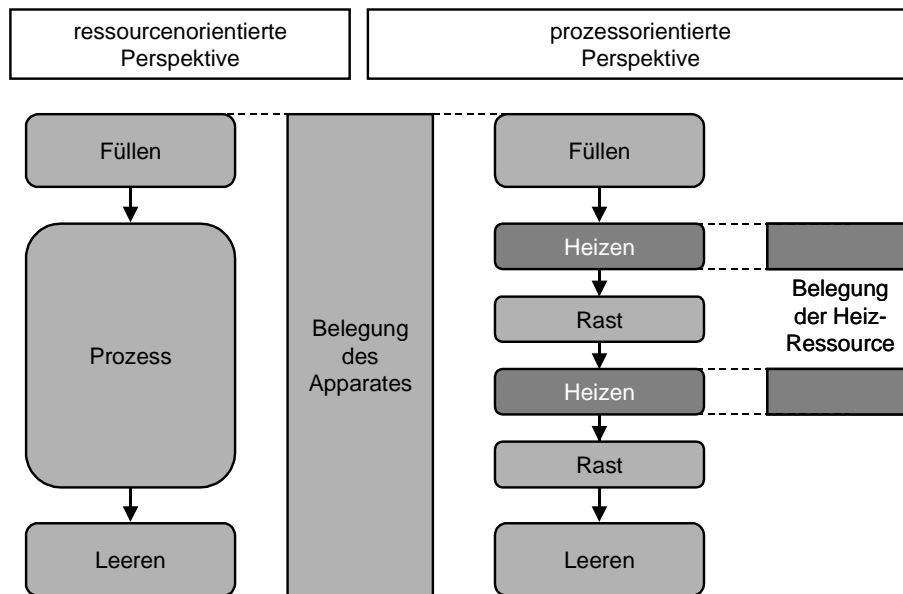


Bild 36: Ressourcen- und prozessorientierte Sicht auf die Belegung eines Maischgefäßes

Als „prozessorientierte Perspektive“ soll hier eine Sicht bezeichnet werden, die die Feinstruktur der Prozessabläufe höher auflöst, als es erforderlich ist, um die Belegung der primären Ressourcen im Modell korrekt wiederzugeben. Aufeinanderfolgende Prozessschritte werden also unabhängig von ihrem Einfluss auf den Belegungsstatus der Hauptressource individualisiert. Dies kann z. B. erforderlich sein, wenn zu bestimmten Zeitpunkten innerhalb eines Prozesses eine Synchronisation bzw. Koordination mit anderen Prozessen stattfinden muss oder der Prozessfortschritt für übergreifende Entscheidungen auf einer höheren hierarchischen Ebene (z. B. Verteilstrategie, Ressourcen-Allokation) relevant ist.

Unabhängig von der technischen Notwendigkeit verbessert eine feiner aufgelöste Prozessstruktur die Anschaulichkeit des Modells sowohl *online* (Animation) als auch *offline* (Schrittprotokolle, Gantt-Diagramme) und erweitert damit die Einsatzmöglichkeiten zur Präsentation und Dokumentation. Sofern unabhängig vom Simulationsmodell bereits eine – z. B. technologisch oder steuerungstechnisch geprägte – formale Beschreibung der Prozessabläufe – existiert, kann es sinnvoll sein, deren typischerweise höher aufgelöste Struktur im Modell nachzubilden, um eine direkte wechselseitige Kompatibilität zu erreichen. Ein detaillierteres Prozessmodell ist außerdem leichter anpassbar, z. B. wenn nachträglich Hilfsressourcen ins Modell zu integrieren sind, die nur für bestimmte Prozessabschnitte benötigt werden.

Bild 36 stellt die ressourcenorientierte und die prozessorientierte Sicht am Beispiel der Belegung eines Maischgefäßes gegenüber. Während im linken Ansatz nur die Belegung der Hauptressource (Maischgefäß) modelliert wird, können rechts einzelne Prozessschritte als „Heizschritte“ mit entsprechendem Ressourcenbedarf deklariert werden. Änderungen am Verfahren (z. B. die technologisch begründete Verlängerung einer Rastzeit) können im prozessorientierten Modell direkt auf den entsprechenden Prozessschritt angewendet werden, während für das abstraktere ressourcenorientierte Modell zunächst die Auswirkungen für den globalen Schritt „Prozess“ zu bestimmen sind.

Eine feinere Gliederung der Prozessstruktur erleichtert außerdem die dynamische Interpretation von technischen und technologischen Parametern zur Laufzeit. So kann der Zeitaufwand für bestimmte Ablaufschritte von der Menge der gerade verarbeiteten Charge abhängen (Umpumpen mit definierter Transferrate), während für andere z. B. die darzustellende Temperaturerhöhung maßgebend ist (Aufheizen mit definierter Heizrate). Solche Einflüsse können zwar auch durch einen rechnerischen „Gesamtansatz“ für einen einheitlichen Schritt „Prozess“ (vgl. Bild 36, links) abgedeckt werden. Dieser stößt aber spätestens dann an Grenzen, wenn neben berechenbaren Schrittdauern auch dynamisch oder stochastisch bestimmte Wartezeiten relevant sind. Konkurrieren beispielsweise mehrere Verbraucher um dieselbe exklusiv zu belegende Heizressource, kann deren eingeschränkte Verfügbarkeit den Durchlauf einzelner Chargen verzögern, was nur im prozessorientierten Modell korrekt wiedergegeben werden kann. Auch die indirekten Konsequenzen einer Wartezeit (z. B. Abkühlen und dadurch längere Heizzeit bis zum nächsten Sollwert, Verzögerung nachfolgender Chargen) können – zumindest soweit die entsprechenden Zusammenhänge bekannt sind – in einem prozessorientierten Modell mit verhältnismäßig geringem Aufwand abgebildet werden. Dasselbe gilt für den Einsatz einfacher mathematischer Submodelle, z. B. stochastischer Verteilungsfunktionen, die in Verbindung mit generierten Zufallszahlen genutzt werden können, um ein zufälliges Streuen der Prozessdauer zu modellieren. Soweit ein charakteristisches Streuverhalten nur für bestimmte Schritte innerhalb eines Prozessabschnitts besteht bzw. unterstellt wird, können empirische Ergebnisse oder Annahmen in einem prozessorientierten Modell „an Ort und Stelle“ implementiert werden, während eine ressourcenorientierte Sicht auf den gesamten Prozessabschnitt keine vergleichbaren Angriffspunkte bietet.

Trotz der genannten Vorzüge einer detaillierteren prozessorientierten Perspektive sind bei der Wahl eines angemessenen Detaillierungsgrades für das Prozessmodell sämtliche in Bild 29 gegenübergestellten Effekte zu berücksichtigen. Zwischen der ressourcenorientierten und der prozessorientierten Sicht besteht dabei keine strukturelle Barriere, sodass ein Übergang in beiden Richtungen fast stufenlos und einfach zu realisieren ist. Auch Mischformen sind denkbar, z. B. der Einsatz eines „prozessorientierten Datenmodells“, das detaillierte Informationen aus bestehenden Datenquellen modellspezifisch aufbereitet und verknüpft, um sie in verdichteter Form für ein ressourcenorientiertes Simulationsmodell bereitzustellen.

Der Stellenwert fein aufgelöster Prozessstrukturen hängt neben dem Einsatzzweck des Modells auch von der Bedeutung bzw. Ausprägung der Rezeptsteuerung im abzubildenden Prozessbereich ab:

- Innerhalb der Bierherstellung weist die *Würzproduktion* die komplexesten Abläufe und damit die höchste Ereignisdichte auf, sodass die prozessorientierte Perspektive bei entsprechend hohem Detailanspruch naheliegt.
- Während der *Fermentation* finden dagegen vergleichsweise wenige externe Manipulationen statt, die als eigenständige Prozessschritte im Sinn einer Ablaufsimulation abzubilden wären. Sofern nicht der Kältebedarf, die Kohlendioxidentwicklung, das „Hefemanagement“ oder detaillierte Abläufe von Transfers und Reinigungsprozessen modelliert werden sollen, kann sich ein ereignisorientiertes Modell häufig auf die Tankbelegung und damit eine ressourcenorientierte Perspektive beschränken. Allerdings kann es sinnvoll sein, gewisse Prozessstadien zu differenzieren, um den Prozessfortschritt für Animations- oder Koordinationsfunktionen abzustufen.
- Im Bereich der *Filtration* sind Schrittfolgen vorwiegend relevant, um diskrete Abläufe beim Rüsten und Reinigen sowie ggf. bei Produktwechseln zu beschreiben, während die eigentliche Filtration als einstufiger bzw. kontinuierlicher „Durchlaufprozess“ zumindest im Modell keinen prozeduralen Überbau benötigt. Der Betrieb einer Filterlinie wird allerdings teilweise von diskreten Ereignissen bestimmt (z. B. Quelltank wird leer, Zieltank wird voll, Standzeit des Filters geht zu Ende usw.). Sofern in einem Modell entsprechende Reaktionsmechanismen den Verlauf der Filtration dynamisch beeinflussen können, soll von einer prozessorientierten Sicht auf die Filtration die Rede sein.

### 5.1.5 Technologische Perspektive

Die Teilprozesse der Produktion in Einzelschritte aufzulösen ist nicht die letzte denkbare Stufe der Verfeinerung für ein Prozessmodell. Allerdings eignet sich die ereignisorientierte Simulation aufgrund ihrer diskreten Logik nur bedingt, um die innerhalb des Brauprozesses segmentierten Prozessschritte noch detaillierter abzubilden. Zwar werden im verfahrenstechnischen Umfeld auch biochemische, chemisch-physikalische oder strömungstechnische Zusammenhänge mit mathematisch-numerischen oder hybriden Modellen simuliert. Allerdings setzt dies ein umfangreiches Detailwissen über die zugrunde liegenden Reaktionsmechanismen und Gesetzmäßigkeiten im Allgemeinen und die besonderen Rahmenbedingungen der entsprechenden Abläufe (Stoffparameter, Zustandsgrößen, zulässige Vereinfachungen, usw.) im speziellen Einzelfall voraus. Während die genannten Methoden im Bereich der Regelungstechnik und zur detaillierten Auslegung und konstruktiven Optimierung von prozesstechnischen Einrichtungen generell durchaus etabliert sind, stehen geeignete Informationen im Kontext der Bierherstellung und vor allem für die Aufgaben der Anlagen- und Produktionsplanung, die sich überwiegend auf einen mittel- bis

langfristigen Horizont beziehen, kaum zur Verfügung. Von formal hoch-detaillierten Modellen, die mangels qualifiziertem „Input“ auf der Basis stark vereinfachender Annahmen und pauschaler Kennzahlen betrieben werden müssen, ist trotz erhöhtem Aufwand für das Erstellen, Parametrieren und Validieren des Modells sowie das Spezifizieren, Durchführen und Auswerten von Experimenten wenig praktischer „Mehrwert“ gegenüber prozessorientierten Ansätzen zu erwarten. Daher wurde die „technologische Perspektive“ in der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt.

## **5.2 Simulation der Würzproduktion**

Die Würzproduktion stellt den Startpunkt für den Brauprozess und damit aus produktionslogistischer Sicht die treibende Kraft in einer überwiegend druckgesteuerten Ablaufkette dar, die bis zur Freigabe im Lagertank reicht (vgl. Bild 17, S. 46). Mangels Speicherkapazität im Sudhaus und wegen der chemisch-physikalischen und mikrobiologischen Instabilität der Würze als Zwischenprodukt müssen im Gärkeller aufnahmebereite Zeltanks bereitstehen, wenn Würze produziert wird. Ein drohender Engpass von dieser Seite muss in der Praxis frühzeitig erkannt und – ggf. durch das Anpassen des Sudplans – unbedingt verhindert werden. In der Simulation qualifiziert das Auftreten einer „Warteschlange“ zwischen Würzproduktion und Fermentation das simulierte Szenario als derart realitätsfern, dass es sich in der Regel erübrigt, den betreffenden Simulationslauf fortzusetzen. Eine Toleranz für Wartezeiten im Bereich von Minuten kann allerdings sinnvoll sein, wenn dies als praxisgerecht betrachtet bzw. unterstellt wird, dass ein vergleichbares Realszenario durch „stille“ Kapazitätsreserven oder im Modell nicht verfügbare Dispositionsspielräume bewältigt werden könnte. Diese Argumentation gilt analog für interne Störungen im Prozess der Würzproduktion, durch die z. B. beim Totalausfall von Aggregaten oder Leitungswegen in Zusammenhang mit der überlappenden Belegung der Sudlinien und dem Zugriff auf gemeinsam genutzte Ressourcen in vernetzten Topologien Extremzustände bis hin zum Stillstand durch „Verklemmen“ denkbar sind. Sofern die Simulation nicht dem Zweck dient, solche extremen und prinzipiell unerwünschten Szenarien bzw. Möglichkeiten zu deren Bewältigung zu untersuchen oder etwa das Bedienpersonal entsprechend zu trainieren, sind aufwendige Funktionalitäten für ein automatisches oder interaktives Krisenmanagement im Modell – ganz anders als im Bereich der Automation – häufig überflüssig. Der reguläre Sudhausbetrieb mit dem Ziel, zu relativ genau vorhersehbaren Zeiten definierte Mengen an Kaltwürze bereitzustellen, kann daher oft auch in stark reduzierter Form praxisnah und damit sinnvoll abgebildet werden.

### **5.2.1 Kapazitätsorientierte Perspektive**

Für den Bereich der Würzproduktion ist in kapazitätsorientierten Modellen zu unterscheiden, ob im jeweiligen Modell tatsächlich die Auslastung der Kapazitäten für die Würzproduktion oder



lediglich deren produktiver Output als Systemlast für Kapazitäten in nachfolgenden Bereichen im Vordergrund stehen soll. Im ersten Fall muss das Modell den Produktionsprozess der Würzeherstellung – z. B. ab dem Einmaischen – mindestens stark vereinfacht widerspiegeln, während es anderenfalls ausreicht, zu bestimmten Zeitpunkten Chargen-Objekte zu erzeugen und als „Kaltwürze“ an die Fermentation zu liefern. Dieser verkürzte Ansatz wird durch die bereits in Abschnitt 4.4.3 angesprochenen Standardfunktionen des Bausteintyps „Quelle“ abgedeckt und soll hier nicht detaillierter erörtert werden.

Der einfachste wirklich kapazitätsorientierte Modellansatz für die Würzeherstellung bildet den gesamten Ablauf im Sudhaus als einstufigen Prozess ab, dessen Dauer mit einer gewissen stochastischen Bandbreite behaftet und im Mehrproduktbetrieb von der herzustellenden Sorte abhängig sein kann. Da in der Realität aufgrund der mehrstufigen Struktur einer Sudlinie aufeinanderfolgende Chargen überlappend gestartet werden können, muss dies auch in einem einstufigen Prozessmodell möglich sein. Ein entsprechendes Verhalten kann in eMPlant mithilfe der Baustein-Klasse „Parallelstation“ realisiert werden. Eine Parallelstation kann mehrere bewegliche Elemente, hier also Chargen-Objekte, aufnehmen und versucht nach einer gewissen Bearbeitungszeit diese an einen Nachfolger weiterzugeben. Der angestrebte Abgabezeitpunkt wird dabei sofort beim Zugang eines Chargen-Objektes terminiert, also berechnet oder „gewürfelt“, sodass die „Bearbeitungszeit“ für jede Charge individuell und ohne Auswirkung auf bereits laufende Prozesse bestimmt werden kann. Die begrenzte Aufnahmekapazität der Parallelstation entspricht der Tatsache, dass sich auch in einer Sudlinie nicht beliebig viele Chargen überlappen können. Bei exklusivem Zugriff auf spezialisierte Einheiten in vier Prozessstufen „Maischen“, „Läutern/Vorlaufgefäß“, „Kochen“, „Whirlpool/Kühler“ können sich maximal vier Chargen innerhalb derselben Sudlinie überlappen. Allerdings ist zu beachten, dass dieser einfache Modellansatz den kausalen Zusammenhang zwischen den aufeinanderfolgenden Chargen bzw. Prozessen nicht direkt abbildet, der in der Realität die Kapazität der Sudlinie beschränkt. Wenn in einer realen Sudlinie gerade noch keine zusätzliche Charge gestartet werden kann, liegt dies meist daran, dass der Prozessablauf der zuletzt gestarteten Charge noch nicht weit genug fortgeschritten ist. Dieses Problem wird *nicht* dadurch gelöst, dass die „älteste“ im System befindliche Charge dieses verlässt, wie es in der Simulation bei einer voll belegten Parallelstation der Fall ist. Bei Mehrproduktbetrieb mit unterschiedlicher Prozessdauer und/oder dem Einsatz von zufallsabhängigen Prozessdauern ist außerdem zu beachten, dass aufeinanderfolgende Zugänge nicht voneinander gestaffelt werden und sich auf der Parallelstation daher auch „überholen“ können, was zumindest innerhalb einer einzelnen realen Sudlinie unmöglich wäre.

Eine reguläre zyklische Arbeitsweise einer Sudlinie kann mit den beschriebenen einfachen Mitteln allerdings dargestellt werden, wie das Beispiel in Bild 37 zeigt. Zur Demonstration wurden eine konstante Zykluszeit von 144 min (für 10 Sude pro Tag) und eine mäßig streuende Prozessdauer mit Werten zwischen 470 und 510 min angenommen. Das Diagramm zeigt die Anzahl der

Chargen in der Linie für ein Zeitfenster von 60 h, das auch die Anfahrphase am Beginn der Sudwoche umfasst.

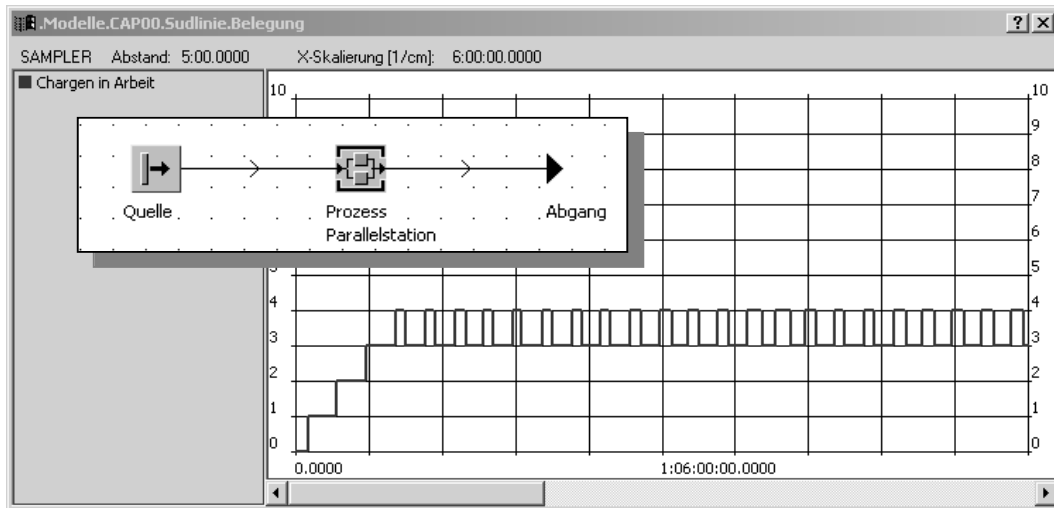


Bild 37: Einfaches Modell einer Sudlinie mit konstanter Zykluszeit und stochastischer Bearbeitungszeit

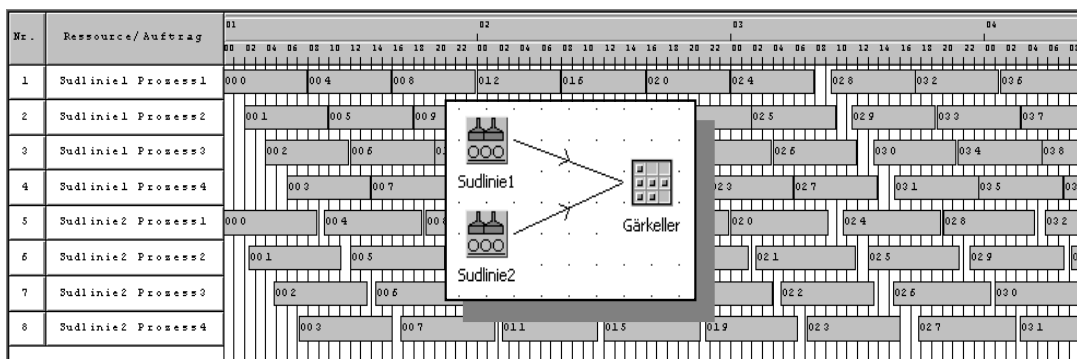


Bild 38: Gantt-Chart für die Belegung von zwei Sudlinien mit unterschiedlichen Parametern

Tabelle 8: Parameter der Sudlinien im Beispiel-Modell (Bild 38)

Parameter	Sudlinie 1	Sudlinie 2
<b>Zykluszeit</b>	120 min	144 min
<b>Nennleistung</b>	12 Sude pro Tag	10 Sude pro Tag
<b>Prozessdauer</b>	465 – 480 min	510 – 570 min
<b>Zyklen bis Reinigung</b>	28	24
<b>Verzögerung für Reinigung</b>	90 min	60 min

Bild 38 zeigt die Belegung von zwei unabhängigen Sudlinien, die mit unterschiedlichen Parametern (Zykluszeit, Prozessdauer, Zwischenreinigung) betrieben werden. Die Sudlinien wurden auf Grundlage des oben beschriebenen Modellaufbaus (Quelle und Parallelstation) abgebildet

und geben die erzeugten Chargen-Objekte an den Lagerbaustein „Gärkeller“ ab. Da auch in diesem kapazitätsorientierten Modell keine detaillierten Informationen zur Belegung konkreter Ressourcen oder Prozessstufen innerhalb der Sudlinie vorliegen, beziehen sich die Zeilen des Gantt-Charts auf die Bearbeitungsplätze der verwendeten Parallelstationen, denen die je Linie fortlaufend nummerierten Chargen (graue Balken) reihum zugewiesen werden. Im vorliegenden Beispiel ist nach einer bestimmten Anzahl von Zyklen je Linie eine Zwischenreinigung vorgesehen, sodass die gleichmäßige Sudfolge unterbrochen bzw. die Zykluszeit punktuell gestreckt werden muss. Im Beispiel wurden die Parameter gemäß Tabelle 8 so gewählt, dass die Reinigung jeweils auf den dritten Tag der Sudwoche fällt.

Das Gantt-Chart zeigt am dritten Tag Lücken im Belegungsplan, die zwar durch die Zwischenreinigung bedingt sind, allerdings keine direkten Rückschlüsse auf deren Ablauf erlauben. So wird das Zeitfenster für die Reinigung einer beliebigen Ressource in Sudlinie 1 von deren Belegung durch die Chargen „027“ und „028“ begrenzt, während die Gantt-Darstellung zu dem Fehlschluss veranlassen könnte, ausschlaggebend sei der Abstand zwischen den Chargen „024“ und „028“, „025“ bzw. „029“, usw.

## 5.2.2 Ressourcenorientierte Perspektive

### 5.2.2.1 Einfacher ressourcenorientierter Ansatz

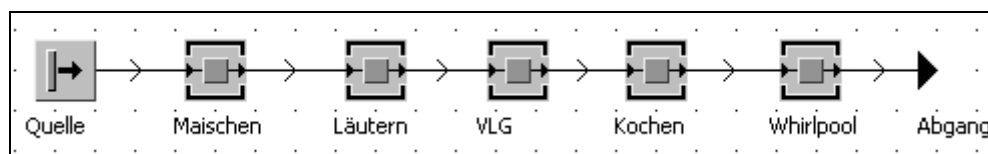


Bild 39: Einfaches ressourcenorientiertes Modell für die Würzproduktion

In einem einfachen ressourcenorientierten Modell wird die Würzproduktion durch eine Sequenz von Bearbeitungsstationen abgebildet. Jede dieser Stationen steht für eine Prozessstufe bzw. die für den betreffenden Prozessabschnitt verwendete spezialisierte Ressource, die zu jeder Zeit nur mit einer einzigen Charge („exklusiv“) belegt werden kann. Bild 39 zeigt eine entsprechende Anordnung für ein Infusionsverfahren mit einem konventionellen Sudwerk, wobei auf die peripheren Schritte „Schroten“ und „Kühlen“ (vgl. Tabelle 2) verzichtet wurde. Die „Quelle“ erzeugt wie bei der kapazitätsorientierten Perspektive Chargen-Objekte, die dann die mehrstufige Prozesskette bis zum „Abgang“ durchlaufen. In einer Sudlinie können sich dabei so viele Chargen „überlappen“, wie Prozessstufen vorhanden sind. Im Unterschied zum kapazitätsorientierten Modell wird diesbezüglich auch die Kausalität korrekt wiedergegeben.

Das Standardverhalten der hier verwendeten Baustein-Klasse „Einzelstation“ sieht vor, dass ein aufgenommenes bewegliches Element nach einer bestimmten Bearbeitungszeit weitergegeben wird, worauf der Baustein sofort erneut belegt werden kann. Für das Modell der Würzproduk-

tion würde dies bedeuten, dass der Übergang zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stufen ohne jeglichen Zeitaufwand erfolgt und jede Stufe nur bis zum Zeitpunkt der Übergabe an den Nachfolger belegt bleibt. Der tatsächliche Ablauf weicht bei Chargenprozessen, wie bereits in Bild 4 gezeigt, von dieser Logik deutlich ab, da sowohl Transferschritte als auch Reinigungsabläufe mit erheblichem Zeitaufwand relevant sein können, durch die eine Ressource über den eigentlichen Prozessablauf hinaus bleibt. eMPlant sieht zwar für die *Einzelstation* einen Parameter „Erholzeit“ vor, durch den der Zugang zum Baustein nach dem Eintritt eines beweglichen Elements für eine bestimmte Zeit unterbunden werden kann. Dieser Mechanismus kann aber nur genutzt werden, wenn die tatsächliche Verweilzeit für das eingetroffene Element deterministisch bestimmt und bereits zu diesem Zeitpunkt bekannt ist. Dynamische und stochastische Einflüsse, die während der Bearbeitungszeit auftreten, werden nur korrekt wiedergegeben, wenn die Freigabe des Zugangs der Einzelstation vom erfolgreichen Umlagern des bearbeiteten Objekts auf den Nachfolger abhängt.

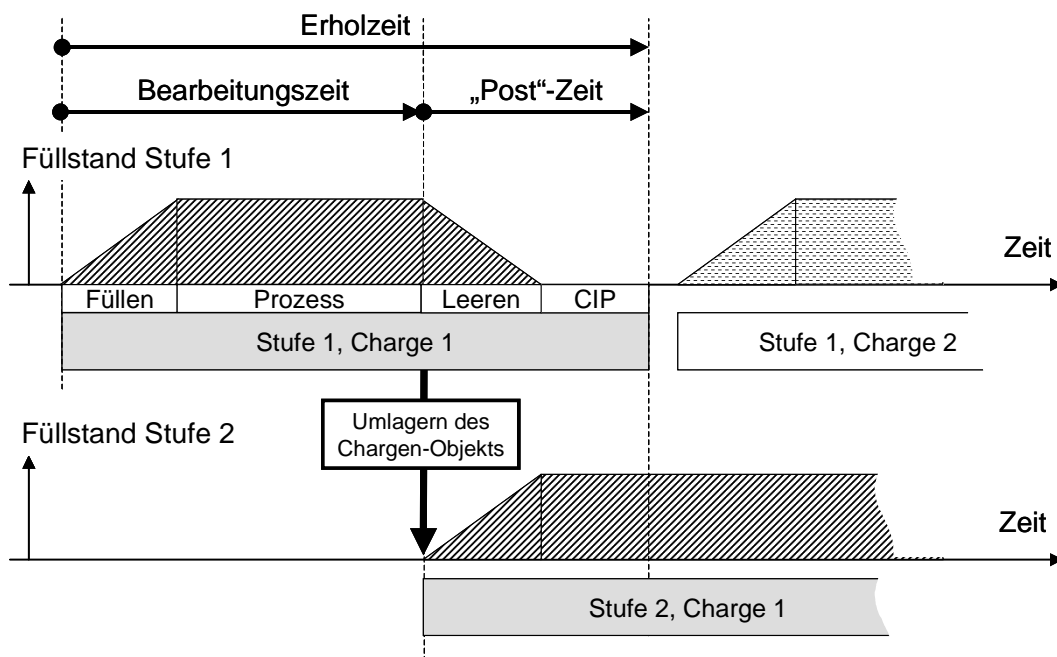


Bild 40: Vereinfachter Modellansatz für den Transfer zwischen Prozessstufen

Bild 40 zeigt schematisch, wie ein geeigneter Mechanismus im Unterschied zur ebenfalls dargestellten Logik der „Erholzeit“ arbeitet. Nach der „Bearbeitungszeit“, die hier das Füllen und den Prozessschritt zusammenfasst, wird das Chargen-Objekt an die folgende Prozessstufe weitergegeben, wo daraufhin ebenfalls die Bearbeitungszeit startet. Die erste Stufe bleibt ab diesem Zeitpunkt für ein hier als „Post“-Zeit bezeichnetes Intervall gesperrt, das die Schritte „Leeren“ und „CIP“ (Reinigung) vereint. Die für die „Charge 1“ grau schattierten Balken unterhalb der Zeitachse zeigen jeweils die Perspektive des Gantt-Charts, das lediglich die Gesamtbelegungszeit der Ressource wiedergibt.

Im Modell wird vorausgesetzt, dass ein erfolgreich gestarteter Transferprozess auch planmäßig verläuft, also durch Startzeit und Dauer vollständig determiniert ist. Anderenfalls muss eine wesentlich komplexere Transfer-Logik eingesetzt werden, die eine Synchronisation der betroffenen Einheiten während des Transfers sicherstellt. Entsprechende Funktionen werden für die prozessorientierte Perspektive unter 5.2.3 beschrieben.

Tabelle 9: Prozess-Parameter im ressourcenorientierten Beispiel-Modell (Bild 41)

Parameter → <i>Linie</i> Prozessstufe	Belegungszeit		... davon „Post“-Zeit		Zwischenreinigung	
	<i>Sudlinie 1</i>	<i>Sudlinie 2</i>	<i>Sudlinie 1</i>	<i>Sudlinie 2</i>	<i>Sudlinie 1</i>	<i>Sudlinie 2</i>
<b>Maischen</b>	110 min	130 min	15 min	15 min	70 min	60 min
<b>Läutern</b>	115 min	135 min	100 min	120 min	70 min	60 min
<b>VLG*</b>	100 min	120 min	30 min	20 min	-.-	-.-
<b>Kochen</b>	115 min	135 min	15 min	30 min	70 min	45 min
<b>Whirlpool</b>	100 min	105 min	50 min	60 min	30 min	-.-

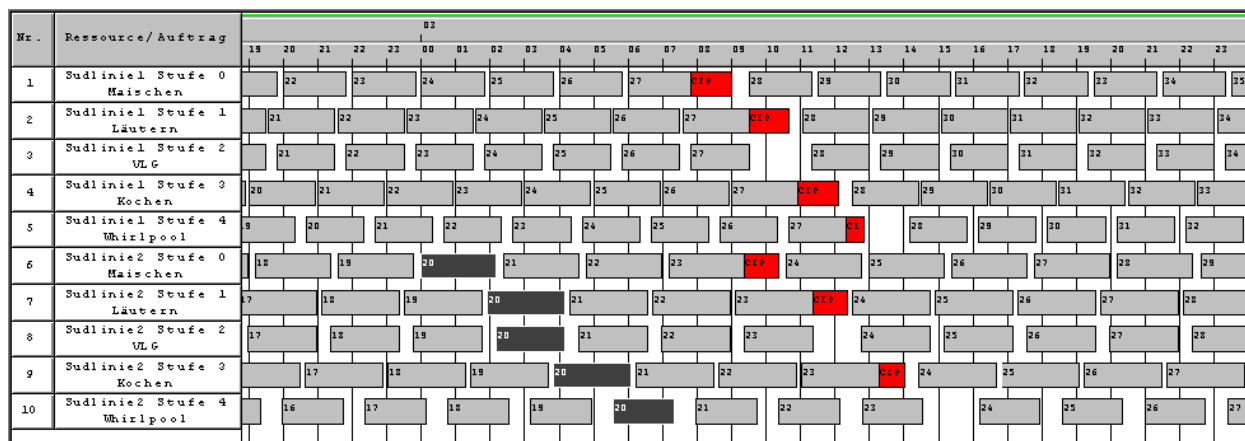


Bild 41: Ausschnitt aus einem Gantt-Chart zu einem ressourcenorientierten Modell mit zwei Sudlinien

Bild 41 zeigt einen Ausschnitt eines Gantt-Charts, das mit einem ressourcenorientierten Modell für zwei Sudlinien erzeugt wurde. Der Prozessablauf mit den Stufen „Maischen“, „Läutern“, „VLG“ (Vorlaufgefäß), „Kochen“ und „Whirlpool“ wird am Beispiel der dunkelgrau schattierten „Charge 20“ auf Sudlinie 2 deutlich. Die roten Balken zeigen die Belegung während der Zwischenreinigung an, die gemäß Tabelle 9 nur für bestimmte Prozessstufen und mit individueller Dauer konfiguriert wurde. Die Reinigung wird dabei als eigenständiger Prozess für jede der betroffenen Ressourcen betrachtet, sodass nicht etwa dieselbe „CIP-Charge“ bzw. ein entsprechen-

<sup>\*)</sup> Das Vorlaufgefäß (VLG) wird hier gleichrangig mit den anderen Prozessstufen aufgeführt, obwohl es sich um einen Pufferbehälter ohne technologische Funktion handelt.

des Chargen-Objekt die gesamte Prozesskette durchläuft. In der Simulation wird lediglich die Freigabe einer zu reinigenden Ressource über die reguläre „Post“-Zeit hinaus um die Reinigungsdauer verzögert. Die Ereignisse für Beginn und Ende der Reinigung werden dabei für das Gantt-Diagramm gesondert protokolliert.

Während die Parameter für die Quelle (Zykluszeit, Zyklen bis Reinigung, Verzögerung für Reinigung) für jede Sudlinie aus Tabelle 8 übernommen wurden, erfordert die Ressourcenorientierung detailliertere Informationen als die dort angegebene gesamte Prozessdauer. Die im Beispiel verwendeten Parameter sind in Tabelle 9 angegeben. Im Simulationsmodell sind diese Parameter in je einer Tabelle „Parameter“ auf Ebene der Sudlinie hinterlegt, auf die die Ressourcen-Bausteine zur Laufzeit zugreifen. Da im vorliegenden Beispiel nur ein einziges Produkt hergestellt wird, kann die Tabelle als zweidimensionale Matrix im Format „Parameter x Ressource“ angelegt werden. Der Mehrproduktbetrieb mit sortenabhängigen Parametern erfordert eine aufwendigere Datenhaltung, für die *eMPlant* zahlreiche Datentypen, Objekte, Schnittstellen und besondere Techniken wie das Verschachteln oder Zuweisen von Tabellen als Attribute anderer Objekte anbietet. Zwischen den konkurrierenden Bedürfnissen bezüglich Transparenz und Komfort bei der Datenpflege einerseits und dem effizienten Parameterzugriff zur Laufzeit andererseits kann mit diesen Werkzeugen optimal gewichtet werden.

### 5.2.2.2 Erweiterter ressourcenorientierter Ansatz

Der im vorigen Abschnitt vorgestellte Ansatz ist nur anwendbar, wenn die Gliederung in sequenzielle Prozessstufen für alle Sorten einheitlich ist und eng mit der Ressourcenstruktur korrespondiert. Beide Gegebenheiten sind bei geeigneter Wahl des Detaillierungsgrades häufig erfüllt. Soweit Besonderheiten bestehen, die durch einfache und pragmatische Erweiterungen des ressourcenorientierten Ansatzes nicht zufriedenstellend abgedeckt werden können, sollte die wesentlich flexiblere Technik des prozessorientierten Ansatzes eingesetzt werden. Das folgende Beispiel soll die Anpassungsmöglichkeiten innerhalb des ressourcenorientierten Ansatzes verdeutlichen.

Eine Anzahl baugleicher Sudlinien ( $n_{Linien}$ ) soll mit einheitlicher Zykluszeit ( $\Delta t_{Zyklus}$ ) zeitlich gestaffelt betrieben werden, sodass bei einheitlichem Rezept und idealem Prozessverlauf die Einheiten derselben Prozessstufe reihum und in regelmäßigen Intervallen ( $\Delta t_{Intervall}$ ) belegt werden. Bei geeigneter Verrohrung kann man typgleiche, derselben Prozessstufe zugeordnete Einheiten ohne festen Bezug zu einer Sudlinie, also als „Pool“ redundanter Ressourcen mit wahlfreiem Zugriff, betreiben. Dabei muss nicht jeder „Pool“ gleich stark besetzt sein. Für eine ideale zeitliche Staffelung ( $\Delta t_{Intervall}$ ) ergibt sich die Anzahl der für eine Prozessstufe mindestens benötigten Einheiten ( $n_{Stufe}$ ) abhängig von der für diese Stufe anzusetzenden Belegungsdauer ( $\Delta t_{Stufe}$ ):

$$n_{Stufe} = \left\lceil \frac{\Delta t_{Stufe}}{\Delta t_{Intervall}} \right\rceil = \left\lceil \frac{\Delta t_{Stufe} \cdot n_{Linien}}{\Delta t_{Zyklus}} \right\rceil$$

Bei einer Zykluszeit von 144 min (10 Sude pro Tag je Linie) gelten im Umkehrschluss die in Tabelle 10 angegebenen Grenzwerte für die maximale Belegungszeit je Stufe.

Tabelle 10: Maximale Belegungszeit je Stufe für unterschiedliche Konfigurationen mit  $\Delta t_{Zyklus} = 144$  min

n <sub>Stufe</sub>	1	2	3	4	5	6
n <sub>Linien</sub>	maximale Belegungszeit je Stufe bei $\Delta t_{Zyklus} = 144$ min (10 Sude pro Tag je Linie)					
1	<b>144 min</b>	288 min	432 min	576 min	720 min	864 min
2	72 min	<b>144 min</b>	216 min	288 min	360 min	432 min
3	48 min	96 min	<b>144 min</b>	192 min	240 min	288 min
4	36 min	72 min	108 min	<b>144 min</b>	180 min	216 min
5	29 min	58 min	86 min	115 min	<b>144 min</b>	173 min
6	24 min	48 min	72 min	96 min	120 min	<b>144 min</b>

Für ein Sudhaus mit drei Linien, die mit den Parametern der im vorigen Beispiel beschriebenen „Sudlinie 2“ (vgl. Tabelle 9) betrieben werden, sind demnach alle Prozessstufen dreifach auszuführen. Hier soll nun zusätzlich eine abschließende Stufe „Kühlen“ mit einer Belegungszeit von 60 min ergänzt werden, sodass gemäß Tabelle 10 nur zwei Würzekühler für die drei Sudlinien ausreichen müssten.

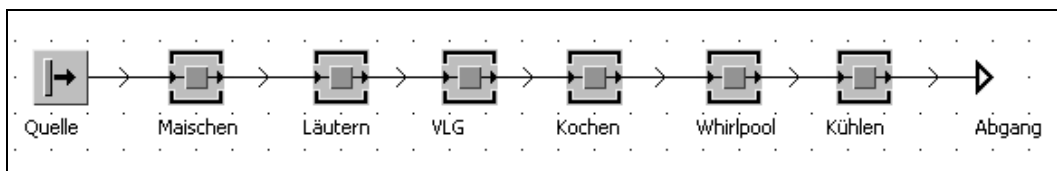


Bild 42: Erweiterte Modellstruktur für eine „Sudlinie“ mit zusätzlicher Stufe „Kühlen“

Die bestehende Konfiguration der Baustein-Klasse „Sudlinie“ wird trotzdem, wie in Bild 42 gezeigt, erweitert, sodass jede der drei im Modell verwendeten Sudlinien eine eigene Einzelstation „Kühlen“ enthält. Diese repräsentiert dabei allerdings lediglich eine zusätzliche Prozessstufe, die jede Charge durchlaufen muss. Die Ressourcenbelegung für die Stufe „Kühlen“ wird vom Materialfluss im Modell entkoppelt und über die Funktionalitäten von eMPlant zum Verwalten von *Diensten* dargestellt (vgl. 4.3.2.3). In der übergeordneten Ebene des Modells werden dazu gemäß Bild 43 neben den drei Sudlinien zwei Bausteine vom Typ *Exporter* („Kühler1“ und „Kühler2“) und ein Baustein vom Typ *Broker* („Kühler“) bereitgestellt. Für den Bearbeitungsprozess beantragt die Einzelstation „Kühlen“ in der Sudlinie den Dienst „Kühlen“, über den zentralen *Broker* „Kühler“. Dieser vermittelt einen der *Exporter* („Kühler1“ oder „Kühler2“), der

freie Kapazität für den Dienst „Kühlen“ gemeldet hat. Der vermittelte Kühler wird nach Ablauf der Bearbeitungszeit für die Stufe „Kühlen“ in der aufrufenden Sudlinie wieder freigegeben. Wie die im Gantt-Chart in Bild 43 in den ersten beiden Zeilen zu sehen, werden die beiden Kühler alternierend belegt.

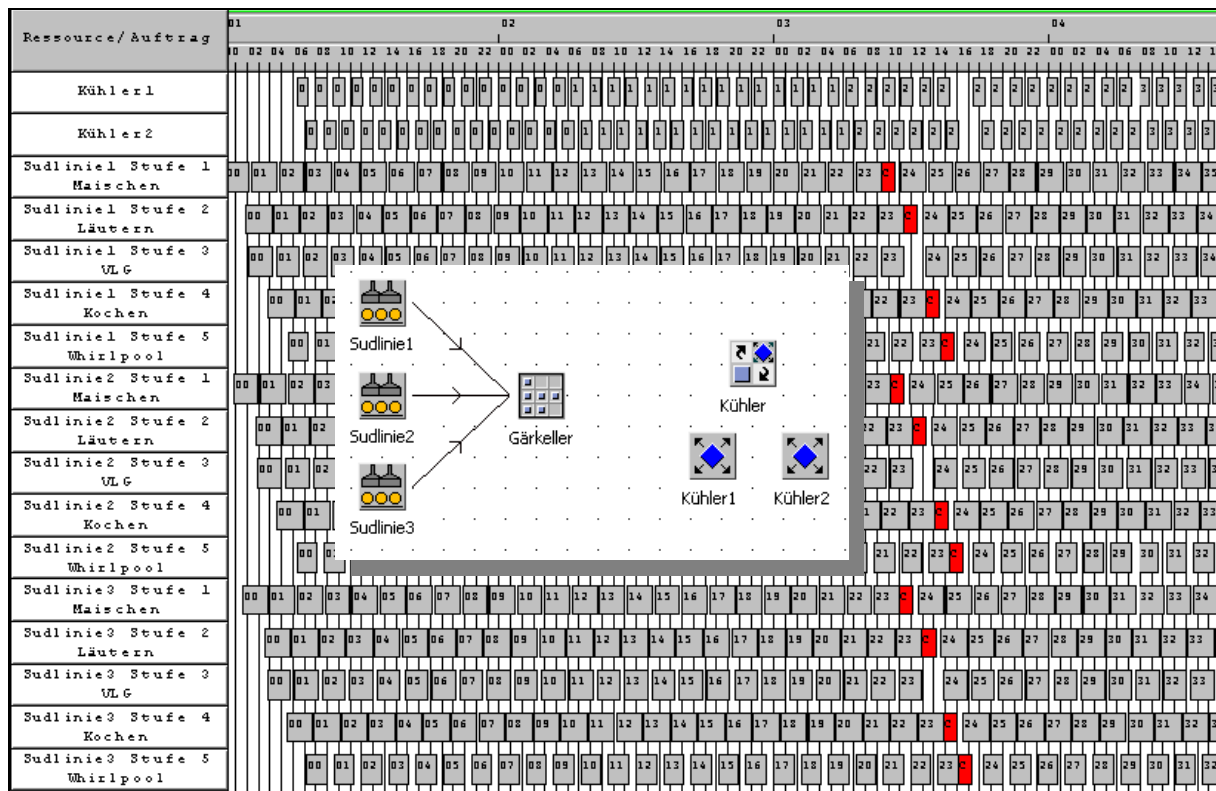


Bild 43: Gantt-Chart für die Belegung von drei Sudlinien mit zwei gemeinsam genutzten Kühlern

Die hier nur für die Stufe „Kühlen“ angewandte Technik kann für beliebige Prozessstufen eingesetzt werden, z. B. um den Bedarf an redundanten Einheiten je Stufe für komplexere Szenarien (Mehrproduktbetrieb, variable Staffelung, schwankende Prozessdauer) experimentell zu ermitteln. Ausgehend von einem für jede Stufe zuverlässig überdimensionierten Kapazitätsangebot kann der tatsächliche Kapazitätsbedarf aus der Zugriffsstatistik für die Dienste abgeleitet werden. Zur Demonstration wurde nach dieser Methode die Auslastung von drei Kühlern für unterschiedliche Sudhauskonfigurationen bestimmt. Variiert wurde die Anzahl identischer Sudlinien, die wie im Beispiel-Modell zu Bild 43 parametrisiert und gemäß ihrer Anzahl ideal gestaffelt betrieben wurden. Ausgewertet wurde der „Arbeitend“-Anteil in der Belegungsstatistik der *Exporter* („Kühler1“, „Kühler2“ und „Kühler3“) für den zweiten Betriebstag, da in dieser Zeit Vollbetrieb ohne die Einflüsse der Anfahrphase und der Zwischenreinigung herrschte. Die Simulationsergebnisse stimmen, wie in Tabelle 11 zu sehen, mit den angegebenen theoretischen Werten für die Auslastung der Kühler fast vollständig überein.



Tabelle 11: Demonstrationsbeispiel für das simulationsgestützte Dimensionieren eines Ressourcen-Pools

Sudlinien	1	2	3	4	5	6
Sude/Tag	10	20	30	40	50	60
Kühler in Betrieb	1	1	2	2	3	3
Theoretische Auslastung	42 %	83 %	63 %	83 %	69 %	83 %
<b>Simulationsergebnisse</b>						
Auslastung „Kühler1“	42 %	83 %	63 %	83 %	69 %	83 %
Auslastung „Kühler2“	0 %	0 %	63 %	83 %	70 %	83 %
Auslastung „Kühler3“	0 %	0 %	0 %	0 %	69 %	83 %

### 5.2.3 Prozessorientierte Perspektive

Der im vorigen Abschnitt vorgestellte ressourcenorientierte Modellansatz ist für detailliertere Untersuchungen mit komplexerer Verfahrenstruktur oder Anlagenkonfiguration nur bedingt tragfähig. Bereits das synchrone Belegen von Ressourcen bei Transfers erfordert gewisse Ablaufstrukturen unterhalb der Ressourcenebene, die beim Einsatz von Grundbausteinen für Prozessstufen nur stark vereinfacht abbildbar sind (vgl. Bild 36 und Bild 40). Zwar bietet *eMPlant* auch eine „längenorientierte“ Materialflusssicht an, mit der die gleichzeitige Belegung aufeinanderfolgender Stationen durch dasselbe bewegliche Element darstellbar ist. In einer kurzen Testphase erwies sich der Ansatz, die rezeptabhängigen Zeitabläufe indirekt über die Manipulation der Länge und Transportgeschwindigkeit von Materialflusselementen abzubilden, allerdings als eher unflexibel, unübersichtlich und konfliktträchtig und wurde daher verworfen.

Nachfolgend werden zwei alternative Ansätze mit prozessorientierter Perspektive vorgestellt, die sich vor allem hinsichtlich der Abbildungsweise der aus Prozessschritten aufgebauten Rezeptabläufe unterscheiden. Für die Entscheidung zwischen dem einfachen und dem erweiterten prozessorientierten Ansatz sei daher an die unter 4.4.2.1 angeführten Aspekte erinnert.

#### 5.2.3.1 Einfacher prozessorientierter Ansatz

Ein einfacher prozessorientierter Ansatz unterstellt eine weitgehend einheitliche Prozessstruktur für alle Produkte und verbessert neben der Auflösung der Prozesse in Einzelschritte und der Synchronisation beim Transfer zwischen Ressourcen auch die Möglichkeiten, das Modell modular und hierarchisch zu strukturieren. Einen Überblick über die Beziehung zwischen den verwendeten Strukturelementen und Hierarchieebenen für diesen Ansatz zeigt Bild 44.

Das *Sudhaus* stellt in dieser Übersicht die oberste Modellebene dar, die neben den Netzwerken für die einzelnen Sudlinien v. a. Funktionen für die allgemeine Modellbedienung und zentral verwaltete Daten sowie Schnittstellen zu externen Datenquellen (Auftragsdaten, Rezeptparameter, Ablaufprotokolle, usw.) enthält.

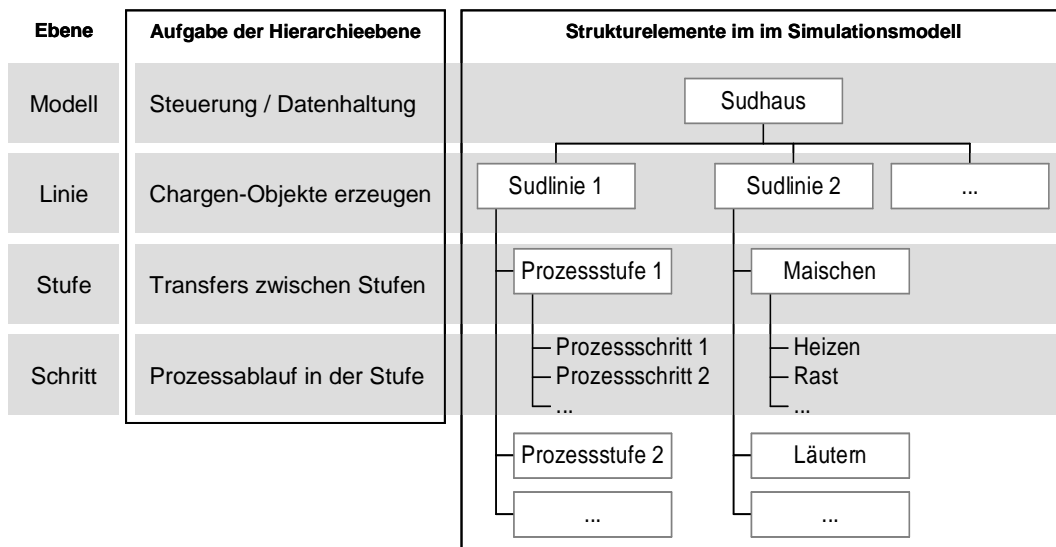


Bild 44: Strukturelemente und Hierarchieebenen für einen einfachen prozessorientierten Modellansatz

Jede *Sudlinie* enthält eine sequenzielle Anordnung von Prozessstufen sowie Funktionen zum Starten von Chargen-Objekten nach einem vorgegebenen Zeitplan.

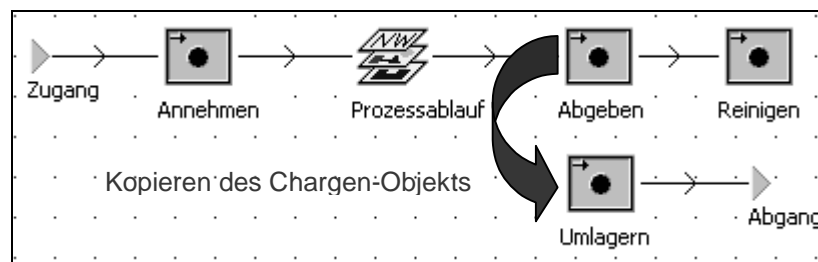


Bild 45: Struktur der Baustein-Klasse „Prozessstufe“ für den prozessorientierten Ansatz

Die allgemeine Funktionalität einer *Prozessstufe* beschränkt sich auf das Management der Transferprozesse, das prinzipiell auf dem bereits in Bild 40 vorgestellten Austausch von Chargen-Objekten aufbaut. Allerdings wird an die nachfolgende Stufe nur eine Kopie des Chargen-Objekts weitergegeben, während das Original im abgebenden Netzwerk verbleibt, bis der Transfer und ggf. anschließende Reinigungsschritte abgewickelt sind. Die in Bild 45 dargestellte Struktur für die Baustein-Klasse „Prozessstufe“ verwendet dabei das in Bild 36 für den Vergleich zwischen ressourcenorientierter und prozessorientierter Perspektive verwendete Schema. Sofern der Prozessablauf im gleichnamigen Netzwerk nur einen einzigen Schritt („Prozess“) enthält, kann mit diesem Baustein auch ein ressourcenorientiertes Modell quasi als „ausgearteter Fall“ dargestellt werden.

Der *Prozessablauf* stellt die letzte Hierarchieebene unterhalb der Prozessstufe dar. Dort werden alle relevanten Einzelschritte der jeweiligen Prozessstufe durch miteinander verknüpfte Stationen abgebildet. Prinzipiell können dabei beliebig komplexe, z. B. auch verschachtelte oder verzweigte

te Strukturen angelegt werden, durch die sich das Chargen-Objekt nach dem Eintreten in die Stufe bewegt. Entlang des ggf. produktabhängigen Pfades durch das Netzwerk können abhängig von der Aufgabenstellung der Simulation für bestimmte Prozessschritte zusätzliche Ressourcen beansprucht (z. B. beim „Heizen“, vgl. Bild 36) oder Animationseffekte, Materialverbrauchsbuchungen, Protokolleinträge oder andere ereignisabhängige Wechselwirkungen ausgelöst werden. Im Kontext der Würzeproduktion reicht allerdings eine einsträngige Sequenz von Prozessschritten vielfach aus, wie die Beispiele in Bild 46 zeigen.

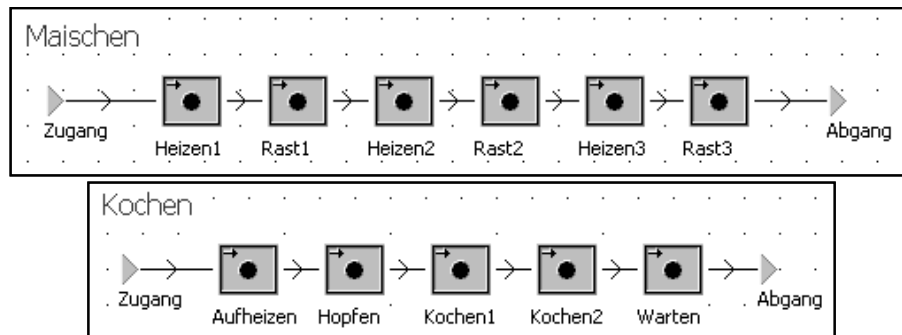


Bild 46: Beispiele für Schrittketten zweier Prozessstufen in einem prozessorientierten Sudhaus-Modell

Da für jeden Prozessschritt mindestens die Bearbeitungszeit zu parametrieren ist, und die verwendeten Einzelstationen nur auf der untersten Hierarchieebene direkt zugänglich sind, hat es sich in der Praxis bewährt, sämtliche Parameter in einer zentralen Tabelle zu verwalten. Sortenspezifische Unterschiede im Prozessablauf können durch Verzweigungen abgebildet werden, für die dann eine entsprechende Verteilstrategie, z. B. anhand eines Attributs „Sorte“ des Chargen-Objekts, zu definieren ist. Diese Technik bietet sich auch an, um unterschiedlich detaillierte Prozessmodelle als alternative Schrittketten in demselben „Prozessablauf“-Netzwerk anzulegen, wie das Beispiel in Bild 47 zeigt. Welcher Pfad genutzt wird, kann z. B. auf der Ebene der Baustein-klasse, durch eine globale Variable auf Modellebene oder abhängig von der Sudlinie, der Sorte oder ggf. sogar für jede einzelne Charge individuell entschieden werden.

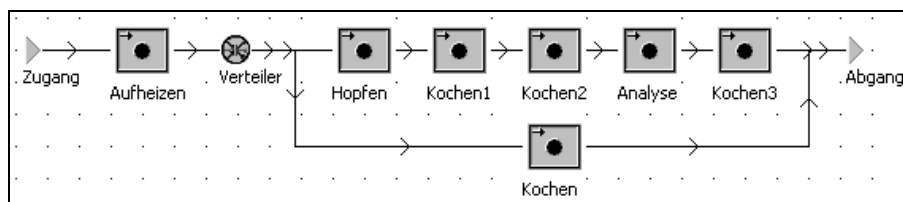


Bild 47: Verzweigte Ablaufkette für die dynamische Auswahl unterschiedlich detaillierter Prozessmodelle

### 5.2.3.2 Erweiterter prozessorientierter Ansatz

Mit dem im vorigen Abschnitt vorgestellten einfachen prozessorientierten Ansatz sind zur Laufzeit nur solche Ablaufketten darstellbar, die bereits beim Modellaufbau als Netzwerk aus statio-

nären Bausteinen und Kanten angelegt wurden. Sieht ein Verfahren das mehrfache Ausführen von typgleichen Prozessschritten (ggf. mit unterschiedlichen Parametern) vor, müssen diese im Modell mehrfach konfiguriert werden (vgl. „Heizen“, „Rast“ beim Maischen in Bild 46). Um sich in der Simulation stärker an die Flexibilität und logische Organisation realer rezeptorientierter Anlagen bzw. Systeme annähern zu können, wurde ein aufwendigerer aber auch erheblich leistungsfähigerer *erweiterter* prozessorientierter Ansatz entwickelt. Dieser behandelt die Anlagendefinition und die Verfahrensdefinition separat und verwendet anlagenseitig auf der Ebene der „Prozessstufen“ sogenannte „Einheiten“, die über ein definiertes Angebot an „Operationen“ verfügen. Diese können als Prozessschritte eines Rezepts wiederholt und, soweit erforderlich, mit wechselnden Parametern aufgerufen werden. Dieses Konzept verwendet eine erweiterte Modellhierarchie, die in Bild 48 analog zu Bild 44 dargestellt ist.

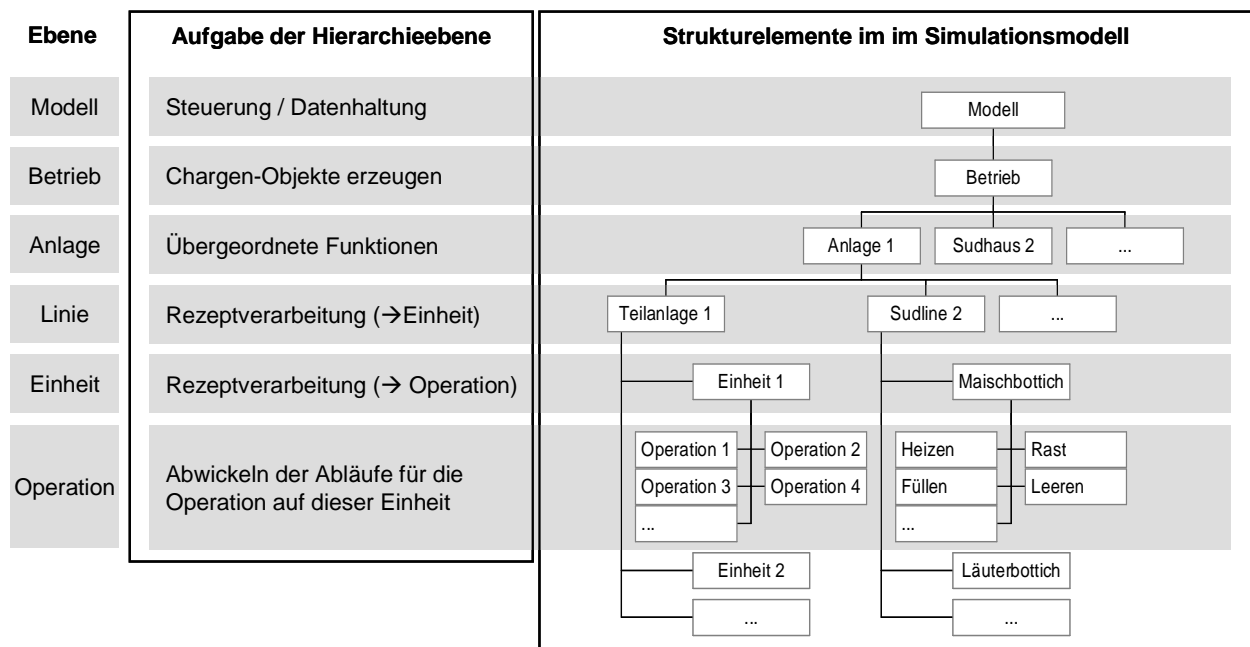


Bild 48: Strukturelemente und Hierarchieebenen für den erweiterten prozessorientierten Modellansatz

Damit eine formale Trennung zwischen Anlagen- und Verfahrensdefinition im Zuge der Rezeptverarbeitung zur Laufzeit durch eine anlagenspezifische Interpretation von Prozeduren überwunden werden kann, müssen sich beide Bereiche auf eine gemeinsame Datenbasis beziehen. Das Simulationsmodell wird daher durch eine Datenbankanwendung ergänzt, die eine Bibliothek von „Klassen“ und „Operationen“ als Schnittstelle zwischen Anlagen- und Verfahrensdefinition enthält. Bild 49 zeigt die wichtigsten Begriffe und Beziehungen in einem schematischen Überblick.

Die „Klassen“ beziehen sich auf in der Simulationsumgebung als Bausteinklassen angelegte Typen von Einheiten („Maischbottich“, „Würzpfanne“, usw.). Die Anlagendefinition gruppiert auf dieser Basis „Einheiten“ unterschiedlicher „Klassen“ zu „Linien“. Als Grundlage für die Rezeptdefinition legt eine Zuordnungstabelle („Klassen-Operationen“) fest, welche Klasse welche Ope-

rationen unterstützt. Innerhalb eines Rezepts definiert je eine „Prozedur“ für jede Klasse, welche Operationen in welcher Reihenfolge auszuführen sind. Jede zulässige Kombination von Prozedur und Produktionslinie bzw. Einheit kann individuell parametrisiert werden. Die zur Laufzeit im Simulationsmodell ausgewertete Verknüpfung einer Operation mit anlagenspezifischen Parametern wird in diesem Zusammenhang als „Prozessschritt“ bezeichnet.

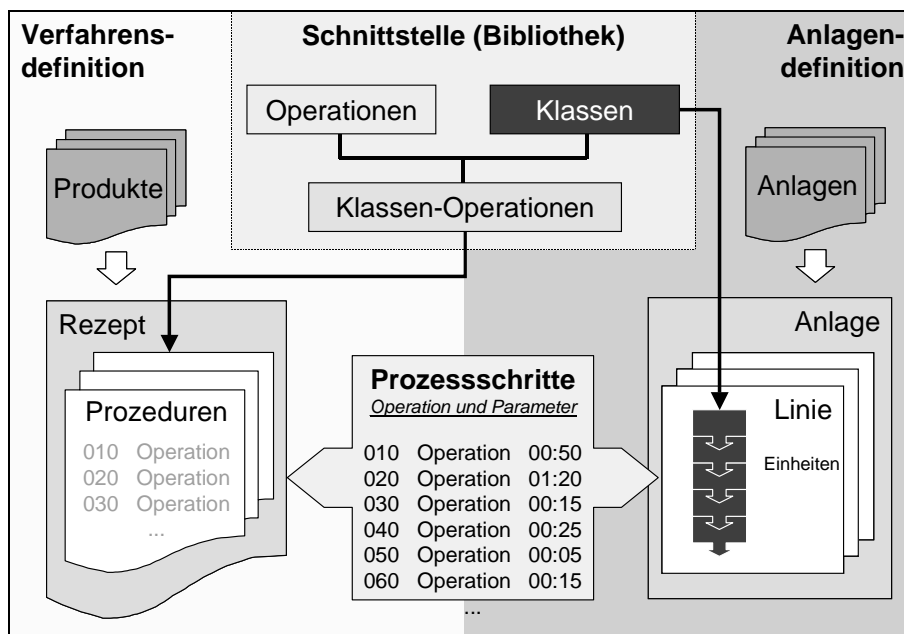


Bild 49: Koordination zwischen Anlagen- und Verfahrensdefinition im erweiterten prozessorientierten Ansatz

Einen Überblick über die nachfolgend beschriebene Ablaufstruktur im erweiterten prozessorientierten Ansatz bietet Bild 50. Das Produktionsprogramm für die Simulation wird als Liste von Aufträgen ebenfalls in der Datenbank verwaltet. Diese gibt für jeden „Auftrag“ die zu verwendende Chargennummer, die Sudlinie, das zu verwendende Rezept und die planmäßige Startzeit an. Zusammen mit der Auftragsliste werden die ebenfalls in der Datenbank verwalteten Prozeduren und Parameterlisten vor dem Start eines Simulationslaufs in das Simulationsmodell importiert. Während der Simulation wird je Auftrag ein Chargen-Objekt erzeugt, das über ein Attribut vom Typ „Tabelle“ verfügt, in dem die auszuführenden Prozessschritte eingetragen werden. Diese an das Chargen-Objekt „angehängte“ Tabelle fungiert quasi als Steuerrezept (vgl. 2.1.2.3), das bei Bedarf je Charge individuell anpassbar ist. Nachdem die Schrittfolge im Steuerrezept lediglich festlegt, welche Klassen-Operationen mit welchen Parametern nacheinander auszuführen sind, wird erst zur Laufzeit eine für den einzelnen Prozessschritt geeignete Einheit innerhalb der vorgegebenen Produktionslinie ausgewählt. Ein weiteres Attribut des Chargen-Objekts verweist als „Zeiger“ auf den jeweils nächsten auszuführenden Prozessschritt.

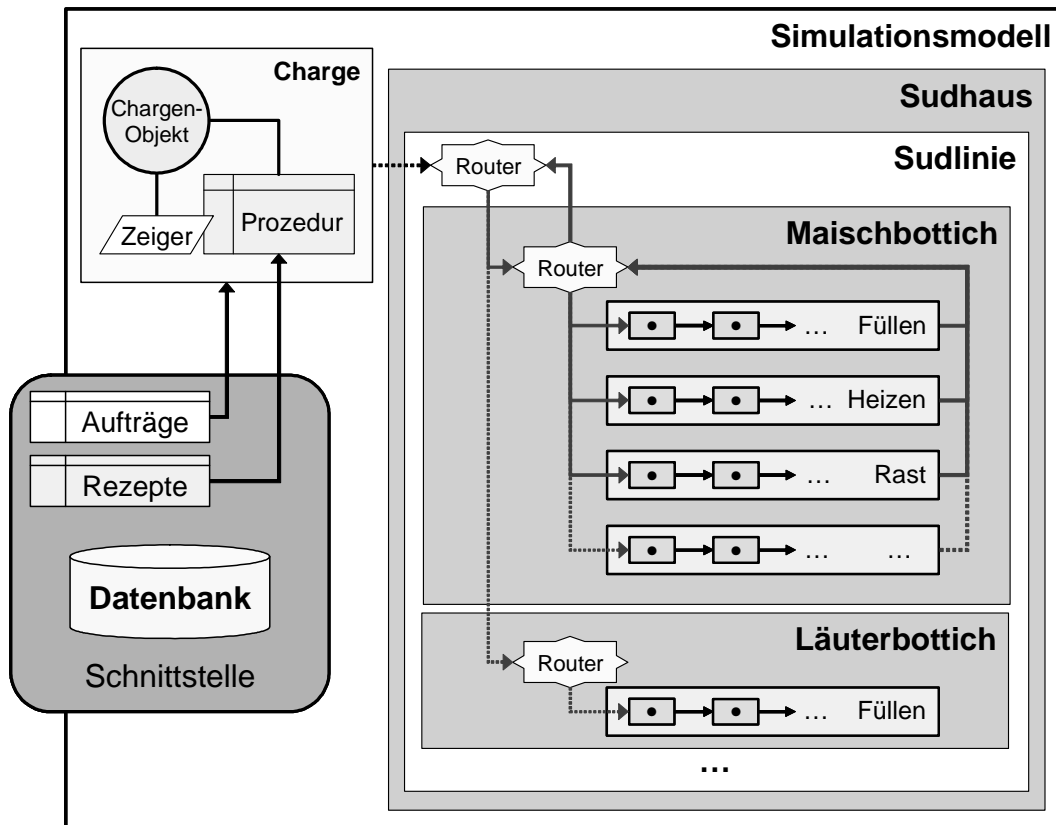


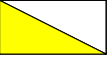



Bild 50: Schematische Übersicht zur Ablaufstruktur im erweiterten prozessorientierten Ansatz

Als zentrales Element für den flexiblen Prozessablauf wurde ein als „Router“ bezeichneter Baustein entwickelt, der in der Klassendefinition für die Ebenen „Linie“ und „Einheit“ enthalten ist. Der Router bestimmt beim Eintreffen eines Charge-Objekts anhand von dessen Prozedur-Tabelle und der aktuellen Zeiger-Position den aktuell auszuführenden Prozedurschritt. Auf der Ebene „Linie“ wird das Charge-Objekt anschließend in die Eingangswarteschlange des Routers im untergeordneten Netzwerk einer geeigneten Einheit eingereiht. Sobald die adressierte Einheit verfügbar ist, platziert deren Router das übergebene Charge-Objekt im untergeordneten Netzwerk für die entsprechende Operation. Der Transfer vom Router zum Ziel erfolgt auf beiden Ebenen durch Steuerungsmethoden, sodass der Modellaufbau ohne Materialfluss-Kanten auskommt. Wie in Bild 50 angedeutet, werden die Abläufe auf der untersten Ebene der „Operationen“ dagegen durch fest verkettete Materialflussbausteine abgebildet. Nach dem Abschluss der Operation wird das Charge-Objekt wiederum per Steuerungsmethode an den Router der übergeordneten Einheit zurückgeschickt, der es zur jeweils nächsten Operation innerhalb derselben Einheit bzw. zwecks Transfer zu einer anderen Einheit zurück zum Router der übergeordneten Linie weiterleitet, solange noch weitere Prozessschritte abzarbeiten sind.

Tabelle 12: Operationen-Klassen für den erweiterten prozessorientierten Ansatz

Klasse	Symbol	Bezeichnung, Beschreibung
IN		Füllen, Zugang einer Charge
PROC		Prozess, Reaktionsschritt(e) für eine Charge
OUT		Leeren, Abgang einer Charge
POST		Reinigen, Wiederherstellen des Neutralzustands

Auch wenn die interne Gestaltung der Netzwerke auf der Ebene der „Operationen“ abgesehen von gewissen formalen Schnittstellen prinzipiell völlig frei gehandhabt werden könnte, wurden die in Tabelle 12 aufgeführten Grundtypen von Operationen als Basis-„Klassen“ in der Datenbank und als Baustein-Klassen in der Simulationsumgebung angelegt und zur Synthese der Bausteine für die im Rahmen der Würzproduktion benötigten Einheiten genutzt. Die in der Tabelle angegebenen Symbole werden u. a. in Bild 51 verwendet, das den Einsatz der Operationen-Klassen demonstriert und im Vergleich zu Bild 40 die aufwendigere Prozess- und Transferlogik des erweiterten prozessorientierten Ansatzes verdeutlicht.

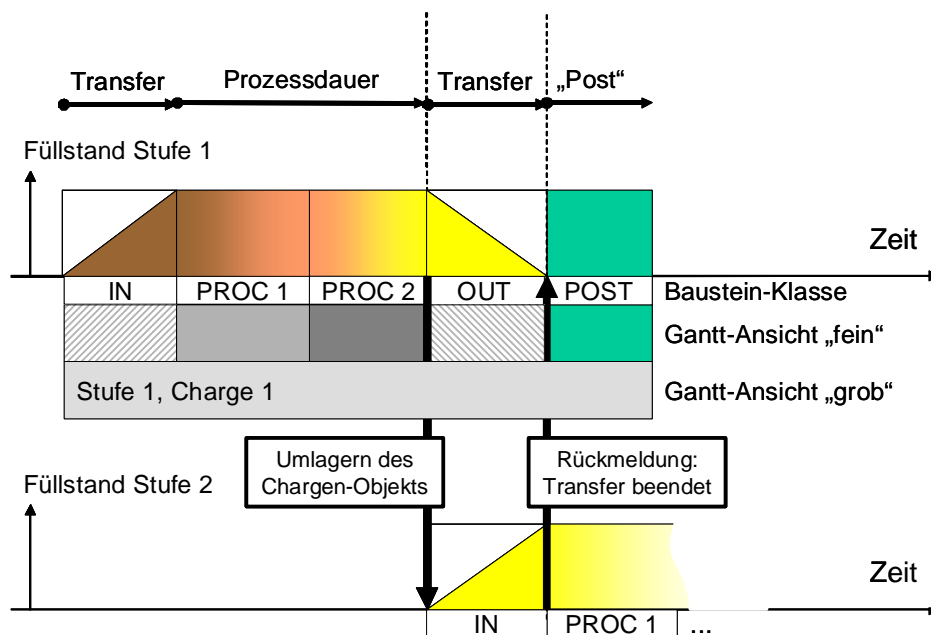


Bild 51: Prozess-, Transfer- und „Post“-Operationen im erweiterten prozessorientierten Ansatz

Zur „Post“-Zeit zählen hier nur Abläufe *nach* dem vollständigen Abgang der Charge, der von der empfangenden Einheit durch ein Synchronisationssignal rückgemeldet wird. Erst ab diesem Zeitpunkt startet die „Prozessdauer“, die sich innerhalb einer Prozedur auf mehrere Prozessschritte (hier: „PROC1“, „PROC2“) verteilen kann. In Gantt-Charts können die in Bild 51 unterhalb der

Zeitachse angedeuteten Darstellungsarten („grob“ und „fein“) wahlweise, parallel oder in Mischformen eingesetzt sein, um die Belegungsdauer der Einheit und/oder Details zum Prozessablauf anzuzeigen. Das Gantt-Chart kann daneben auch Hinweise auf Blockierungen, Störungen und andere geplante oder ungeplante Wartezeiten enthalten. Bild 52 zeigt einen Ausschnitt aus einem Gantt-Chart, das mit einem Simulationsmodell nach dem erweiterten prozessorientierten Ansatz erzeugt wurde. In den Prozessstufen „Maischbottich“ und „Würzepfanne“ sind energieintensive Prozessschritte („Heizen“) rot schattiert hervorgehoben. Für „Läuterbottich“ und „Vorlaufgefäß“ dominiert der Materialtransfer während des hier einstufig modellierten Abläuterns, was im Gantt-Chart durch aufsteigende und absteigende Schraffurlinien (Zugang und Abgang) symbolisiert wird.

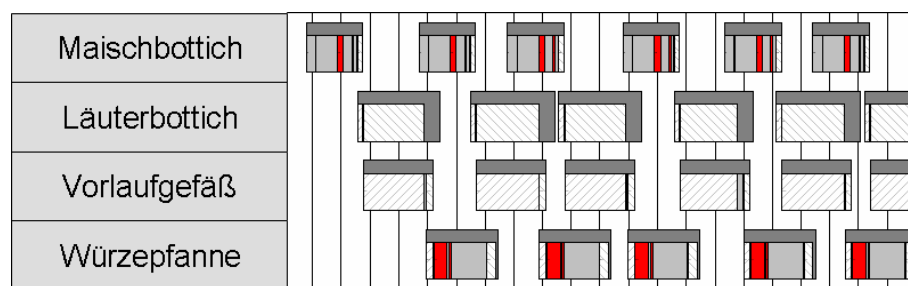


Bild 52: Beispiel für ein Gantt-Chart (Ausschnitt) aus einem Modell mit erweitertem prozessorientierten Ansatz

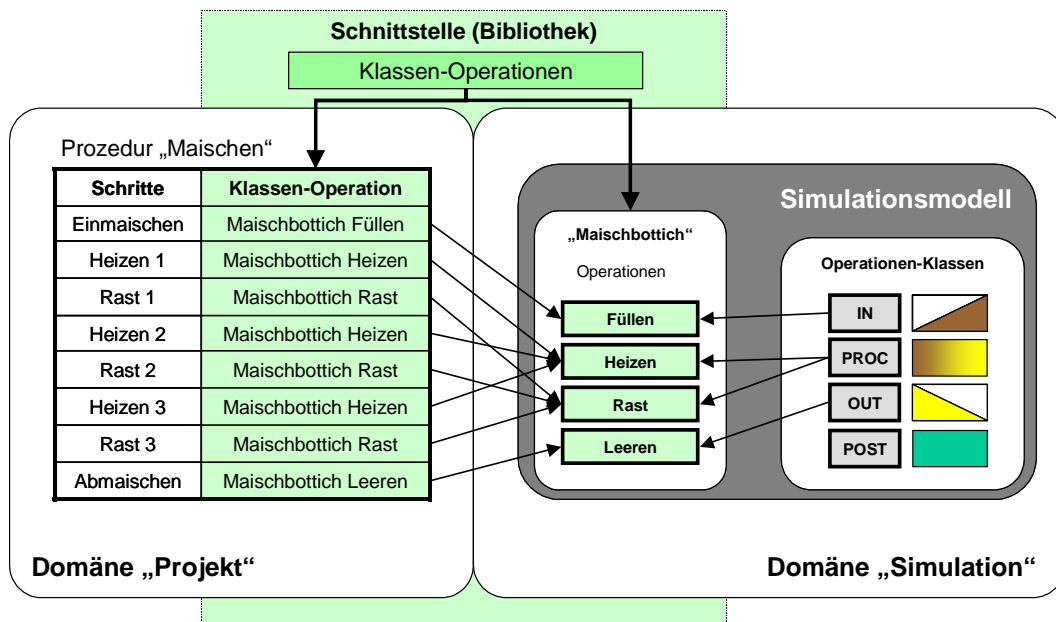


Bild 53: Klassen-Operationen als Schnittstelle zwischen den Domänen „Projekt“ und „Simulation“

Die vorgeschlagenen Operationen-Klassen können erweitert, abgewandelt oder mithilfe der Vererbungsmechanismen von eMPlant diversifiziert und an problemspezifische Anforderungen an-



gepasst werden. Die in der datenbankbasierten Schnittstellen-Bibliothek definierten Klassen-Operationen (vgl. Bild 49) sind dabei mit den im Modell verwendeten Operationen-Klassen nur über deren Instanzen – genauer: deren Namen – verknüpft. Welche Operationen-Klasse in der Simulation unter dem Namen einer bestimmten Klassen-Operation angesprochen wird, hängt demnach von der Konfiguration der betreffenden Einheit beim Erstellen des Modells ab. Das erleichtert einerseits das Pflegen und Weiterentwickeln der Operationen-Klassen und ermöglicht andererseits den Einsatz derselben datenbankseitigen Prozedurdefinitionen mit unterschiedlich konfigurierten Simulationsmodellen. Die Schnittstellen-Bibliothek (ent-)koppelt damit nicht nur zwischen Anlagen- und Verfahrensdefinition, sondern, wie in Bild 53 dargestellt, auch zwischen den Domänen „Projekt“ und „Simulation“ (vgl. Abschnitt 4.2.3). Projektseitig können zur Prozedurdefinition also frei definierbare Klartexte verwendet werden, solange den einzelnen Schritten Klassen-Operationen aus dem Bestand der Bibliothek zugeordnet werden.

### 5.3 Simulation der Fermentation

#### 5.3.1 Kapazitätsorientierte Perspektive

Die kapazitätsorientierte Sicht betrachtet Tanklager als einheitliche und intern unstrukturierte Lagerbereiche von begrenzter Kapazität. Die Kapazitätsgrenze kann als Volumenbeschränkung oder über die Anzahl verfügbarer „Lagerplätze“ für Sude formuliert sein. Im hier zunächst betrachteten einfachsten Fall wird für die Simulation unterstellt, dass als Chargen-Objekte erzeugte Sude einen ein- oder mehrstufigen Fermentationsbereich als „atomare Werkstücke“ durchlaufen und danach vernichtet oder weitergegeben werden. Für die Kapazitätsbetrachtung spielt es dabei keine Rolle, ob die ankommenden Chargen-Objekte direkt als „Kaltwürze“-Chargen erzeugt wurden oder bereits einen simulierten „Brauprozess“ durchlaufen haben. Die gesamte Tanklager-Abteilung wird durch einen Baustein vom Typ *Parallelstation* repräsentiert, der eine gewisse Anzahl von beweglichen Elementen aufnehmen kann, die er nach einer individuellen, ggf. sortenspezifischen und/oder zufallsabhängigen Bearbeitungszeit wieder abgibt. Da keine individuellen Tanks abgebildet werden, impliziert dieser einfache Modellansatz einige wesentliche Abweichungen vom realen Betriebsablauf:

- Anders als in der Realität üblich werden *nicht* mehrere Sude zu einer Tankcharge vereinigt und dadurch für folgende Schritte (Freigabe, Weitergabe) „synchronisiert“. Dies ist u. a. bei der Auswahl und Parametrierung von Verteilungsfunktionen für stochastische Parameter zu berücksichtigen. Außerdem werden Zeitabläufe in Zusammenhang mit der Reinigung, die erst nach dem restlosen Entleeren eines Tanks ausgeführt werden kann, nur sehr ungenau wiedergegeben.
- Wenn reale Tankchargen den Nutzinhalt eines Tanks nur teilweise belegen, steht die als Kopfraum verbleibende Kapazität anderen Chargen *nicht* zur Verfügung. Im vereinfachten

Modell wird dagegen lediglich das tatsächliche Volumen der Charge ggf. zuzüglich eines Steigraumzuschlags beansprucht.

- Wird ein Tank nur teilweise geleert, kann der physikalisch freigegebene Tankraum nicht sofort erneut belegt werden. Vielmehr steht er in der Regel erst nach dem vollständigen Entleeren, Reinigen und ggf. Rüsten (Vorspannen) des Tanks wieder zur Verfügung. Im vereinfachten Modell kann der geräumte Lagerplatz bzw. das freigegebene Volumen sofort erneut belegt werden.

Zusätzlich zu den hier genannten systematischen Diskrepanzen zwischen Modell und Realität hängt der tatsächliche Bedarf an Tankkapazität häufig von diskreten Detailentscheidungen an der Peripherie eines Tanklagers (z. B. im Bereich der Filtration) und dem nicht exakt determinierbaren Prozessverlauf der Fermentation ab. Da die Aufenthaltsdauer einzelner Tankchargen im Bereich der Fermentation daher ohnehin nicht langfristig vorausberechnet werden kann, sollten sich Angaben zur Prozessdauer bzw. von Parametern für entsprechende stochastische Modellfunktionen nicht zu stark am Idealfall orientieren. Während sich die systematisch bedingten Ungenauigkeiten eher im Bereich von Stunden (Belegungszeit) bewegen werden, kann die ideale Durchlaufzeit einer Tankcharge bei anomalem Prozessverlauf oder aufgrund der Bestandspolitik im Lagerkeller um mehrere Tage oder sogar Wochen überschritten werden. Vor diesem Hintergrund kann auch ein einfaches Modell für die Tankbelegung während Gärung und Lagerung bei nicht zu optimistischer Parametrierung zumindest für eine erste Annäherung an die benötigte Tankkapazität eingesetzt werden. Anders als in pauschalen statischen Rechenmodellen können in der Simulation die diskrete Arbeitsweise der rezeptgesteuerten Würzproduktion, stochastische Größen beim Prozessablauf und das Überlagern von Prozessen mit unterschiedlichen Parametern im Mehrproduktbetrieb mit geringem Aufwand abgebildet werden.

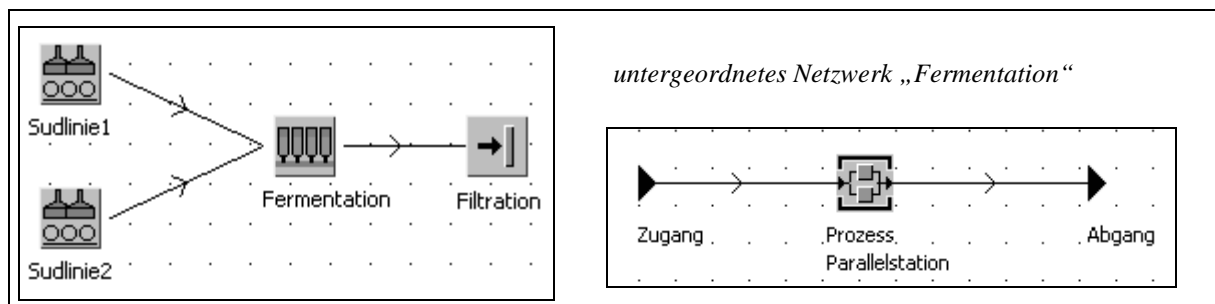


Bild 54: Einfacher kapazitätsorientierter Modellansatz für die Fermentation

Bild 54 zeigt ein einfaches Modell, in dem der gesamte Ablauf der Fermentation als einstufiger Prozess abgebildet wird. Die ankommenden Chargen werden hier von kapazitätsorientiert modellierten „Sudlinien“ erzeugt, die gemäß Abschnitt 5.2.1 parametrisiert sind. Einziger Prozessparameter für die einstufige Fermentation im folgenden Einsatzbeispiel ist die stochastische Prozessdauer, für die zur Demonstration eine Dreiecksverteilung mit den Parametern 15 Tage (Mini-

mum), 17 Tage (Modalwert) und 21 Tage (Maximum) angenommen wurde. Nach dem „Prozess“ werden die Chargen an die nachfolgende „Filtration“ abgegeben, die im Beispiel lediglich als „Senke“ modelliert ist. Für das vorliegende Beispiel sollen seitens der Filtration keinerlei Restriktionen für die Annahme von Chargen gelten, sodass die Chargen jederzeit und ohne Zeitaufwand angenommen werden. Allerdings lassen sich kapazitätsorientierte Tanklagermodelle durchaus mit realistischeren Filtrationsmodellen kombinieren, wie unter 5.4 gezeigt werden soll. Sofern eine Charge nach dem Ablauf der Prozessdauer nicht abgegeben werden kann, z. B. weil der Schichtplan für die Filtration aktuell keine Produktion vorsieht, behält sie ihre Position auf der Parallelstation, bis der Abgang erfolgen kann. Über ihre verarbeitende Funktion hinaus fungiert die Parallelstation, die das gesamte Tanklager repräsentiert, damit als *staufähiger Puffer* bzw. als Warteschlange für die Filtration, gemäß der für den Fermentationsbereich relevanten NIS-Strategie (vgl. 5.1.2.1, S. 93).

Für das folgende einfache Beispiel wurde die Aufnahmekapazität der Parallelstation im Netzwerk „Fermentation“ sehr hoch gewählt (hier: 1000 Sude), um in einem Simulationslauf von angemessener Dauer (hier: 60 Tage) den Tankraumbedarf „gegen unbegrenzte Kapazität“ zu ermitteln. Dieser hängt im vorliegenden Fall ausschließlich von der Arbeitsweise im Sudhaus (Sudfolge) und der Prozessdauer der Fermentation ab, da von limitierenden Effekten seitens der Filtration oder durch Transferrestriktionen per Definition abgesehen wird.

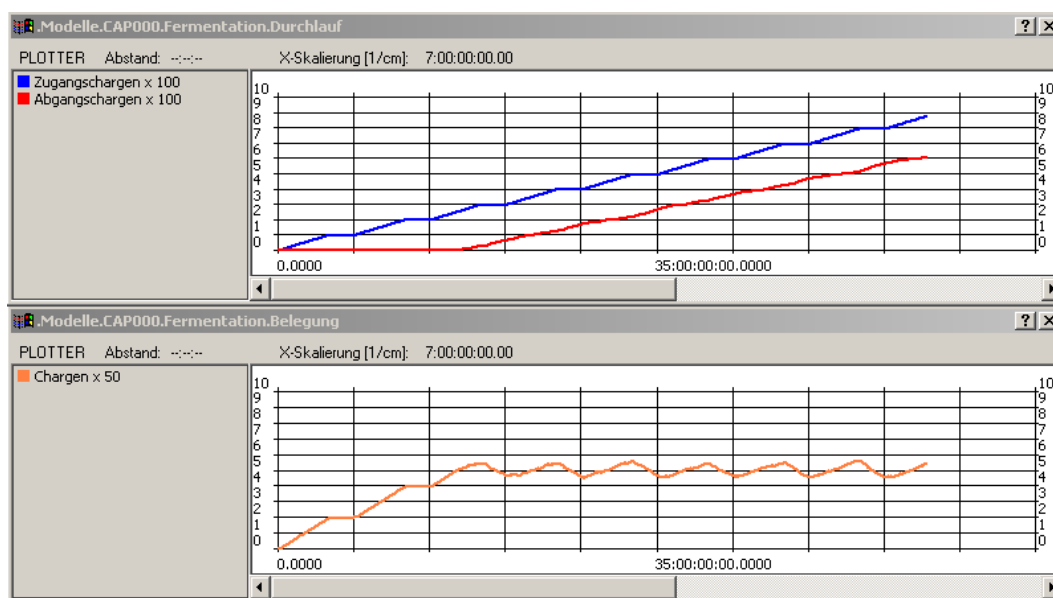


Bild 55: Durchlauf und Bestand an Einzelchargen im kapazitätsorientierten Beispielmodell für die Fermentation

Bild 55 zeigt den Durchlauf von Einzelchargen durch die Fermentationsabteilung (oben) und den Bestand an Einzelchargen in der Fermentationsabteilung (unten), der sich nach einer Anlaufphase von rund drei Wochen (vgl. Prozessdauer bis 21 Tage) auf einem Niveau um 250 Chargen einpendelt.

Mehr Übersicht bietet das Histogramm in Bild 56, das für den Zeitraum nach der Anlaufphase erstellt wurde. Während der Simulation befanden sich gleichzeitig maximal 281 Chargen im Netzwerk „Fermentation“. Zum Vergleich wurden verschiedene Simulationsläufe mit konstanten Prozessdauern (15 Tage, 17 Tage und 21 Tage) ausgeführt, für die das jeweilige Maximum der Tankbelegung entlang der Histogramm-Skala gekennzeichnet wurde. Das Ergebnis der stochastischen Simulation unterschreitet dabei den ungünstigsten Fall (maximale Prozessdauer für alle Chargen) wesentlich. Auf umfangreichere und damit statistisch aussagekräftige Versuchsreihen mit unterschiedlichen Zufallszahlenströmen wurde hier wegen des rein exemplarischen Charakters des Modells allerdings verzichtet.

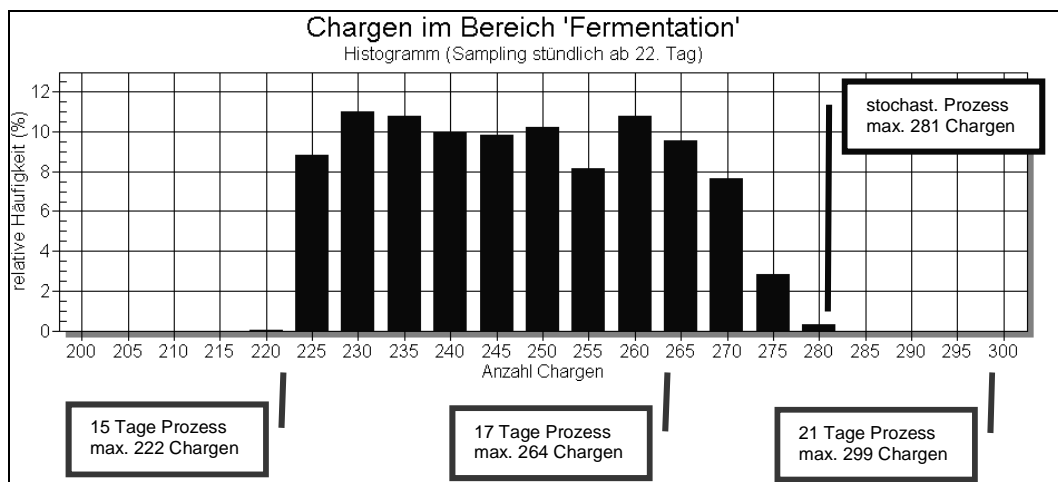


Bild 56: Histogramm zur Belegungsstatistik für das Tanklager „Fermentation“

Der vorgestellte Ansatz kann auch verwendet werden, um ein mehrstufiges Verfahren vereinfacht abzubilden. Dabei sind die folgenden Vereinfachungen zusätzlich zu den bereits genannten Punkten zu bedenken:

- Jede im Modell generierte Charge durchläuft die Prozessstufen individuell. Sofern der Fermentationsbereich – wie im obigen Beispiel – mit einzelnen Suden beschickt wird, gibt der Lagerkeller mit entsprechender Zeitverzögerung auch einzelne Sude ab.
- Die Zeitabläufe beim Transfer zwischen den Stufen können ohne einzelne Tanks zu betrachten kaum sinnvoll abgebildet werden. Daher wird auf einen expliziten Bezug zu Transferzeiten und Transferkapazitäten im Modell vollständig verzichtet und stattdessen ein pauschaler Zuschlag bei der Parametrierung der Prozessdauer angenommen. Der Übergang einer Charge findet im Modell also ohne Zeitaufwand statt.

Für das folgende Beispiel werden zwei Prozessstufen „Gären“ und „Lagern“ angenommen, denen spezielle Tankkapazitäten exklusiv zugeordnet sind. Gemäß Bild 57 wird im Modell der aus Bild 54 bekannte Aufbau sequenziell erweitert. Für die Prozessdauer in beiden Stufen wurde

eine Dreiecksverteilung mit den in Tabelle 13 angegebenen Parametern verwendet. Bild 58 zeigt den Durchlauf der Chargen und die Bestandsentwicklung für einen Zeitraum von 60 Tagen.

Tabelle 13: Prozessparameter im kapazitätsorientierten Demonstrationsmodell für die Fermentation

Prozessstufen	Parameter der Dreiecksverteilung		
	Minimum	Modalwert	Maximum
<b>Gären</b>	5 Tage	6 Tage	7 Tage
<b>Lagern</b>	10 Tage	11 Tage	14 Tage

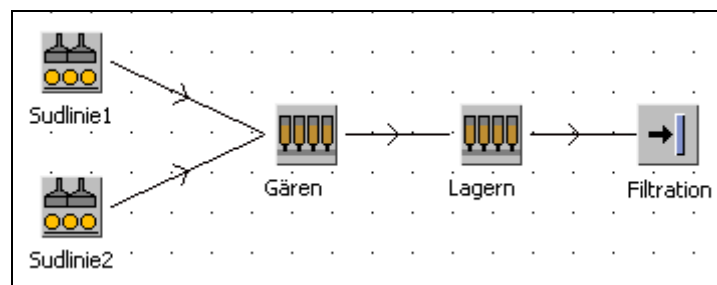


Bild 57: Einfacher kapazitätsorientierter Modellansatz für die mehrstufige Fermentation

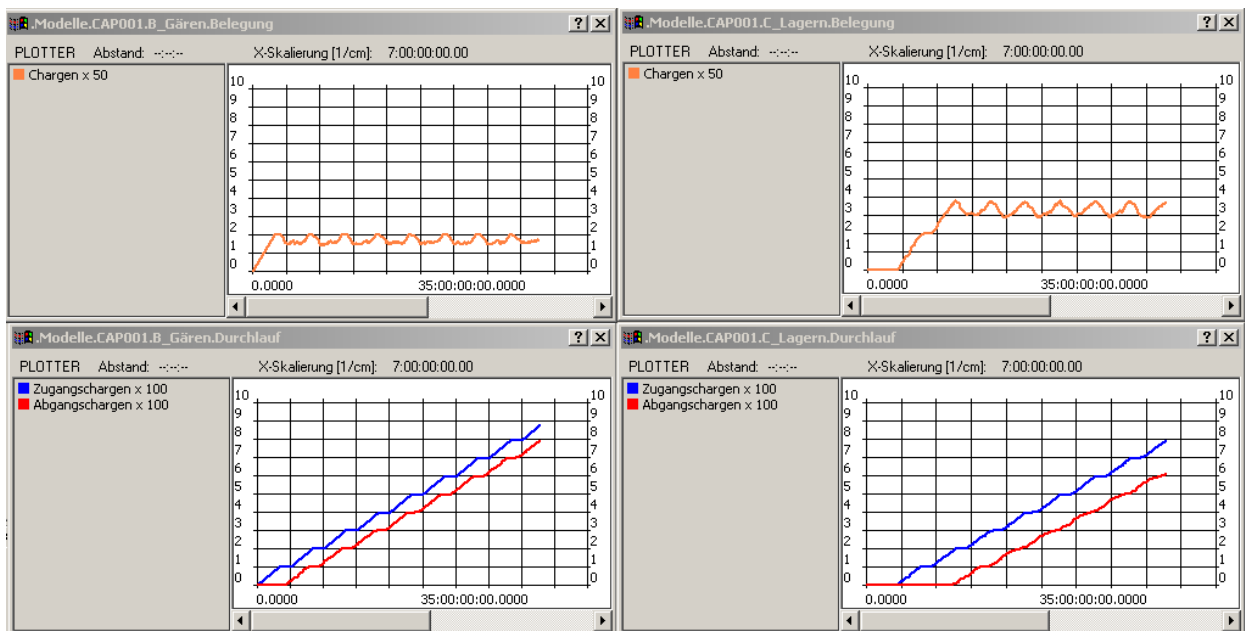


Bild 58: Kapazitätsbetrachtung für eine zweistufige Fermentation mit getrennten Tankkapazitäten (links: Gären, rechts: Lagern, oben: Bestand an Chargen, unten: Durchlaufdiagramme)

Die Anzahl der während der Simulation auf der Parallelstation belegten Arbeitsplätze kann abhängig vom Flüssigkeitsvolumen (je Charge bzw. Sorte) und dem Steigraumbedarf (je Sorte oder ggf. Prozessstufe) in den Tankraum-Bedarf umgerechnet werden. Dies kann *offline* (also nach

der Simulation) erfolgen, wenn das Chargenvolumen und der Steigraumbedarf konstant und einheitlich gelten. Dagegen muss der benötigte Brutto-Tankraum bei Mehrproduktbetrieb mit wechselnden Parametern oder beim Mehrzweckeneinsatz von Tanks mit wechselndem Steigraumbedarf bereits während der Simulation berechnet und ggf. überwacht werden, da die automatisch erzeugte Belegungsstatistik der Parallelstation in diesen Fällen nicht aussagekräftig ist.

Für diesen Zweck wurde eine Klasse „Tankpool“ entwickelt, die nicht direkt in den Materialfluss eingebunden ist, sondern lediglich per Funktionsaufruf über alle Zugänge und Abgänge in einem oder mehreren Tanklager-Bausteinen informiert wird. Anhand dieser Meldungen, die auch den anzuwendenden Steigraumzuschlag beinhalten, wird die resultierende Änderung des Brutto-Tankraum-Bedarfs berechnet und in einer Zählvariablen kumuliert. Das folgende Beispiel zeigt eine Variante des vorigen Demonstrationsmodells, bei der ein gemeinsamer Pool an ZKTs zum Gären (Steigraumzuschlag 30 %) und Lagern (Steigraumzuschlag 10 %) dient. Bild 59 zeigt den von einem „Plotter“-Baustein aufgezeichneten Wert des Summenzählers für den belegten Brutto-Tankraum über einen Zeitraum von 60 Tagen.

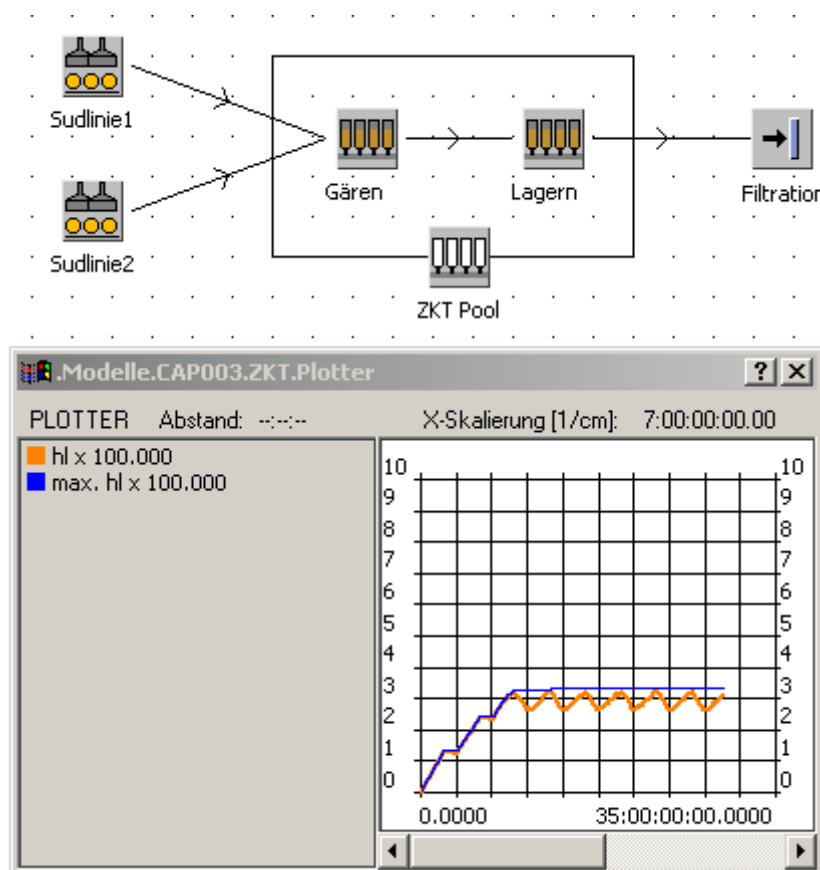


Bild 59: Modell und Simulationsergebnis zum Brutto-Tankraum-Bedarf für einen Pool von Mehrzweck-ZKTs (Parametrierung des Modells wie im Beispiel von Bild 58)

Bei Bedarf können analog zur hier dargestellten Vorgehensweise zusätzliche Summenzähler eingerichtet werden, z. B. um die Belegung des Pools durch unterschiedliche Prozessstufen oder Produkte bzw. Produktgruppen (Biersorten, Biertypen, usw.) zu verfolgen.

Stützt sich die Kapazitätsbetrachtung – wie bei Einsatz von Tankpools – auf abgeleitete, rechnerisch ermittelte Eigenschaften (z. B. Brutto-Tankraum), die im Simulationsmodell nicht direkt und strukturell „verkörpert“ sind, greifen auch die Mechanismen der Grundbausteine, die den dynamischen Materialfluss bestimmen, nur noch eingeschränkt. Dies muss berücksichtigt werden, sofern ein Tanklager nicht gegen unbegrenzte Kapazität dimensioniert, sondern mit einem vorab definierten Kapazitätsangebot ausgestattet und in der Simulation getestet werden soll:

Sofern für jeden im Modell eingesetzten Tanklager-Baustein der Steigraumzuschlag und das Chargenvolumen als statische Parameter angegeben werden können, besteht jeweils ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der Anzahl der mit Chargen belegten Arbeitsplätze und dem Brutto-Tankraum. In diesem Fall kann im Modell eine Kapazitätsgrenze durch die Anzahl der angebotenen Arbeitsplätze sinnvoll definiert werden. Ist die Kapazität der Parallelstation voll ausgeschöpft, werden ankommende Chargen am Zugang gehindert, ggf. bis wieder Arbeitsplätze frei werden.

Falls der Steigraumzuschlag und das Chargenvolumen nicht einheitlich gelten, wird das Kapazitätsangebot eines Tanklager-Bausteins über die zahlenmäßige Aufnahmekapazität für Chargen-Objekte nicht zufriedenstellend beschrieben, sodass die Kontrolle der Kapazitätsgrenze durch die Materialfluss-Funktionalität der Parallelstation *nicht* gewährleistet ist. Wie viel Aufwand für das Erstellen problemspezifischer Steuerungsmechanismen in diesem Fall gerechtfertigt ist, hängt u. a. vom konkreten Anwendungsfall und dem Anspruch an die Präzision der Simulationsergebnisse ab. Da Letzterer durch die eingangs erwähnten Vereinfachungen für die kapazitätsorientierte Perspektive ohnehin stark eingeschränkt ist, soll hier nur auf zwei denkbare Ansätze zur Kapazitätskontrolle hingewiesen werden:

- Der konventionelle Materialfluss und die einfache Struktur des Modells können weitgehend erhalten werden, wenn das Kapazitätslimit im Modell durch eine einzige Charge überschritten werden darf. Dazu sollte die Parallelstation des Tanklager-Bausteins zuverlässig überdimensioniert werden, damit ein ungehinderter Materialfluss prinzipiell gewährleistet ist. Als Kapazitätsgrenze wird der verfügbare Brutto-Tankraum in einem Attribut des Bausteins angegeben. Beim Eintreffen eines Chargen-Objekts berechnet der Tank-Pool-Baustein den zusätzlichen Tankraum-Bedarf für den Neuzugang und das insgesamt belegte Bruttovolumen. Überschreitet dieses die statisch definierte Kapazitätsgrenze, so wird der Zugang zum Tanklager geschlossen, bis nach einem oder mehreren Abgängen wieder Tankraum frei ist. Wie schwerwiegend diese Toleranzregel das gesamte Simulationsergebnis verfälscht, hängt dabei vor allem vom Verhältnis des Chargenvolumens zur Kapazität des jeweiligen Bausteins ab. In Brauereien werden zum Gären und Lagern in der Regel zahlreiche Tanks benö-

tigt, die jeweils mehrere Sude fassen, sodass dieser einfache Ansatz durchaus praxisnahe Ergebnisse liefern kann. Wird eine restriktivere bzw. pessimistischere Perspektive bevorzugt, kann die Kapazitätsgrenze gegenüber dem „echten“ Maximalwert herabgesetzt werden.

- Damit eine definierte Kapazitätsgrenze für einen Tanklager-Baustein im Modell strikt und exakt eingehalten wird, ist die Zulässigkeit eines Zugangs in das entsprechende Tanklager zu prüfen, *bevor* der Transfer des Chargen-Objekts stattfindet. Dies erfordert Eingriffe in die Materialflusslogik und bedingt zusätzliche Anforderungen an die beteiligten Modellkomponenten, da jeder Transfer zu einem Tanklager-Baustein vorab durch einen Nachrichtenaustausch zwischen geeigneten Schnittstellenfunktionen legitimiert werden muss. Dieser Ansatz ist etwas aufwendiger, bietet dafür aber die Möglichkeit im Vorfeld eines Transfers auch komplexere Nebenbedingungen (Verfügbarkeit von Leitungswegen, Belegungsregeln, usw.) zu überprüfen oder ein situationsabhängiges Engpassverhalten (Abwarten oder alternative Ziele suchen, usw.) zu spezifizieren. Der „Mehrwert“ detailorientierter Mechanismen wird allerdings durch die prinzipielle Unschärfe der kapazitätsorientierten Perspektive grundsätzlich in Frage gestellt, sodass höhere Anforderungen an die Realitätstreue für eine ressourcenorientierte Sichtweise sprechen.

### 5.3.2 Mechanismen für die Tankauswahl

Ein Tanklager(-bereich) fasst in aller Regel mehrere gleichartige oder ähnliche Tanks zusammen und stellt damit eine Gruppe von Ressourcen dar, die einander vollständig oder teilweise substituieren können. Für einen Transfer in das Tanklager entsteht damit ein Entscheidungsproblem, wenn für die Auswahl eines oder mehrerer Zieltanks für eine ankommende Charge mehrere zulässige Alternativen bestehen. Sofern im Simulationsmodell, z. B. in Verbindung mit einem vorgegebenen Sudplan, keine expliziten Angaben für die Tankauswahl vorliegen, muss das Modell Mechanismen beinhalten, die ein möglichst realitätsnahes „Verteilen“ der Chargen auf bestimmte Zieltanks sicherstellen. Dabei soll vereinfachend angenommen werden, dass jeweils für ein einzelnes unteilbares Chargen-Objekt mit definierter Menge *genau ein* geeigneter Zieltank als Empfänger zu ermitteln ist. Das Verteilen einer Charge auf mehrere Zieltanks ist in der Praxis entweder systematisch (gezieltes Verschneiden) oder spontan (z. B. Ausnutzen der Tankkapazität) motiviert. Mithilfe von benutzerdefinierten Prozeduren können in der Simulation bei Bedarf Teilchargen generiert und gestaffelt oder synchron als eigenständige Chargen-Objekte weitergegeben werden, sodass die hier vorgestellten Mechanismen ebenfalls greifen.

#### 5.3.2.1 Kriterien für die Tankauswahl

Oberflächlich betrachtet präsentieren sich die Tanklager moderner Brauereien meist als Batterie uniformer Großbehälter. Der Idealfall einer vollständigen Redundanz zwischen den einzelnen Tanks ist in der Praxis allerdings keineswegs selbstverständlich, sodass bei der Auswahl eines



Zieltanks vielfältige Restriktionen und Präferenzen zu berücksichtigen sind. Einzelne Tanks können sich hinsichtlich der folgenden Merkmale unterscheiden:

- Aufgrund unterschiedlicher technischer Eigenschaften (Armaturen, Drucktoleranz, Geometrie, Einbauten, Sensorik, usw.) kann oder soll bei Mehrproduktbetrieb nicht jeder Tank oder Tanktyp für jede Sorte bzw. jeden Biertyp und bei mehrstufigen Verfahren nicht für jede Prozessstufe eingesetzt werden.
- Die Anbindung der Tanks an zuführende und abführende Leitungswege bzw. Vorgänger- und Nachfolger-Abteilungen muss nicht einheitlich sein. Bei einer komplexen Topologie des Gesamtbetriebes muss der Weg der Chargen unter Umständen sogar über mehrere Stufen geplant und koordiniert werden, damit ein bestimmtes Endziel (z. B. Filter- oder Abfülllinie) tatsächlich erreichbar ist.
- Neben den technischen Gegebenheiten können organisatorisch begründete Einschränkungen (harte Restriktionen) oder Präferenzen (weiche Restriktionen) für die Tankauswahl bestehen, z. B. wenn innerhalb des Tanklagers eine räumliche oder logische Gliederung nach Sorte, Biertyp, Prozessstufe oder Reifestadium vorgeschrieben ist bzw. angestrebt wird. Entsprechende Vorgaben können sich z. B. auf die absolute Position der Tanks oder relative Position bzw. Nachbarschaft von Chargen im Tanklager beziehen.
- Ein Tank, der sich aufgrund seiner statischen Eigenschaften als Zieltank eignet, muss darüber hinaus aktuell verfügbar, also gereinigt und gerüstet sein bzw. bereits eine zum Neuzugang kompatible Vorbelegung aufweisen. Häufig sollen mehrere separat eintreffende Chargen gezielt zu einer Tankcharge vereinigt werden. Bei Mehrproduktbetrieb dürfen Chargen unterschiedlicher Sorten natürlich nicht vermischt werden. Außerdem kann eine technologisch motivierte Toleranzgrenze für den „Altersunterschied“ zwischen Vorbelegung und Neuzugang derselben Sorte gelten.
- Die wesentliche quantitative Eigenschaft für die Tankauswahl ist die Aufnahmekapazität der Tanks, die durch die Tankcharge unter Berücksichtigung des jeweiligen Steigraumzuschlags einerseits nicht überschritten werden darf, andererseits aber möglichst weitgehend ausgenutzt werden soll, damit möglichst wenig Kapazität als nicht nutzbarer Kopfraum gebunden wird. Falls vorab bekannt ist, dass eine Serie von Chargen gleicher Sorte zu einer Tankcharge zusammengefasst werden soll, ist es zweckmäßig diese Information für die Tankauswahl bereitzustellen, damit bereits beim Eintreffen der ersten Teilcharge die Gesamtmenge berücksichtigt und sichergestellt wird, dass die folgenden Chargen tatsächlich denselben Tank erreichen.
- Außerdem gilt für die Tankauswahl häufig eine gewisse Präferenz oder Systematik bezüglich der Benennung bzw. der meist korrespondierenden räumlichen Anordnung der Tanks, die z. B. bevorzugt reihum oder mit möglichst niedriger Laufnummer auszuwählen sind.

### 5.3.2.2 Verteilstrategien des Simulators

Die Simulationssoftware *eMPlant* stellt auf Materialflussebene bestimmte Standard-Strategien zum Verteilen von beweglichen Elementen zwischen mehreren Nachfolgern bereit, die Bild 60 im Überblick zeigt. Darüber hinaus werden Schnittstellen für benutzerdefinierte Verteilmechanismen angeboten, mit deren Hilfe auch komplexere Entscheidungskriterien für die Tankauswahl ausgewertet werden können.

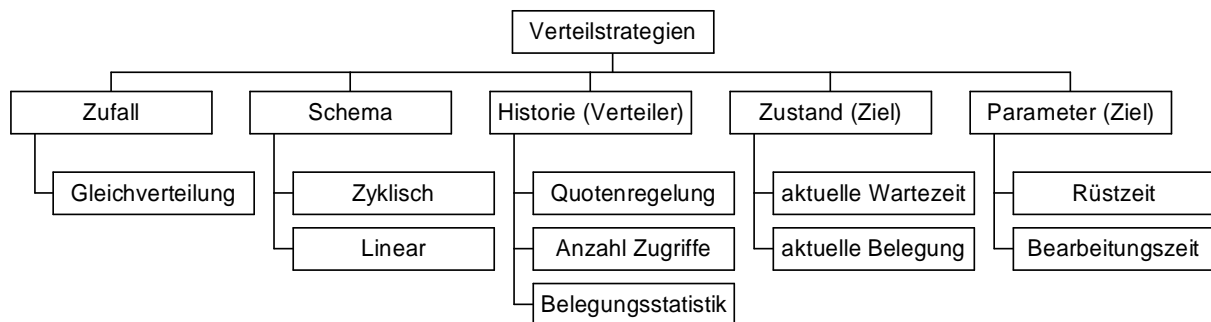


Bild 60: Klassifikation der vordefinierten Verteilstrategien in *eMPlant*

In besonders einfachen Fällen können die angebotenen Standard-Strategien bereits zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Unabhängig von den Details der hier aufgezählten Standard-Strategien bestehen allerdings einige allgemeine Einschränkungen, die deren Einsatz zur Tankauswahl in der Simulation in vielen Fällen behindern:

- Abgesehen von der Aufnahmebereitschaft des potenziellen Empfängers, die in allen Strategien auf Materialflussebene überprüft wird, wird jeweils genau *ein* Auswahlkriterium angewandt, während bei der Tankauswahl meistens mehrere hierarchische Auswahlkriterien zu beachten sind.
- Dass grundsätzlich alle per Materialflusskante verknüpften Nachfolger als potenzielles Ziel betrachtet werden, steht in Konflikt mit der Anforderung, wechselnde, z. B. sortenabhängige, Restriktionen zu berücksichtigen.
- Die Verfügbarkeit eines potenziellen Empfängers wird direkt auf Materialflussebene geprüft, bezieht sich also lediglich auf die prinzipielle Aufnahmebereitschaft des Nachfolgers für bewegliche Elemente. Bei der Tankauswahl können jedoch umfangreichere Auswertungen erforderlich sein (z. B. Steigraumzuschlag berechnen, Kompatibilität von Vorbelegung und Neuzugang prüfen), um die Tauglichkeit von Zieltanks zu ermitteln.

### 5.3.2.3 Erweiterte Strategie für die Tankauswahl

Als wesentlich differenzierter und flexibler im Vergleich zu den materialflussnahen Standard-Strategien hat sich in der Simulationspraxis als Synthese unterschiedlicher Ansätze die folgende Methodik für die Tankauswahl herausgestellt:

1. Für die im Modell konfigurierten Tanks wird eine zweidimensionale Matrix („Status-Tabelle“) angelegt, in der jede Zeile einen Tank und jede Spalte ein Merkmal dieses Tanks repräsentiert. „Merkmale“ können unmittelbare oder abgeleitete Eigenschaften des Tanks, aber auch seines Inhalts, seines Zustands, seiner Historie, seiner Zukunft bis hin zu beliebigen abstrakten Bewertungs- oder Klassifikationskriterien sein. Die Status-Tabelle kann darüber hinaus auch tankbezogene Informationen enthalten, die für die Tankauswahl nicht unmittelbar von Belang sind. Die für die Tankauswahl relevanten Merkmale können – soweit sie nicht statisch bestimmt sind – zur Laufzeit entweder *kontinuierlich* oder *bei Bedarf* aktualisiert werden (vgl. folgender Stichpunkt). Bei der Tankauswahl werden die Zeilen der Status-Tabelle nach ggf. hierarchisch gestaffelten Zielkriterien sortiert, worauf der bestplatzierte Tank als bevorzugtes Ziel ausgegeben wird. Die Sonderfälle, dass kein geeignetes Ziel *existiert* oder kein geeignetes Ziel *verfügbar* ist, erfordern kontextspezifische Verfahren, die hier nicht allgemein diskutiert werden sollen.
2. Die *kontinuierliche Aktualisierung* nutzt die Status-Tabelle zur zentralen Datenhaltung für das Tanklager und setzt entsprechende Meldefunktionen in den einzelnen Tank-Bausteinen voraus, die auf die Struktur der Status-Tabelle abzustimmen sind und möglicherweise wesentlich häufiger aufgerufen werden, als es die Tankauswahl erfordert. Dagegen verwendet die *Aktualisierung bei Bedarf* eine auf der Ebene des Tanklagers angelegte Schleifenfunktion über alle aufgelisteten Tanks, die auf die Merkmale der Tank-Bausteine abzustimmen ist und dynamische Werte genau dann berechnet, wenn ein Tank ausgewählt werden soll.
3. Die momentane Verfügbarkeit eines Tanks kann als dynamisches Merkmal des Tanks in der Status-Tabelle enthalten sein. Sie wird dann im Zuge der Tankauswahl für alle aufgelisteten Ziele bestimmt und dient in der Regel als höchstrangiges Sortierkriterium, sodass die verfügbaren Ziele die Tabelle anführen. Alternativ kann die Rangliste unabhängig von der Verfügbarkeit (als „Wunschliste“) gebildet werden, um anschließend die Verfügbarkeit für einzelne Tanks mit absteigendem Rang zu untersuchen, bis ein aufnahmebereiter Empfänger gefunden ist. Falls die Evaluation der Verfügbarkeit auf rechenintensive Funktionen angewiesen ist, spricht dies für die letztere Methode, da hier nicht immer alle Tanks bewertet werden müssen. Bei der ersten Variante besteht die Möglichkeit, die Verfügbarkeit nicht als binären Wert, sondern indirekt über die voraussichtliche Wartezeit bis zur planmäßigen Verfügbarkeit auszudrücken, wobei für aktuell verfügbare Ziele eine Wartezeit von „0“ gesetzt wird. Diese Option kann die Realitätsnähe des simulierten Entscheidungsverhaltens bei der Tankauswahl unter Umständen wesentlich steigern, da in der Praxis oft aufgrund von Annahmen über die nahe Zukunft ggf. eine gewisse Wartezeit toleriert wird, um ein prinzipiell favorisiertes Ziel ansteuern zu können.

4. Sofern das Verteilen einer Charge auf mehrere Ziele zulässig sein soll, kann die Status-Tabelle neben einzelnen Tanks auch Einträge für Gruppen von Tanks enthalten, die als virtuelle Ressourcen verwaltet und bewertet werden. Diesen können auch Chargen zugeordnet werden, deren Menge die Aufnahmekapazität einzelner Tanks übersteigt. Durch die Konfiguration der Status-Tabelle kann dabei der Zugriff auf Tanks in Tupeln, Tripeln oder umfangreicheren Kombinationen selektiv reguliert werden. Bei der Auswahl mehrerer Zieltanks müssen geeignete Teilchargen je Tank dynamisch angelegt werden.

### 5.3.2.4 Gruppieren von Chargen bei der Tankauswahl

Das Befüllen eines Tanks erfolgt häufig in mehreren Etappen bzw. durch mehrere Teilchargen, wobei es Regeln und Präferenzen für die Akkumulation von Chargen in demselben Tank geben kann. Das in Bild 61 als Flussdiagramm dargestellte Verfahren kann vielseitig verwendet werden, um im Simulationsmodell die Tankauswahl über ein benutzerdefiniertes Attribut des Chargen-Objekts so zu steuern, dass Chargen ausschließlich oder bevorzugt mit übereinstimmendem „Gruppe“-Attribut gruppiert werden.

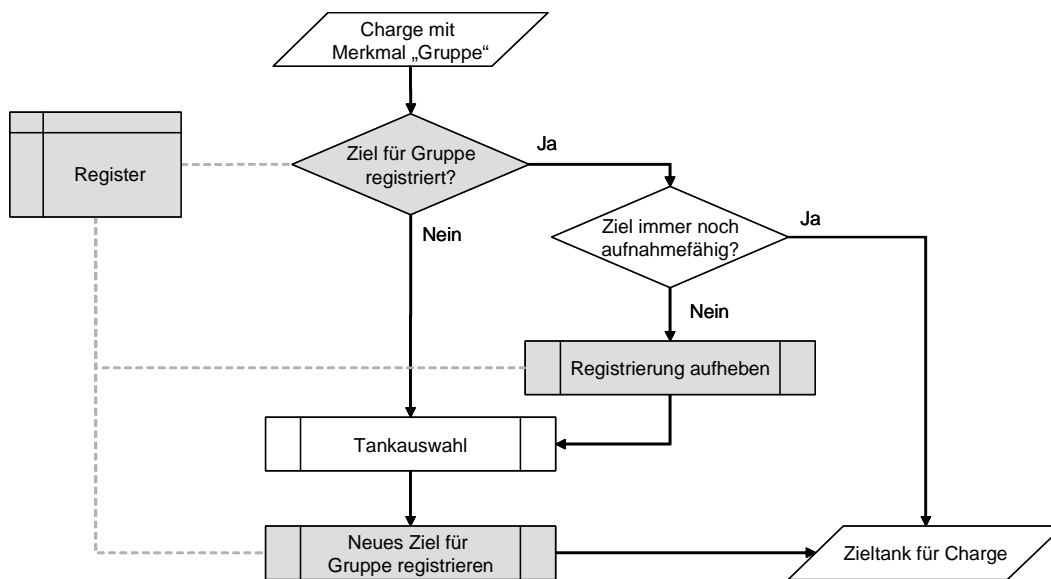


Bild 61: Flussdiagramm für das Gruppieren von Chargen bei der Tankauswahl

Eine Schlüsselrolle spielt dabei die im Bild dargestellte Tabelle „Register“ (vgl. grau schattierte Elemente im Bild), in der das für eine Gruppe zuletzt verwendete Ziel gespeichert wird. Beim Vermitteln eines Chargen-Objekts wird zunächst dessen „Gruppe“-Attribut inspiziert und mit den im Register vorliegenden Einträgen verglichen. Sofern ein übereinstimmender Eintrag im „Register“ existiert, wird die verbleibende Aufnahmekapazität des angegebenen Zieltanks mit dem Tankraum-Bedarf des Neuzugangs verglichen. Bei ausreichender Kapazität wird dieser Tank als Ziel verwendet, anderenfalls wird die bestehende Registrierung aufgehoben und ein neues Ziel für die Gruppe ausgewählt und registriert.

Die vielfältigen Möglichkeiten zum Gruppieren von Chargen bei der Tankauswahl sollen nachfolgend demonstriert werden, wobei zwei wie in den vorangegangenen Beispielen parametrisierte Sudlinien Chargen von einheitlicher Menge an eine Gruppe von Gärtanks („ZKGs“) mit unterschiedlicher Kapazität (2-, 3- und 4-sudige Tanks) abgeben. Die Sude sollen gemäß ihrer Herkunft (Sudlinie 1 oder 2) gruppiert werden, wobei die Sude von Sudlinie 1 (in Bild 62 hellbraun dargestellt) möglichst in 3er-Gruppen und die von Sudlinie 2 (in Bild 62 dunkelbraun dargestellt) möglichst in 4er-Gruppen zusammenzufassen sind. Da gleichzeitig das Kopfraumvolumen minimiert werden soll, werden jeweils unterschiedliche Tanktypen bevorzugt. Als letztrangiges Kriterium soll ein Tank mit möglichst niedriger Laufnummer („001“, ..., „016“) gewählt werden.

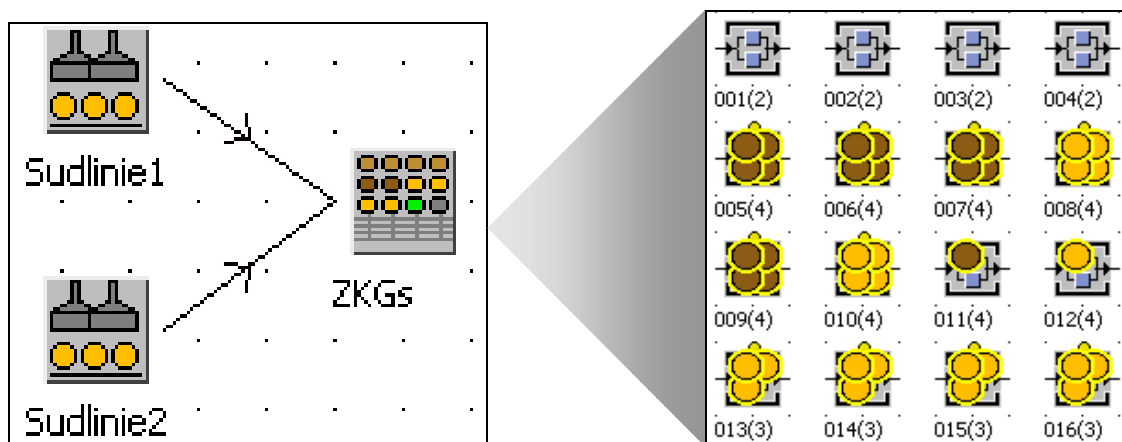


Bild 62: Beispielmodell zum Gruppieren von Chargen bei der Tankauswahl (rechts: teilweise belegte „Tanks“ mit Laufnummern von 001 bis 016; in Klammern: Tankkapazität in Suden)

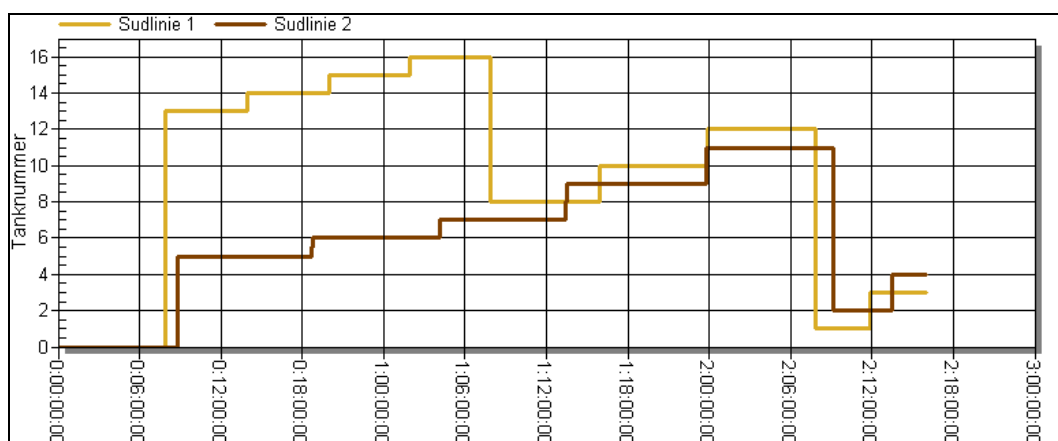


Bild 63: Simulationsergebnis zur Tankauswahl mit gruppierten Chargen im Beispielmodell (Die Ordinate zeigt im Zeitverlauf, welcher Zieltank für Sudlinie 1 und 2 verwendet wurde.)

Das Diagramm in Bild 63 zeigt das resultierende Verhalten für die Tankauswahl über einen Zeitraum von drei Tagen. Die Sude von Sudlinie 2 belegen von Anfang an die 4-sudigen Tanks (ab

Nummer „005“) während Sudlinie 1 zunächst die 3-sudige Tanks (von „013“ bis „016“) auffüllt. Danach werden von beiden Linien 4-sudige Tanks belegt, bis schließlich mangels geeigneterer Alternativen auf 2-sudige Tanks („001“ bis „004“) ausgewichen wird. Schließlich ist das für diesen Anwendungsfall offensichtlich unterdimensionierte Tanklager voll.

In diesem Beispiel wurde als Gruppierungsmerkmal der Name der Sudlinie (als Zeichenfolge) verwendet und die bevorzugte Anzahl von Suden je Gruppe bzw. Tank in einem zweiten Attribut der Charge („Gruppenmenge“) explizit übergeben. Diese wird, wie auch Bild 62 zeigt, nicht in jedem Fall exakt eingehalten, da vorrangig die Tankkapazität möglichst weitgehend ausgelastet werden soll. Die Gruppenstärke in einem Tank wird dagegen genauer eingehalten, wenn die übereinstimmende Gruppenzugehörigkeit als striktes Kriterium gewertet und ein Kennzeichen verwendet wird, das nur für genau so viele Chargen übereinstimmt, wie tatsächlich gruppiert werden sollen. Bei dieser Fahrweise müssen häufiger individuelle Tanks eingesetzt werden, so dass mehr Kopfraum ungenutzt bleibt und ggf. die Lagerkapazität schneller erschöpft ist. Bild 64 stellt die Tankbelegung beim Erreichen des Zustands „Tanklager voll“ für beide Varianten der Gruppierungslogik gegenüber.

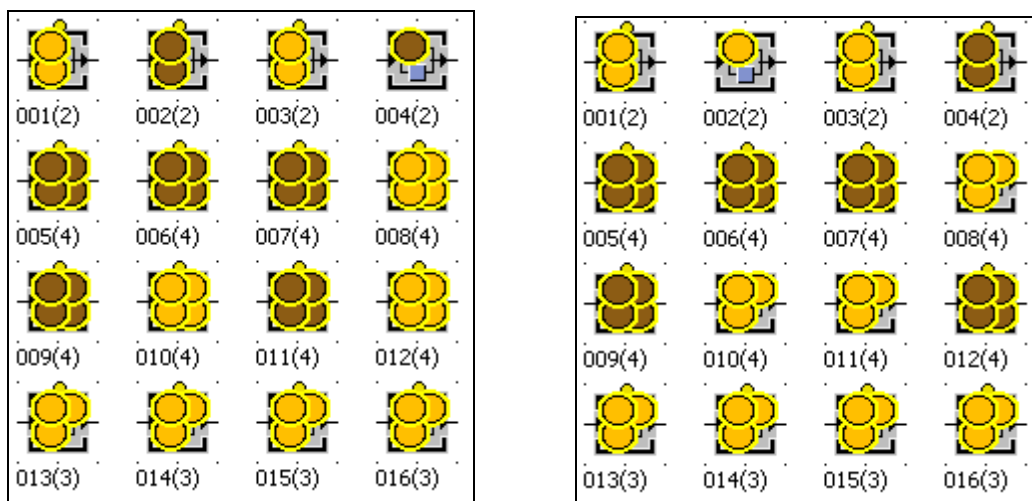


Bild 64: Varianten für die Tanklagerbelegung im Beispiel zum Gruppieren von Chargen bei der Tankauswahl (Das Gruppieren von Chargen aus unterschiedlichen Gruppen in demselben Tank ist links erlaubt, rechts nicht)

### 5.3.3 Ressourcenorientierte Perspektive

Während die ressourcenorientierte Perspektive im Bereich der Würzproduktion typischerweise streng spezialisierte Einheiten entlang einer seriell durchlaufenen Sudlinie unterscheidet, stehen als Ressourcen für die Fermentation fast immer mehrere einzelne Tanks als alternative Ressourcen nebeneinander. Unabhängig von dem für den einzelnen Tank verwendeten Modelkonzept sind daher immer auch übergreifende Funktionen relevant, die der folgende Abschnitt kurz umreißen soll.

### 5.3.3.1 Gemeinsame Strukturen einer Tankgruppe

Eine räumliche oder logische Gruppierung von Tanks kann im Simulationsmodell anhand der hierarchischen Modellstruktur nachgebildet werden, wobei die folgenden Funktionen für die auf der Gruppenebene eingerichtet werden können:

- Gemeinsame *Materialflussschnittstellen* (Zugang, Abgang) sorgen dafür, dass eine Tankgruppe als Ganzes und unabhängig von ihrer internen Struktur mit Vorgängern und Nachfolgern im Modell verknüpft werden kann.
- Die unter 5.3.2 vorgestellten Mechanismen für die *Tankauswahl* und das *Gruppieren von Chargen* sowie die zugehörigen Auswertungsfunktionen und Temporärdaten (Status-Tabelle, Register) dienen der Selbstverwaltung der Gruppe zur Laufzeit der Simulation.
- Prozeduren und Datenstrukturen für die *Autokonfiguration* des Tanklagers, die Tanks innerhalb der Gruppe anhand tabellarischer Angaben automatisch erzeugen, löschen und parametrieren, reduzieren der Aufwand für die Bedienung und Pflege eines Modells, das zahlreiche Tanks umfassen kann, erheblich.
- Die *Belegungshistorie* der Tanks kann auf der Gruppenebene zentral und einheitlich erfasst, protokolliert, statistisch aufbereitet und visualisiert werden.
- Sofern das Modell potenziell limitierende *Hilfsressourcen* (z. B. CIP-Kreisläufe, Personal) enthält, stehen diese auf Gruppenebene platziert allen Tanks der Gruppe zur Verfügung.

Bild 65 zeigt ein Beispiel für die Gestaltung eines Bausteins „Tankgruppe“. Es hat sich bewährt, auf der Gruppenebene ein Netzwerk (hier: „Tanks“) einzurichten, in dem die einzelnen Tanks bzw. Tank-Bausteine manuell oder per Autokonfiguration verwaltet werden. Für den Materialfluss zwischen der Gruppenebene und den Tanks sind keine Kanten erforderlich, da die für die Tankauswahl einzurichtenden Prozeduren die gezielte Weitergabe regeln.

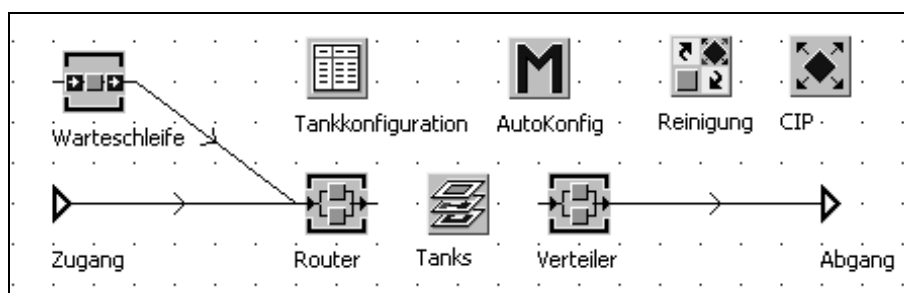


Bild 65: Gemeinsam genutzte Strukturen auf der Ebene einer Tankgruppe (Beispiel)

Im Beispiel erreichen eintreffende Chargen-Objekte den Baustein „Router“, der die Funktionen zur Tankauswahl aufruft und so das Ziel innerhalb des Netzwerks „Tanks“ festlegt. Sofern kein Zieltank verfügbar ist, wird die Charge im Puffer „Warteschleife“ platziert, der eine zeitverzö-

gerte Wiedervorlage beim „Router“ sicherstellt. Dies wird solange zyklisch wiederholt, bis ein geeignetes Ziel frei wird. Abgehende Chargen werden vom jeweiligen Tank aus auf der Parallelstation „Verteiler“ platziert und von dort an den mit der Abgangsschnittstelle verbundenen Materialfluss-Nachfolger der Tankgruppe weitergeleitet. Eine Tabelle „Register“ unterstützt das Gruppieren von Chargen, während die Rangliste für die Tankauswahl in der Tabelle „Tankkonfiguration“ verwaltet wird. Letztere enthält auch die Daten für die Autokonfiguration des Netzwerks „Tanks“ mit der Methode „AutoKonfig“. Über den Broker-Baustein „Reinigung“ und die Kapazität des Exporter-Bausteins „CIP“ kann die zulässige Anzahl gleichzeitiger Reinigungsprozesse begrenzt werden.

### 5.3.3.2 Einfacher ressourcenorientierter Ansatz

Für einen einfachen ressourcenorientierten Modellansatz soll die Dauer von Transfers in und aus Tanks im Verhältnis zu den üblichen Prozessdauern in der Größenordnung von Tagen oder Wochen als vernachlässigbar gelten. Im Modell findet demnach lediglich der Übergang eines Chargen-Objektes zwischen zwei Stationen statt. Prinzipiell spiegelt das ressourcenorientierte Tank-Modell dabei die Phasen des Belegungszyklus aus Bild 7 (S. 22) wider. Falls in einem Tank bis zum Prozessbeginn mehrere Chargen in Intervallen eintreffen, wie dies vor allem bei Gärtanks üblich ist, kann sich die Phase „Zugang“ über einen gewissen Zeitraum erstrecken, obwohl der Transfer selbst im Modell ohne Zeitaufwand erfolgt.

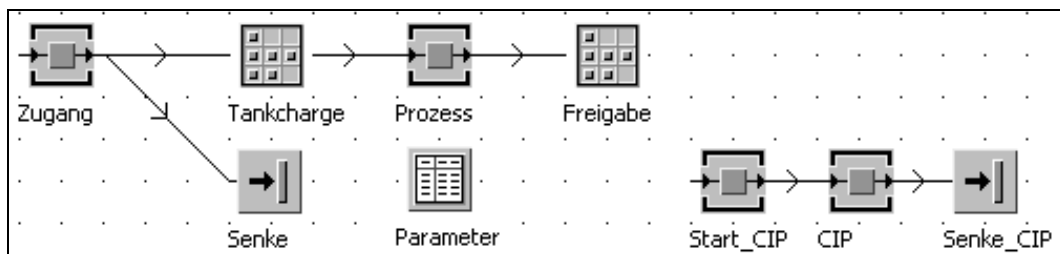


Bild 66: Einfaches ressourcenorientiertes Modell für einen einzelnen Tank

In dem in Bild 66 dargestellten Modell werden ankommende Chargen vom „Router“ der übergeordneten Tankgruppe auf der Station „Zugang“ platziert und von dort sofort weitergeleitet. Die erste in einem leeren Tank eintreffende Charge wird dabei auf den Lagerbaustein „Tankcharge“ umgelagert. Dabei wird ein Ereignis ausgelöst, das mit einer definierten Verzögerungszeit den Übergang zum Baustein „Prozess“ veranlasst. Sofern während dieser Wartezeit weitere zum Tankinhalt kompatible Chargen eintreffen, werden diese, nachdem ihre Menge zur Tankcharge addiert wurde, in der „Senke“ vernichtet. Die Wartezeit wird mit der in der Tabelle „Parameter“ für jede Sorte hinterlegten Prozessdauer verrechnet, sodass als Prozessdauer der Zeitraum zwischen dem Eintreffen der ersten Charge und der Weitergabe der Tankcharge auf den Lagerbaustein „Freigabe“ gilt. Dort steht die Tankcharge gemäß der NIS-Strategie für eine Entnahme zur Verfügung, die durch Ereignisse innerhalb oder außerhalb des Tanks ausgelöst wird und wie



der Zugang entweder total oder in Etappen erfolgt. Sobald der Tank vollständig entleert ist, wird eine Reinigung ausgelöst, indem ein spezielles bewegliches Objekt von Typ „CIP“ auf der Station „Start-CIP“ erzeugt wird. Dieses belegt die Station „CIP“ für eine definierte Zeit, wobei ggf. auch ein Dienst „CIP“ aus dem übergeordneten Netzwerk angefordert werden kann, über den die Verfügbarkeit von CIP-Kreisläufen für eine Gruppe von Tanks begrenzt werden kann. Nach der Reinigung wird das CIP-Objekt vernichtet, worauf der Tank für eine erneute Belegung bereit ist.

Im nachfolgenden Beispiel wurde ausgehend vom Beispiel aus Abschnitt 5.3.2.4 der Gärkeller gemäß Tabelle 14 erweitert, wobei für die Hauptgärung einheitlich eine Dauer von 7 Tagen und ein Steigraumzuschlag von 25 % angenommen wurden.

Tabelle 14: Gärkeller-Konfiguration im Beispiel für den einfachen ressourcenorientierten Ansatz

Anzahl Tanks	Tank-Nummern	Bruttovolumen / Tank	Sude / Tank
9	001, ..., 009	2500 hl	2
18	010, ..., 027	5000 hl	4
9	028, ..., 036	3750 hl	3

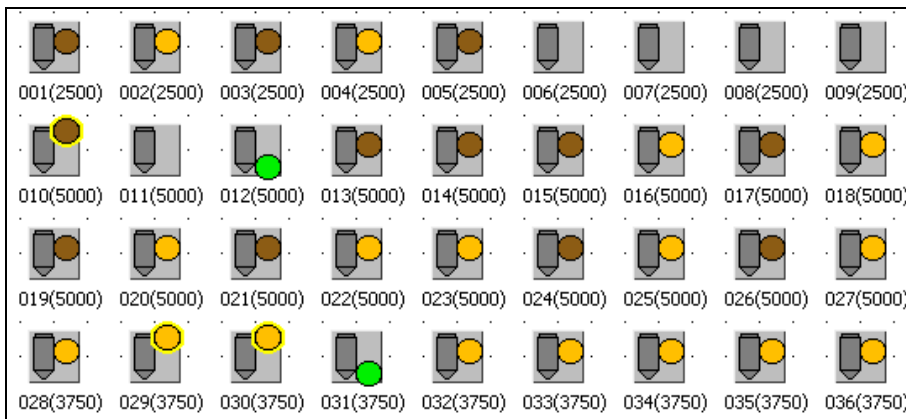


Bild 67: Visualisierung der Tankbelegung für den einfachen ressourcenorientierten Ansatz (braun/gelb: Biersorten, grün: CIP, gelber Ring am Chargen-Objekt: Phase „Zugang“)

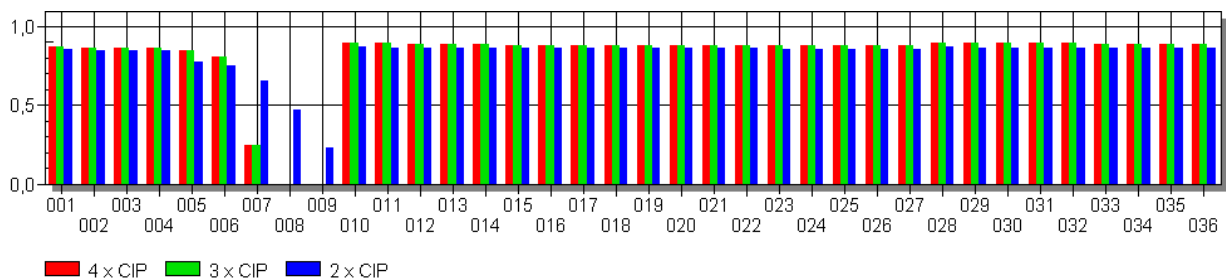


Bild 68: Simulationsergebnis zur Auslastung von Gärtanks abhängig von der Anzahl der CIP-Kreisläufe

Für die Reinigung mit einer Dauer von 6 Stunden wurde zunächst eine quasi unbegrenzte Anzahl von Kreisläufen eingerichtet, um die maximale Belegung der gemeinsamen Ressource bei ungehindertem Zugriff experimentell zu ermitteln. Das empirische Maximum von 4 CIP-Kreisläufen wurde dann stufenweise reduziert, bis mit nur mehr einem Kreislauf die konfigurierten 36 Tanks aufgrund der resultierenden Wartezeiten beim Reinigen nicht mehr ausreichten, um die Würzproduktion verzögerungsfrei aufzunehmen. Wie Bild 68 zeigt, wurden die Tanks „008“ und „009“ in der Simulation nicht benötigt, wenn mindestens 3 CIP-Vorgänge gleichzeitig zulässig waren.

### 5.3.3.3 Erweiterter ressourcenorientierter Ansatz

Während der wesentliche Unterschied zwischen dem einfachen und dem erweiterten ressourcenorientierten Modellansatz für den Bereich der *Würzproduktion* im Grad der strukturellen Emanzipation zwischen Prozess und Anlage besteht, bezieht sich die Abstufung für den Bereich der Fermentation vor allem auf den Stellenwert der Transferprozesse im Modell. Der im vorigen Abschnitt vorgestellte einfache Modellansatz, der diesen Bereich als weitgehend vernachlässigbar betrachtet, wurde dazu um Mechanismen für den Materialtransfer zwischen den Ressourcen erweitert. Diese ermöglichen nicht nur die Weitergabe der gesamten Charge an einen einzelnen Empfänger, sondern auch die Übergabe von mehreren Teilchargen an mehrere Ziele. Dabei wird jede einzelne Transferoperation als eigenständiger diskreter Vorgang ohne innere Dynamik betrachtet, dessen Ablauf in der Simulation weitgehend durch ein Start- und ein Endereignis beschrieben wird. Die Transferdauer ergibt sich aus einer als konstant angenommenen Förderleistung und der zu transferierenden Menge. Daneben stellt das Modell einfache Mechanismen für das regelbasierte Aufteilen des Tankinhalts in Teilmengen und deren sequenzielle Weitergabe an mehrere Nachfolger bereit.

Der grundlegende Ablauf der Transferoperationen orientiert sich an dem Prinzip, das bereits in Zusammenhang mit der erweiterten prozessorientierten Sicht auf die Würzproduktion (vgl. Bild 45, S. 110) vorgestellt wurde. Allerdings kommt der dort beschriebene Ansatz mit einer wesentlich einfacheren Ablaufstruktur aus, da bei der Würzproduktion der Transfer in der Regel unmittelbar nach Abschluss des Prozesses startet und der gesamte Inhalt des Apparats an einen über eine Materialflusskante eindeutig und statisch definierten Nachfolger übergeht.

Ein Beispiel für die Struktur eines erweiterten ressourcenorientierten Modells für einen einzelnen Tank zeigt Bild 69. In der hier verwendeten Konfiguration erfolgt eine automatische Weitergabe des Tankinhalts nach dem Ende des Prozesses (Ereignis „Freigabe“), wobei die Tankcharge in zwei Teilchargen aufgeteilt wird (Baustein „Splitter“ in Verbindung mit den Stationen „x1“ und „x2“). Diese Funktionalität bildet die verbreitete Vorgehensweise des Verschneidens von mehreren ZKGs auf mehrere ZKLs in einem Zweitankverfahren ab, das aus produktionstechnischer Sicht „druckgesteuert“ angetrieben wird. Der Abgang aus einem ZKL wird im Unterschied dazu meist „zuggesteuert“, z. B. durch einen generierten oder explizit hinterlegten Filterplan, reguliert

(vgl. Abschnitt 5.4). Die gleichzeitig erzeugten Teilchargen werden durch den Puffer-Baustein „Abgang“ sequenzialisiert und an unterschiedliche Zieltanks abgegeben, wobei die Bearbeitungszeit für die Stufe „Transfer“ in Abhängigkeit von der Menge der jeweiligen Teilcharge dynamisch parametrisiert wird. Wenn eine Teilcharge auf der Station „Transfer“ eintrifft, wird auf der übergeordneten Ebene, der „Tankgruppe“, eine Kopie des Chargen-Objekts erzeugt und damit die Suche nach einem geeigneten Zieltank angestoßen. Der eigentliche Transferprozess, der durch den Bearbeitungsschritt der Station „Transfer“ repräsentiert wird, startet erst, wenn diese Kopie tatsächlich einen geeigneten Empfänger erreicht und dieser eine positive Rückmeldung an den abgebenden Tank sendet. Nach dem Ablauf der Transferzeit wird das originale Chargen-Objekt in einer Senke vernichtet. Sobald der letzte Transfer den Tank verlassen hat, wird analog zum einfachen ressourcenorientierten Ansatz ein CIP-Vorgang angestoßen, der an die Verfügbarkeit entsprechender Ressourcen gebunden sein kann.

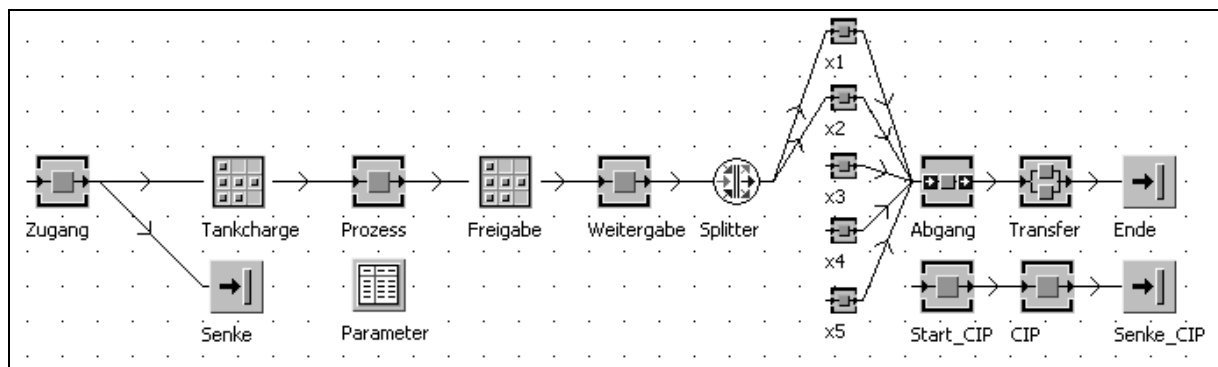


Bild 69: Erweitertes ressourcenorientiertes Modell für einen einzelnen Tank

### 5.3.4 Prozessorientierte Perspektive

Das erweiterte ressourcenorientierte Tankmodell zerlegt zwar Transfers in eine gewisse Anzahl von Ablaufschritten, um den Produktionsfluss im Bereich der Tanklager zu modellieren. Die im jeweiligen Tank ablaufende technologische Verfahrensstufe wird dagegen lediglich durch einen einzigen Ablaufschritt (Baustein „Prozess“) symbolisiert, dessen Dauer konstant oder über Verteilungsfunktionen definiert sein kann. Da die Prozessführung während für die Fermentation neben direkt messbaren Zustandsgrößen in der Regel auch technologische Laborergebnisse einbeziehen muss, ist der Prozessablauf steuerungsseitig meist deutlich weniger strukturiert abgebildet als bei der Würzproduktion. Trotzdem kann man den Prozess im Modell nach unterschiedlichen Gesichtspunkten in diskrete Abschnitte gliedern, die mit den Mitteln der ereignisorientierten Simulation nachvollziehbar sind. Die Gliederung kann sich dabei auf eine schematische Einteilung in sequenzielle Phasen stützen, aber auch ereignisartige Manipulationen (z. B. konkrete Zeitpunkte für die Hefeerreife) einbeziehen. Einen entsprechenden Ansatz verfolgt auch UNTERSTEIN [62], der den CO<sub>2</sub>-Anfall, den Kältebedarf und den Extraktabbau während der Hauptgärung für

ein einzelnes ZKG in Intervallen von 12 Stunden quantifiziert und dieses Schema grafisch für mehrere Tanks überlagert.

In dem in Bild 70 gezeigten Beispiel wird der Fermentationsprozess in drei Abschnitte unterteilt, auf die hier jeweils ein Drittel der gesamten Prozessdauer entfällt. Der mittlere Prozessabschnitt („Prozess02“) beansprucht den Dienst „Kälte“, der analog zur Tankreinigung über eine Kombination von Broker und Exporter auf der übergeordneten Ebene der Tankgruppe verwaltet wird. Über die Statistikfunktionen des Exporters kann überwacht werden, wie viele Tanks im Verlauf der Simulation gleichzeitig gekühlt werden müssen. Entsprechende Ergebnisse zu diesem Beispiel zeigt Bild 71.

Sofern innerhalb des Prozessablaufs keine dynamischen Wechselwirkungen vorgesehen sind, ist ein vergleichbares Ergebnis auch zu erzielen, indem die Zeitpunkte für den Prozessbeginn mit einem ressourcenorientierten Simulationsmodell ermittelt und später *offline* mit einem statischen Rechenschema für den Prozess verknüpft werden. Der Einfluss von Engpässen beim Zugriff auf übergeordnete Ressourcen, etwa einer beschränkten Kühlkapazität für eine Tankgruppe, wird dagegen nur durch Simulation transparent.

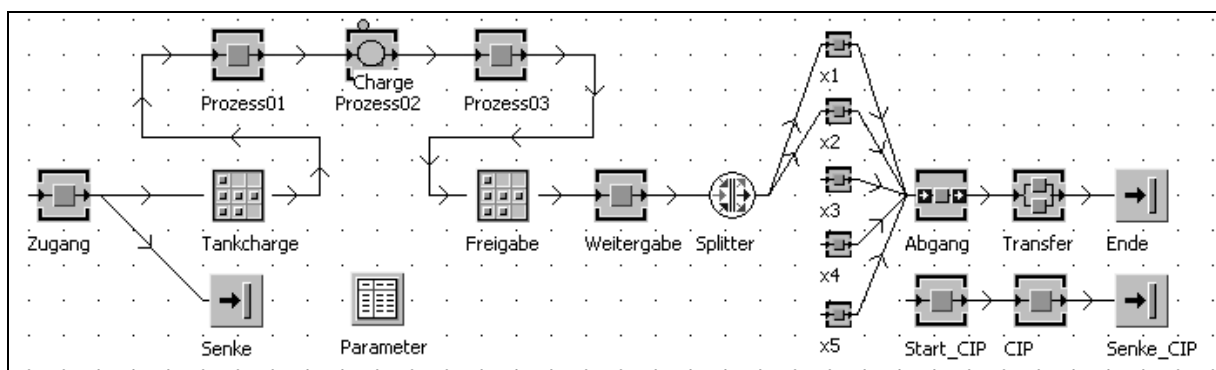


Bild 70: Beispiel für ein prozessorientiertes Modell eines einzelnen Tanks mit drei Prozessabschnitten

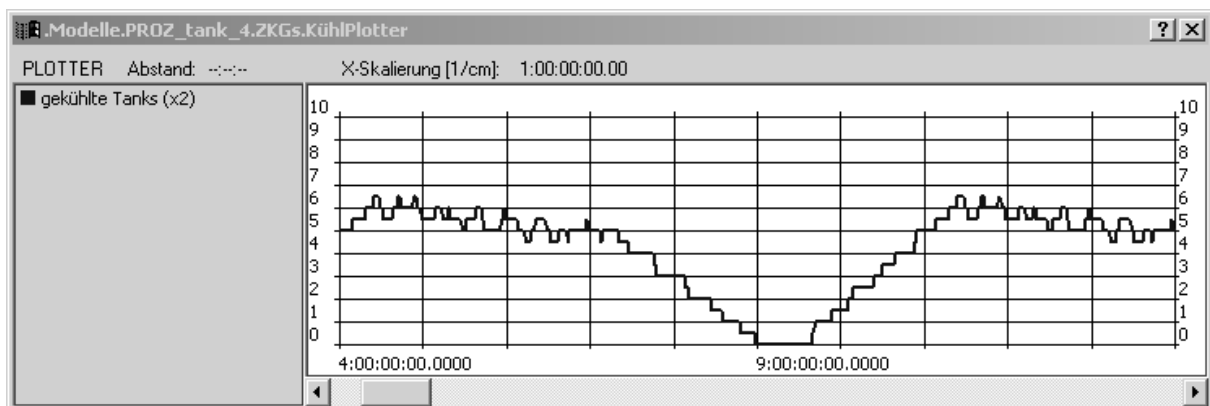


Bild 71: Anzahl gleichzeitig zu kühlender ZKGs (Simulationsergebnis mit einem prozessorientierten Modell)

Analog zum einfachen prozessorientierten Ansatz für die Würzproduktion bietet es sich an, umfangreichere Ablaufstrukturen, die bei Bedarf auch alternative, nebenläufige oder zyklische Passagen enthalten können, in einem unterlagerten Netzwerk anzulegen (vgl. Bild 45, S. 110). Soweit empirische Daten oder explizite Annahmen zur Dauer der Prozessabschnitte existieren, können diese zur Definition von Verteilungsfunktionen für jeden Abschnitt genutzt werden.

Das Hauptproblem beim Modellieren der Prozessabläufe im Bereich der Fermentation besteht insgesamt weniger darin, eine detailliert beschriebene Verfahrensvorschrift möglichst effizient auf den Simulator zu projizieren. Vielmehr soll das Simulationsmodell ausgewählte Aspekte eines komplexen Gesamtablaufs nachbilden, obwohl kaum konkrete Informationen zu dessen innerer Struktur vorliegen. Die in Zusammenhang mit der Würzproduktion als erweiterter prozessorientierter Ansatz beschriebene Strategie, in der Simulation flexible Schrittfolgen durch die Interpretation von rezeptartigen Strukturen zur Laufzeit darzustellen, erscheint vor diesem Hintergrund wenig attraktiv.

### **5.3.5 Auswerten und Visualisieren des Tanklagerbetriebs**

In konventionellen Planungsansätzen dient eine ausführliche grafische Repräsentation der parallelen Zeitabläufe bei der Belegung von Tanks in Form von Gantt-Charts – quasi als „Papier-basierte“ Simulation – als wichtiges Werkzeug dem Erkenntnisgewinn. In Verbindung mit der Computersimulation von Tanklagern kommt dem Gantt-Chart eine weniger bedeutende Rolle zu, da das Ereignisgefüge der Prozessabläufe hier unabhängig von seiner grafischen Darstellung ermittelt werden kann. Während die detaillierte Inspektion des Verlaufs der Tankbelegung beim Validieren eines Modells oder in Zusammenhang mit der operativen Produktionsfeinplanung notwendig oder zumindest vorteilhaft sein kann, geht eine derartige Detailfülle am Informationsbedarf beim Konfigurieren bzw. Dimensionieren eines Tanklagers oder der Kapazitätskontrolle im Zuge der Produktionsplanung vorbei. Gleichzeitig sind Gantt-Charts für größere Anzahlen von Ressourcen, die für Tanklager charakteristisch sind, häufig weder am Bildschirm noch im Druck zufriedenstellend darstellbar. Daher sollen hier verschiedene Formen zur Aufbereitung und Präsentation von verdichteten Ergebnissen aus der Simulation von Tanklagern kurz vorgestellt werden.

#### **5.3.5.1 Belegung eines Tanklagers**

Die quantitative Beschreibung der Belegungssituation in einem Tanklager erfordert zunächst die Definition von Kennzahlen, wobei unterschiedliche Aspekte der Tankbelegung abhängig von der konkreten Aufgabe unterschiedlich zu bewerten sind. Die nachfolgend vorgestellten Definitionen, die in den ressourcenorientierten Modellen verwendet wurden, stellen dabei nur Beispiele aus einer Vielzahl von denkbaren Varianten dar:

### a) Volumenanteil belegter Tanks

Diese Kennzahl setzt das Bruttovolumen aller belegten Tanks in Beziehung zum Bruttovolumen des gesamten Tanklagers. Dabei gilt ein Tank als „belegt“, wenn er sich nicht im Zustand „Bereit“ (leer und gereinigt) befindet. Unabhängig vom tatsächlichen Füllstand gilt dann das gesamte Bruttovolumen des Tanks als belegt. Das Tanklager kann also durchaus noch aufnahmefähig sein, wenn der Volumenanteil der belegten Tanks bereits 100 % beträgt, vorausgesetzt dass für zusätzlich eintreffende Mengen Tanks mit einer kompatiblen Vorbelegung gefunden werden. Der *Volumenanteil belegter Tanks* gibt demnach lediglich Auskunft darüber, über welchen Anteil des Bruttovolumens nicht uneingeschränkt verfügt werden kann.

### b) Ausnutzung des Tankraums

Diese Kennzahl soll bewerten, wie stark die belegten Tanks einer Gruppe mengenmäßig ausgelastet sind. Im Simulationsmodell wird über den gesamten Belegungszyklus jedes Tanks der maximale Füllstand in einer Merker-Variablen gespeichert. Dieser Wert zuzüglich des Steigraumzuschlags für die jeweilige Sorte und Prozessstufe kann als Eigenschaft des Tanks („genutztes Volumen“) abgefragt werden. Der Merker bleibt bis zum Abschluss der Reinigung erhalten, sodass diese entsprechend der maximalen Belegung des Tanks im zurückliegenden Zyklus bewertet wird. Bild 74 illustriert den Zusammenhang am Beispiel eines Tanks, der in drei Etappen befüllt und nach dem Prozess in zwei Schritten geleert und dann gereinigt wird. Die *Ausnutzung des Tankraums* bezieht das *genutzte Volumen* aller Tanks auf das Bruttovolumen des gesamten Tanklagers.

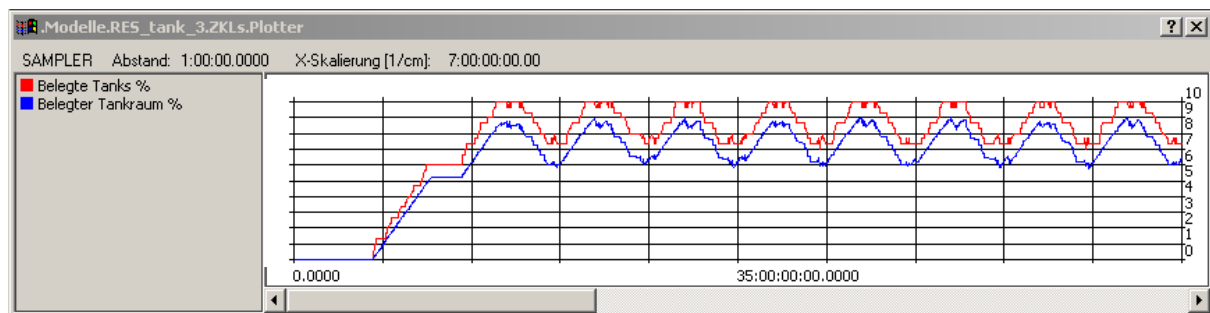


Bild 72: „Volumenanteil der belegten Tanks“ (rot) und „Ausnutzung des Tankraums“ (blau) in der Simulation

Bild 72 zeigt den Verlauf der Kennzahlen zur Tanklagerbelegung im Vergleich über einer gemeinsamen Zeitachse. In Bild 73 sind die periodisch berechneten Größen gegeneinander aufgetragen. In beiden Darstellungen ist der Kontrast zwischen einer anfänglichen Anfahrphase und dem Arbeitsbereich im zyklischen Betrieb erkennbar.

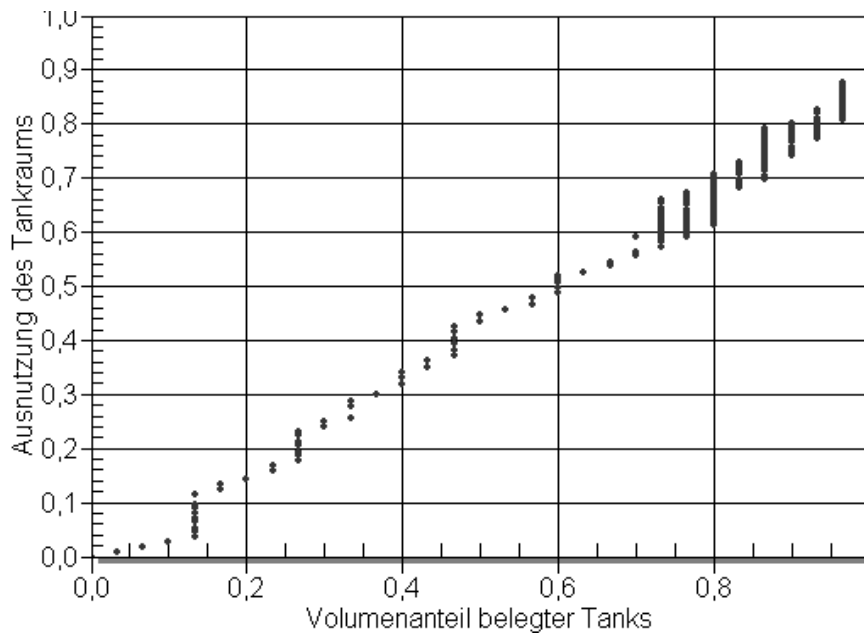


Bild 73: „Ausnutzung des Tankraums“ vs. „Volumenanteil belegter Tanks“

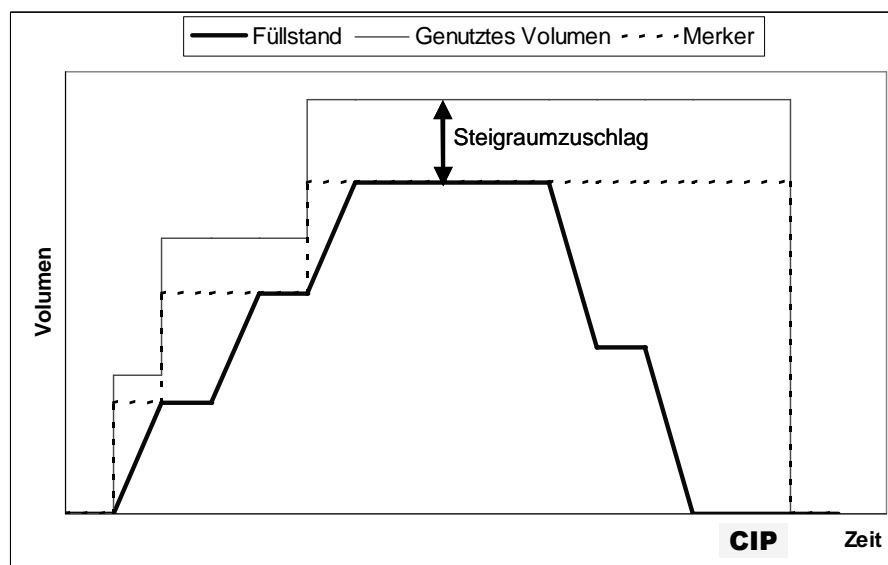


Bild 74: Definition des „genutzten Volumens“ als Basisgröße für die Ausnutzung des Tankraums

### 5.3.5.2 Belegungsstatistik für einzelne Tanks

Im Unterschied zu den im vorigen Abschnitt vorgestellten Kennzahlen, in denen für einzelne Tanks ermittelte Kennzahlen für eine betrachtete Gruppe von Tanks gezielt zusammengefasst werden, verdichtet eine Belegungsstatistik gemäß Bild 75 die Chronologie für jede einzelne Ressource anhand eines Schlüssels aus zu unterscheidenden Zuständen. Für die Tankbelegung werden hier in Anlehnung an Bild 7 die Zustände „Zugang“, „Prozess“, „Freigabe“, „CIP“ und

„Bereit“ unterschieden, wobei der Zustand „Freigabe“ für den Zeitraum vom Abschluss des Prozesses bis zum restlosen Entleeren umfasst und der Zustand „CIP“ neben der eigentlichen Reinigungszeit ggf. auch das Warten auf eine Reinigungsressource einschließt. Dieser Schlüssel kann aufgabenspezifisch frei gestaltet werden, soweit das Simulationsmodell geeignete Ereignisse für den Wechsel zwischen den abzubildenden Zuständen bereitstellt.

Sofern ein Tanklager in der Simulation ohne eine realistische Vorbelegung der Tanks betrieben wird, tritt eine Anfahr- bzw. Einschwingphase auf, die die Aussagekraft der Belegungsstatistik erheblich schmälern kann. Dieser Effekt kann durch das Zurücksetzen der Statistik-Zähler während der Simulation vermieden werden.

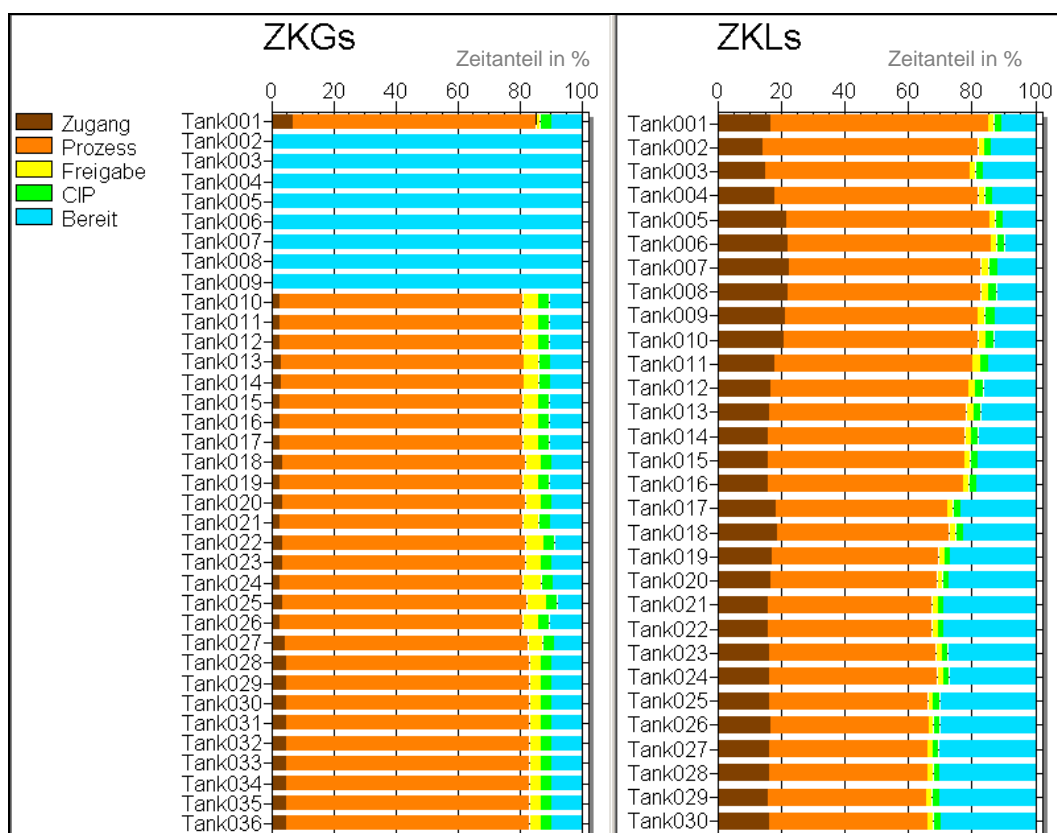


Bild 75: Belegungsstatistiken für zwei Tanklagerbereiche mit ZKGs (links) und ZKLs (rechts)

### 5.3.5.3 Histogramm für die Wartezeit bei Transfers

Die Zwischenprodukte im Bereich der Fermentation sind zwar nicht absolut stabil, aber im Vergleich zur Würzproduktion deutlich weniger sensibel gegenüber Unregelmäßigkeiten im Zeitablauf bei der Verarbeitung. Sofern für eine eintreffende Charge nicht sofort ein geeigneter Ziel-tank gefunden wird, kann deshalb abhängig von den jeweiligen technologischen Rahmenbedingungen eine gewisse Wartezeit toleriert werden. Durch diese Toleranz können Transfer- und Tankkapazitäten schlanker dimensioniert und dafür höher ausgelastet werden. Wird die Bele-



gung eines Tanklagers gegen begrenzte Kapazität simuliert, können die Wartezeiten aller verarbeiteten Chargen anhand eines Histogramms überwacht werden. Das Diagramm informiert bei geeigneter Klassierung in kompakter Form über die Spannweite und die Verteilung der beobachteten Verzögerungszeiten für die gesamte Tankgruppe. Bild 76 zeigt zwei Beispiele für den Transfer zwischen ZKGs und ZKLs in einem Zweitankverfahren. Hier wurde die Anzahl der im Bereich „ZKLs“ verfügbaren CIP-Kreisläufe variiert, von der die Verfügbarkeit der Lagertanks indirekt abhängt. Bei doppelter Reinigungs-Kapazität (unteres Diagramm) muss deutlich seltener und kürzer auf Lagertanks gewartet werden.

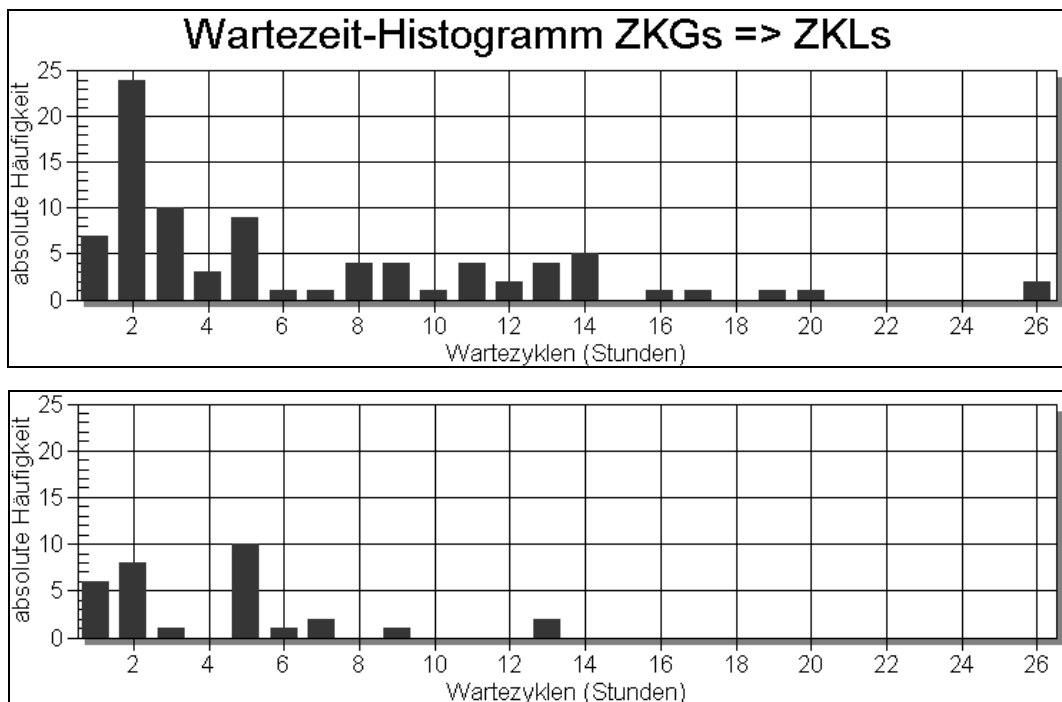


Bild 76: Histogramme für die Wartezeit für den Transfer vom ZKG zum ZKL mit einfach (oben) und doppelt (unten) ausgeführtem CIP-Kreislauf

## 5.4 Simulation der Filtration

Da die Filtration einen kontinuierlichen Materialaustausch mit vor- und nachgelagerten Stufen impliziert, ist es problematisch, diesen Bereich vollständig isoliert zu betrachten. Dies betrifft auch die Wahl der Perspektive für die Modellierung. Es ist zwar technisch durchaus möglich die Bereiche Lagerkeller, Filtration, Drucktanks und Abfüllung unterschiedlich detailliert abzubilden. Allerdings kann dabei aufgrund der engen Verflechtung der Produktionsabläufe der Bereich mit der geringsten Detaillierung die Aussagekraft des Gesamtmodells stark beeinträchtigen. Ebenfalls ist es begrenzt sinnvoll, im Modell der Filtration komplexe Strukturen für eine möglichst realitätsnahe Disposition und Abwicklung von individuellen Filteraufträgen zu verwenden,

wenn dadurch z. B. lediglich der Durchsatz für den Abgang aus einem kapazitätsorientiert modellierten Lagerkeller limitiert werden soll.

Während die Bierherstellung bis zur Freigabe einer Charge im Lagertank für die Filtration weitgehend druckgesteuert abläuft (vgl. 3.4.2.1, S. 45), hängt die Entnahme von Bier aus dem Lagerkeller meist mehr oder weniger direkt mit einer Zug-Wirkung seitens der Abfüllung zusammen. In der Simulation kann die Filtration prinzipiell durch Produktions-Druck (Bestandsentwicklung oder konkretes Freigabeereignis für eine Charge im Lagerkeller), Produktions-Zug (Filtratbedarf laut Abfüllplan bzw. Ist-Bestandsunterschreitung für Drucktankbier) oder einen explizit und vorab definierten Filterplan angetrieben werden. Diese Mechanismen können abhängig vom Einsatzzweck der Simulation und dem Umfang des jeweiligen Modells alternativ oder auch in Kombination eingesetzt werden.

Sofern die Filtration gegen begrenzte Drucktankkapazität simuliert werden soll, müssen im Modell auch ausreichend konkrete Informationen zum Betrieb der Abfülllinien verarbeitet bzw. generiert werden können, sodass belegte Drucktankkapazitäten oder -ressourcen auch wieder entlastet werden. Kurze – und damit realistische – Verweilzeiten im Drucktank erfordern dabei eine enge Koordination zwischen Filtrations- und Abfüllbetrieb, für die in der Praxis vielfältige und häufig komplexe Nebenbedingungen in und zwischen den betroffenen Produktionsbereichen zu berücksichtigen sind. Besonders wenn im Zuge der Simulation Grenzlast-Situationen für mindestens einen der Bereiche zu erwarten sind, müssen sämtliche potenziell kritischen Faktoren adäquat repräsentiert sein. Sofern durch eine regel- oder materialflussbasierte Kopplung zwischen Filtration und Abfüllung im Modell keine geeignete Annäherung an die Realität zu erzielen ist, erfordert jedes simulierte Szenario eine individuelle, detaillierte Disposition durch einen menschlichen Planer oder ein entsprechend leistungsfähiges Optimierungswerkzeug. Diese Problematik sollte durch einen unnötig hohen Detaillierungsgrad nicht zusätzlich verschärft werden.

#### **5.4.1 Kapazitätsorientierte Perspektive**

Aus kapazitätsorientierter Sicht muss das Modell für eine Filtrationsabteilung vor allem die begrenzte Verfügbarkeit von Filterleistung korrekt abbilden. Diese hängt für eine einzelne Filterlinie vor allem vom ggf. sortenspezifischen mittleren Durchsatz und der Betriebszeit ab, die ausgehend von der kontinuierlichen Kalenderzeit durch ein Schichtmodell oder andere planmäßige Stillstandszeiten (zum Rüsten, Reinigen) begrenzt wird. Außerdem können Vor- und Nachlaufzeiten notwendig sein, während denen der Filter prinzipiell in Betrieb ist, aber kein direkt verwendbares Produkt abgibt. Die entsprechende Minderleistung sollte in einem einfachen kapazitätsorientierten Modell pauschal als niedrigere Filterleistung oder über einen Skalierungsfaktor ähnlich einem Wirkungsgrad berücksichtigt werden. Auch wenn detailliertere Angaben oder Annahmen vorliegen, etwa in Form einer Matrix mit expliziten Rüst- oder Wechselzeiten für alle kombinatorisch möglichen oder zulässigen Produktwechsel, setzt deren Einsatz im Modell vor-

aus, dass die abgebildeten Filterlinien detailliert beplant werden. Ein realitätsnahes Scheduling für die Filtration bedingt eine Vielzahl von Detailentscheidungen, die auch im Modell automatisch oder manuell zu treffen sind. Dazu müssen u. a. Lose gebildet und mit Rücksicht auf Reihenfolgerestriktionen oder -präferenzen auf einer bestimmten Filterlinie eingeplant werden. Sofern diese Entscheidungen, die im Idealfall nicht sequenziell für jedes einzelne Los, sondern für mehrere Chargen in einem gewissen Planungshorizont simultan zu treffen sind, im Modell nicht durch einfache, auf den betrachteten Spezialfall abgestimmte Mechanismen automatisiert werden können, werden rein kapazitätsorientierte Fragestellungen den erheblichen Aufwand für eine automatische Optimierung oder die manuelle Disposition für jedes simulierte Szenario nur selten rechtfertigen.

Der kapazitätsorientierte Modellansatz bildet eine komplette Filterlinie als Bearbeitungsstation ab, die eintreffende Chargen-Objekte sequenziell verarbeitet. Die Bearbeitungszeit berücksichtigt dabei die für die Charge angegebene Menge und eine Leistungsangabe im Attribut „Durchsatz“ des Filter-Bausteins. Im Mehrproduktbetrieb mit sortenspezifischer Leistung kann dieses Attribut als Tabelle definiert sein. Gleiches gilt für eine eventuell anzuwendende Rüstzeit, die mit den Grundfunktionen der Bearbeitungsstation realisiert werden kann. Allerdings ist dabei zu bedenken, dass in einem Modell ohne Vorkehrungen für eine systematische Reihenfolgebildung Produktwechsel unrealistisch häufig auftreten können.

Die planmäßige Verfügbarkeit der Filterlinie kann mit einem Grundbaustein vom Typ „Schichtkalender“ bequem verwaltet werden. Die begrenzte Standzeit eines Filters, die nach einer gewissen Betriebsdauer des Filters eine Regeneration erfordert, kann im Modell vereinfacht als Standard-Störverhalten des Filter-Bausteins (betriebszeitabhängige periodische Störung von konstanter Dauer) abgebildet werden.

Die kapazitätsorientierte Sicht soll grundsätzlich nicht berücksichtigen, dass eine Charge während der Filtration neben der Filterlinie auch Kapazitäten bzw. Ressourcen im Vorgänger- und Nachfolgebereich belegt. Im vereinfachten Modell wird für die Filtrationsdauer tatsächlich nur der Filter belegt, der die Charge komplett aufnimmt und erst nach Abschluss der Filtration weitergibt. Diese Ungenauigkeit fällt umso weniger ins Gewicht, je kleiner die Chargen sind, die dem Filter zugeführt werden. Entsprechend kann eine größere Auftragsmenge z. B. beim Transfer aus dem Tank gezielt in kleinere „Pakete“ zerlegt werden, um die Realitätstreue des Modells zu steigern. Sind die Lager- und Puffertankbereiche – soweit im Modell überhaupt vorhanden – ebenfalls kapazitätsorientiert abgebildet, so wird der Effekt dieser Vereinfachung gegenüber den Unschärfen durch den Verzicht auf das Modellieren einzelner Tanks kaum ins Gewicht fallen. Sofern dagegen im Umfeld des Filtrationsmodells individuelle Tanks als Ressourcen modelliert sind, ist die Filtration bei entsprechend höheren Anforderungen an die Präzision des Gesamtmodells mit geeigneten Synchronisationsmechanismen auszustatten, die hier der ressourcenorientierten Sicht zugerechnet werden.

Bild 77 zeigt eine Variante des kapazitätsorientierten Beispielmodells aus Abschnitt 5.3.1 (S. 117), das um drei Filterlinien erweitert wurde. Zunächst wird die Produktion ausgehend vom Lagerkeller in zwei Teilströme geteilt, wobei zehn Prozent der aus dem Lagerkeller abgehenden Chargen als „Fassbier“ klassifiziert und ausschließlich über den „Filter 3“ gefahren werden sollen. Der Übergang zwischen dem ebenfalls kapazitätsorientiert modellierten Lagerkeller und dem Filter erfolgt dabei ohne Zeitaufwand durch das *Umlagern* der Charge, sodass die Kapazität im Lagerkeller bereits bei Filtrationsbeginn entlastet wird. Die Drucktankabteilung ist hier lediglich als „Senke“ abgebildet, da im Beispiel von dieser Seite keine Restriktionen vorliegen sollen.

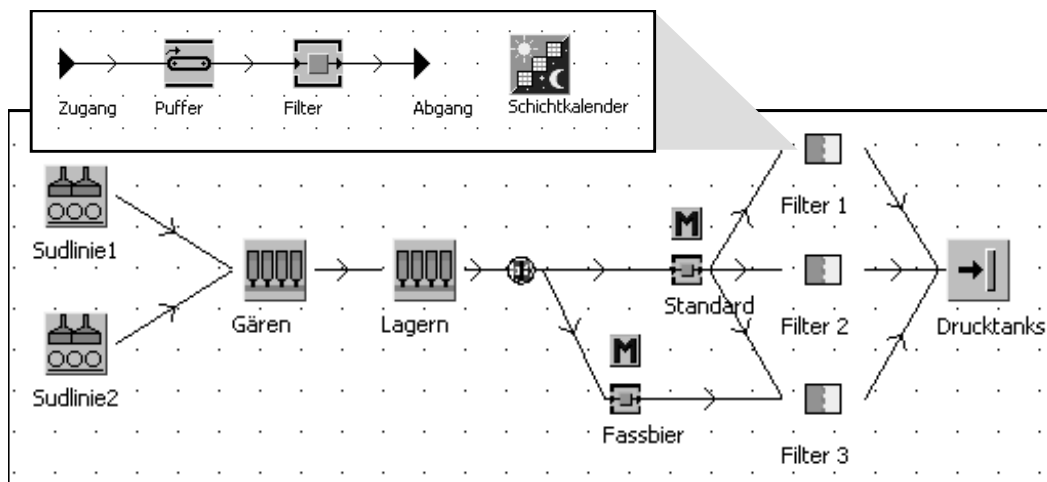


Bild 77: Einfacher kapazitätsorientierter Modellansatz für die Filtration

Innerhalb des Bausteins „Filter“ fungiert ein staufähiger „Puffer“ als Warteschlange für die Filterlinie, in der auf Materialflussebene ein Arbeitsvorrat für den Filter angestaut und während der Betriebszeit des Filters nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet wird. Ein für diesen Zweck angelegter Verriegelungsmechanismus überprüft bei Schichtbeginn den Auftragsbestand im Puffer und gibt den Ausgang des Puffers nur dann frei, wenn eine gewisse minimale Laufzeit für den Filter – z. B. 70 % einer Schicht – sichergestellt ist. Dabei ist zu beachten, dass diesem Puffer keine reale Speicherkapazität gegenübersteht, obwohl im Modell das „Filter“-Netzwerk ankommende Chargen-Objekte sofort aufnimmt und den Vorgänger-Bereich der „Lagerung“ dadurch unmittelbar entlastet, während ein realer Lagertank mindestens bis zum Ende der Filtration belegt bleibt. Längere Aufenthalte der Chargen in diesem Auftragspuffer, z. B. bedingt durch Produktionsunterbrechungen am Wochenende, können dabei die Aussagekraft des Modells für eine quantitative Kapazitätsbetrachtung einschränken. Die Relevanz dieser Ungenauigkeit ist angesichts anderer Vereinfachungen der kapazitätsorientierten Perspektive für die Lager- und Drucktanks im Einzelfall abzuwägen. Ein detailliertes Modellkonzept wird unter 5.4.3.1 als ressourcenorientierte Sicht beschrieben.

Tabelle 15: Parameter der Filter im kapazitätsorientierten Beispielmodell

	Filter 1					Filter 2					Filter 3				
<b>Leistung</b>	600 hl/h					600 hl/h					400 hl/h				
<b>Schichten pro Tag</b> 8 h pro Schicht	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Mo	Di	Mi	Do	Fr
	2	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
<b>Wochenstunden</b>	104 h/wk					72 h/wk					40 h/wk				
<b>Standzeit</b>	6 h					6 h					5 h				
<b>Regenerationszeit</b>	1 h					1 h					1 h				
<b>Produktgruppen</b>	Standard					Standard					Standard / Fass				

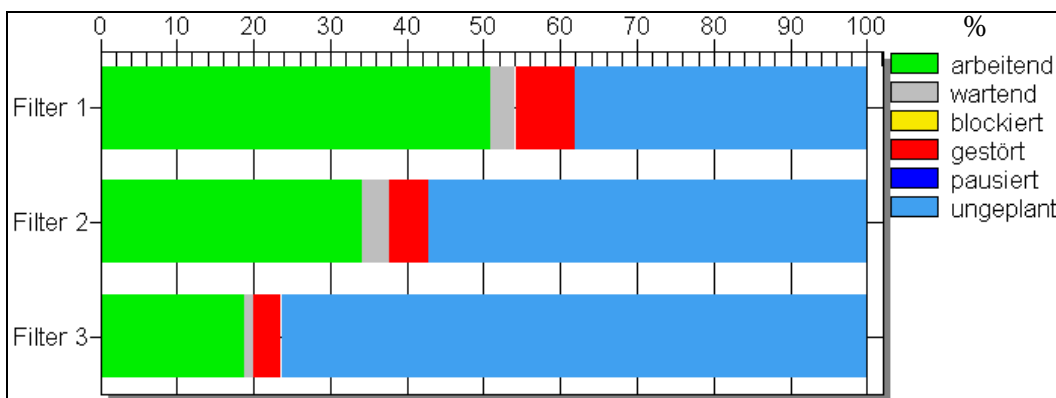


Bild 78: Belegungsstatistik für drei Filterlinien im kapazitätsorientierten Beispielmodell

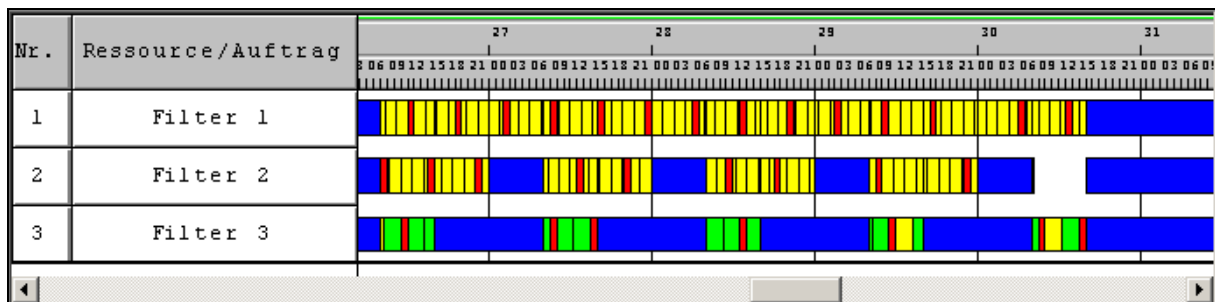


Bild 79: Gantt-Chart für die Belegung von drei Filterlinien in einem kapazitätsorientierten Modell (gelb: Standard-Produkt, grün: Fassbier, rot: Regeneration, blau: ungeplante Zeit)

Tabelle 15 fasst die Parameter zusammen, mit denen die folgenden exemplarischen Simulationsergebnisse erzeugt wurden. Die Belegungsstatistik für die drei Filter in Bild 78 zeigt die Zeitanteile für unterschiedliche Status des Filter-Bausteins, die mit Standardfunktionen von *eMPlant* erfasst wurden. Dabei leitet sich der Anteil für den Status „ungeplant“ direkt aus dem jeweiligen Schichtmodell ab, während die Verteilung zwischen den übrigen Zuständen vom dynamischen Verlauf der Simulation abhängt. Der Anteil für den Status „gestört“ geht ausschließlich auf die

als Störung modellierten Regenerationszeiten des Filters zurück, da für die Filterlinie hier kein sonstiges Störverhalten angenommen wurde. Die Zustände „arbeitend“ und „wartend“ spiegeln die unterschiedliche Auslastung der jeweiligen Filterlinie wider.

Bild 79 zeigt einen Ausschnitt aus dem Gantt-Chart für die simulierte Belegung der drei Filterlinien für eine Produktionswoche von 5 Tagen. Obwohl laut Schichtplan für den „Filter 2“ auch am letzten Tag der Woche Produktion vorgesehen wäre, findet hier keine Filtration statt, da der Auftragspuffer nicht ausreichend gefüllt ist, um den Betrieb der Linie zu rechtfertigen. Soweit dieser überhaupt Filtrationsaufträge bzw. Chargen-Objekte enthält, werden diese frühestens zu Beginn der nachfolgenden Woche ausgeführt. Das Diagramm veranschaulicht außerdem, dass Fassbier (grüne Balken) exklusiv über Filter 3 gefahren wird und nur die verbleibende Kapazität dieser Linie für Standard-Produkte (gelbe Balken) genutzt wird.

Die im Beispiel verwendeten einfachen, weil materialflussnahen, Mechanismen für die Filterbelegung können dabei weder eine optimale Reihenfolge hinsichtlich der Produktwechsel gewährleisten noch die genaue Position der Regenerationszeiten (rote Balken) im Plan wirklich realistisch bestimmen. Dies ist aber vor allem als prinzipielle Diskrepanz zwischen dem zwangsläufig hohen visuellen Auflösungsgrad eines Gantt-Charts und dem eher pauschalen Charakter des kapazitätsorientierten Ansatzes zu sehen. Hier wurde unterstellt, dass die statistischen Kennzahlen (vgl. Bild 78) nicht wesentlich von der exakten Abfolge der Belegungszustände bzw. Produktionschargen abhängen. Die Nützlichkeit eines kapazitätsorientierten Modells leitet sich letztlich weniger von der absoluten Detailtreue der simulierten Abläufe ab, als von einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Modellierungsaufwand und Prognosequalität.

### 5.4.2 Ressourcenorientierte Perspektive

Da der Prozess der Filtration prinzipiell „im Strom“, also ohne nennenswerte Speicherung von Produkt in der Filterlinie, abläuft, sind alle direkt beteiligten Ressourcen (Filterstufen, Kühler, Leitungswege, usw.) im Modell generell synchron zu belegen. Auch wenn an der Peripherie einer Filterlinie Puffertanks zur Kompensation von Druck- und Durchsatzschwankungen üblich sind, werden diese meist so gering dimensioniert, dass kein relevanter Einfluss auf die Zeitabläufe bei der Filterbelegung besteht. Es ist daher nur dann sinnvoll die Ressourcenstruktur innerhalb bzw. im Umfeld von Filterlinien detaillierter aufzulösen, wenn der Zugriff auf die einzelnen Ressourcen nicht direkt und zwangsläufig mit der Belegung der Filterlinie gekoppelt ist. Dies ist in den folgenden Fällen gegeben:

1. Eine Ressource wird nicht obligatorisch bzw. nur unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. Produkt, Produktgruppe, Produktwechsel, Tanklagerbereich, usw.) belegt.
  - Beispiel: Für ausgewählte Produkte soll das Bier auf dem Weg vom Lagertank zum Filter zur Vorklärung über einen Separator gefahren werden.

2. Eine Ressource steht prinzipiell mehreren Filterlinien zur Verfügung, wobei die Anzahl der gleichzeitigen Zugriffe begrenzt ist.
  - Beispiel: Für den Zugang zu einer Gruppe von zehn Drucktanks stehen nur zwei Leitungswege zur Verfügung.
3. Für mindestens zwei Komponenten innerhalb derselben Filterlinie sollen individuelle Einschränkungen für die Verfügbarkeit explizit abgebildet werden.
  - Beispiel: Innerhalb einer Filterlinie werden zwei Filterstufen mit unterschiedlicher Standzeit eingesetzt, deren Regeneration jeweils einen Stillstand der gesamten Linie erfordert.
4. Eine Ressource wird nicht oder nicht nur synchron zur eigentlichen Filtration, sondern nur zu bestimmten (Neben-)Zeiten belegt.
  - Beispiel: Das Reinigen bzw. Regenerieren einer Filterlinie nach Ablauf der Standzeit des Filters erfordert den Einsatz von Personal, das nur in begrenztem Umfang zur Verfügung steht.

Den hier aufgeführten Szenarien ist gemeinsam, dass neben dem wesentlichen Prozessschritt der Filtration, der die Filterlinie als Ganzes betrifft, zusätzliche Restriktionen zu beachten sind, die den Zeitablauf der Filtration beeinflussen können. Ausgehend von dem für die kapazitätsorientierte Sicht verwendeten Ansatz, der die Filtration als diskreten Einzelschritt mit dynamisch bestimmter Dauer abbildet, können derartige Restriktionen unter eMPlant durch Dienste modelliert werden. Diese sind mit begrenzter Kapazität für beliebige Empfänger verfügbar (Fall 2) und können ein individuelles Störverhalten aufweisen (Fall 3). Der Zugriff auf Dienste wird prinzipiell durch den Materialfluss, also die Bewegung von Chargen-Objekten, gesteuert, wobei Art und Umfang der Dienstanforderung zur Laufzeit dynamisch angepasst werden können, um fakultative bzw. situationsabhängige Zugriffe (Fall 1) darzustellen. Soweit zyklisch auftretende Nebenzeiten der Filterlinie (Fall 4) analog zum kapazitätsorientierten Beispielmodell als Störungen modelliert sind, verfügt eMPlant über besondere Dienste zum „Entstören“.

In Zusammenhang mit den vielfältig formulierbaren Restriktionen im Umfeld der Filtration ist zu bedenken, dass die ereignisorientierte Simulation deren Einhaltung zwar überprüft, sodass im akuten Engpassfall Verzögerungen des Produktionsablaufs auftreten. Eine „vorbedachte Deeskalation“ zum Vermeiden drohender Engpasssituationen wird dadurch aber nicht automatisch gewährleistet, da dies eine systematische und intelligente Belegungsplanung erfordern würde. Es kann daher in der Praxis sinnvoll sein, die absoluten Kapazitätsgrenzen zuzüglich einer gewissen Toleranz zu definieren, und dabei zu unterstellen, dass gelegentliche Lastspitzen in der Realität entweder durch kurzfristige Feindisposition oder vorausschauendes Planen vermieden werden könnten.

Unabhängig von spezifischen Szenarien sollte ein ressourcenorientiertes Modell den Zeitablauf beim Materialtransfer von einem Lagertank über eine Filterlinie bis zum Puffertank möglichst realistisch abbilden. Während bei dem im vorigen Abschnitt beschriebenen kapazitätsorientierten Ansatz das Chargen-Objekt für die Dauer der Filtration lediglich die Filterlinie belegt, sollen dabei explizit modellierte Lager- und Drucktanks während der gesamten Filtrationsdauer belegt bleiben. Damit sich Verzögerungen im Verlauf der Filtration – z. B. bedingt durch das periodische Regenerieren der Filterlinie – auch auf die Belegungsdauer von Quell- und Zieltank auswirken, ist eine beiderseitige Synchronisation erforderlich. Bild 80 zeigt ein Ablaufschema für die Kommunikation zwischen den Ressourcen, die im Modell ausgehend vom kapazitätsorientierten Beispiel materialflussnah umgesetzt wurde.

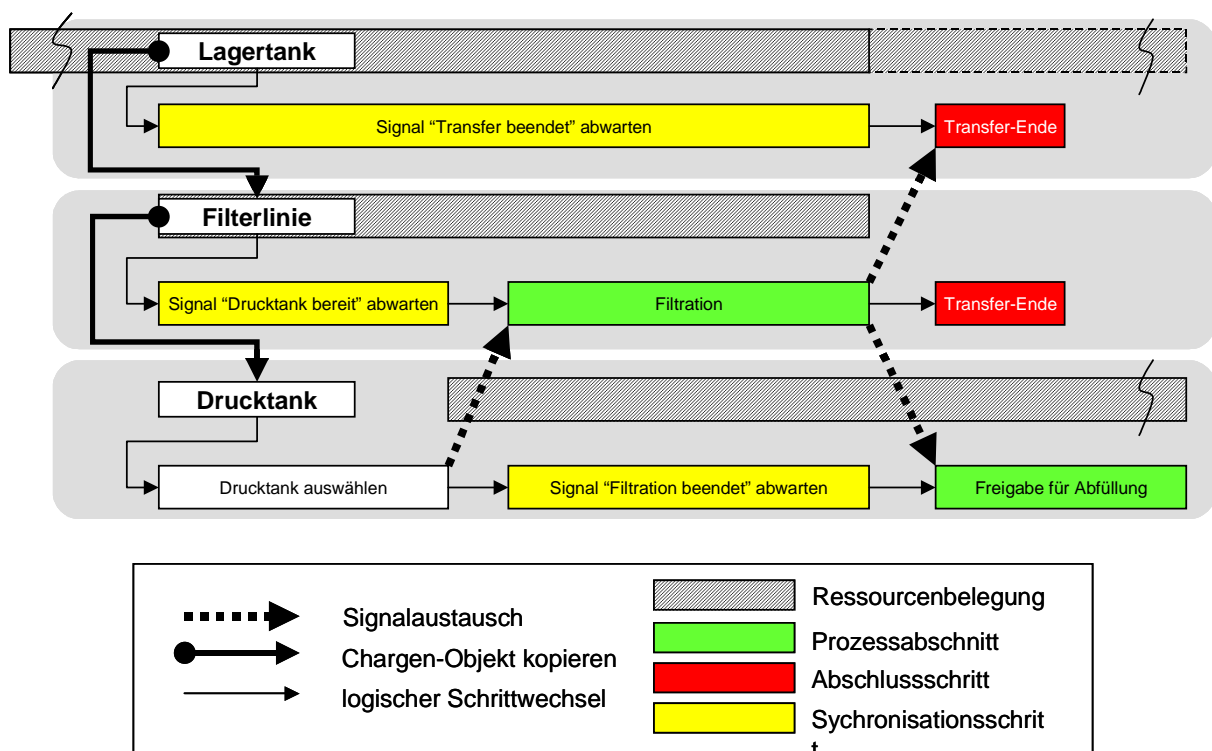


Bild 80: Ablaufschema für den Synchronisationsmechanismus für die Filtration bei ressourcenorientierter Sicht

Der Filtrationsprozess wird hier vom Lagertank aus initiiert, der die Kopie eines zum Transfer freigegebenen Chargen-Objekts an die nachfolgende Filterlinie übergibt. Ab diesem Zeitpunkt wartet der Lagertank auf die Vollzugsmeldung für den Materialtransfer. Die eigentliche Filtration wird ggf. erst mit einiger Verzögerung gestartet, z. B. wenn wie im kapazitätsorientierten Beispiel ein gewisser Arbeitsvorrat für den Filter angestaut werden soll (in Bild 80 *nicht* dargestellt).

Wenn die Filtration beginnen soll, erstellt die Filterlinie eine weitere Kopie des Chargen-Objektes und übergibt diese an den nachfolgenden Drucktank-Bereich, wo ein geeigneter Zieltank



gesucht wird. Da die unmittelbare Verfügbarkeit eines geeigneten Zieltanks nicht vorausgesetzt werden kann, erwartet der Filter eine positive Rückmeldung, die ein empfangsbereiter Drucktank beim Zugang eines Chargen-Objektes auslöst. Ab diesem Zeitpunkt wartet auch der Drucktank auf die Vollzugsmeldung für den Materialtransfer vom Filter. Sobald sich ein empfangsbereiter Drucktank bei der Filterlinie „gemeldet“ hat, wird der dort für den Prozessabschnitt „Filtration“ angelegte Ablauf gestartet, der mit einer Vollzugsmeldung an Lager- und Drucktank endet. Abschließend werden die Chargen-Objekte in Lagertank und Filter – ggf. nach dem Auslösen von Reinigungsabläufen – vernichtet, sodass nur die Kopie im Drucktank weiter existiert. Der Drucktankinhalt kann dann ggf. mit einer Verzögerungszeit, die ggf. auch das Sammeln weiterer Chargen derselben Sorte in diesem Tank ermöglicht, für die Abfüllung freigegeben werden. Sofern aus dem Lagertank nur eine Teilcharge für die Filtration entnommen wurde, bleibt dieser weiter belegt.

Ressourcenorientierte Modellkomponenten für Filterlinien und Drucktanks wurden durch Modifikation der im vorigen Abschnitt vorgestellten Strukturen dargestellt und analog zu diesen verwendet. Die dort vorgestellten Auswertungsmethoden sind unverändert einsetzbar, sodass sich ein eigenes Demonstrationsbeispiel hier erübrigt.

### **5.4.3 Prozessorientierte Perspektive**

Der kapazitätsorientierte und der ressourcenorientierte Ansatz reduzieren den prinzipiell kontinuierlichen Prozess der Filtration einer Charge auf einen diskreten Einzelschritt, dessen Dauer vor allem von der Chargenmenge und einer für die Filterlinie und ggf. der für die jeweilige Sorte definierten mittleren Durchsatzleistung abhängt. Anders als bei Würzproduktion und Fermentation bieten sich entlang der Filtration einer Charge kaum Ansatzpunkte für eine Verfeinerung des Prozessmodells durch ein Aufgliedern in Prozessschritte. Die nachfolgend vorgestellten Ansätze geben dem kontinuierlichen Charakter der im Durchfluss ablaufenden Filtration innerhalb der diskreten Modellierung mehr Gewicht.

#### **5.4.3.1 Einfacher prozessorientierter Ansatz**

Ein sehr einfacher prozessorientierter Ansatz kann ausgehend von dem im vorigen Abschnitt erörterten ressourcenorientierten Modell dargestellt werden, indem die zentrale Prozessstufe der Filtration (vgl. Bild 80) durch einen Baustein vom Typ „Förderstrecke“ abgebildet wird, der einen kontinuierlichen linearen Transport von beweglichen Objekten mit definierter Geschwindigkeit vorsieht. Damit die Transportgeschwindigkeit möglichst unmittelbar mit der Durchflussleistung des Filters korrespondiert, wird die Länge der Förderstrecke beim Eintreffen einer Charge entsprechend der zu filtrierenden Menge individuell gesetzt. Die Position eines Chargen-Objektes entlang der Förderstrecke entspricht damit dem Prozessfortschritt der Filtration. Für das in Bild 81 gezeigte Filtermodell stellt eine mit entsprechenden Methoden ausgestattete vorgeschaltete Einzelstation („FilterStart“) sicher, dass eintreffende Chargen die Förderstrecke „Filter“ nur

exklusiv belegen können, sodass das ebenfalls definierbare Puffer- bzw. Stauverhalten des Bausteins hier keine Rolle spielt. Dagegen erweitern folgende Merkmale der Förderstrecke die Möglichkeiten für eine realitätsnahe Gestaltung des Filtrationsablaufs wesentlich:

- Die Transportgeschwindigkeit kann dynamisch verändert werden, auch wenn die Förderstrecke bereits belegt ist. Ein laufender Filtrationsprozess kann im Modell also nicht nur durch Staus oder Störungen unterbrochen, sondern abhängig von externen Ereignissen auch direkt in der Leistung reguliert werden. Dabei kann sogar eine konstante Rate für das Beschleunigen und Abbremsen angegeben werden.
- Entlang der Förderstrecke können sogenannte Sensoren positioniert werden, die beim Passieren eines beweglichen Elements, also wenn die Filtercharge einen bestimmten Abarbeitungsgrad erreicht hat, Ereignisse auslösen bzw. benutzerdefinierte Methoden aufrufen.
- Der Prozessfortschritt kann entlang der Förderstrecke durch eine endliche Anzahl von Animationsschritten visualisiert werden. Die Positionsangabe kann außerdem durch Methoden abgerufen werden, z. B. um die Koordination des Filters mit anderen Ressourcen zu verbessern oder eine benutzerdefinierte Strategie zur Lastverteilung zu realisieren.

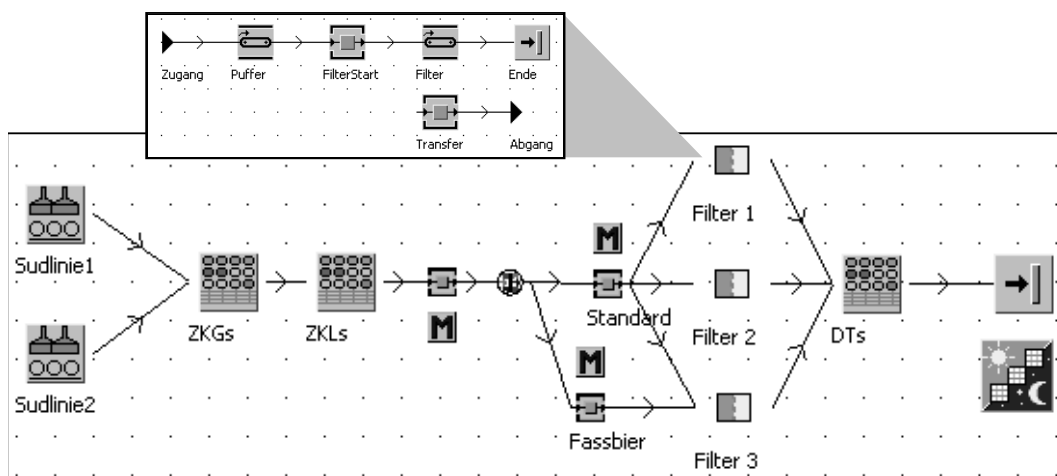


Bild 81: Einfacher prozessorientierter Modellansatz für die Filtration

Angesichts dieser Detaillierungsmöglichkeiten sei daran erinnert, dass sich dynamische Effekte im Verlauf der Filtration nur indirekt auf Vorgänger und Nachfolger des Filters auswirken, da diese durch den aus dem ressourcenorientierten Ansatz übernommenen Synchronisationsmechanismus nach Bild 80 erst benachrichtigt werden, wenn eine Charge komplett abgearbeitet ist. Eine feinere Synchronisation ist bei Bedarf allerdings darstellbar, indem entweder die Quell- oder Zielressource periodisch den Prozessfortschritt beim Filter abrufen oder entlang der Förder-

strecke Sensoren platziert werden, die Teilfertigmeldungen (z. B. „25 %“, „50 %“, „75 %“) versenden.

### 5.4.3.2 Erweiterter prozessorientierter Ansatz

Ein erweiterter prozessorientierter Ansatz bietet eine bessere Annäherung an den kontinuierlichen Charakter der Filtration und mehr Flexibilität im Umgang mit Quell- und Zieltanks, die dadurch gegenüber dem Kernprozess der Filtration in den Vordergrund rücken. Allerdings stützt er sich auf Modellierungsprinzipien, die mit der in den vorherigen Abschnitten übergreifend angewandten Logik nur eingeschränkt kompatibel sind. Abweichend von allen bisher vorgestellten Ansätzen treten Chargen bzw. diskrete Mengen eines Materials hier nicht direkt als bewegliche Elemente in Erscheinung. Vielmehr stellt das Modell die Zwischenprodukte entlang der Prozesskette lediglich als Füllstand von Behältern dar. Eine ähnliche Technik wird in der Simulationsbibliothek für die Abfüllung und Verpackung der KRONES AG eingesetzt, um quasi-kontinuierliche Ströme diskreter Materialien (Flaschen, Kästen, usw.) zwischen Puffern bei der Massenfertigung abzubilden.

Behälter werden im vorliegenden Ansatz durch eine eigene Objektklasse „Tank“ dargestellt, in der ein Grundbaustein vom Typ „Weg“ in Verbindung mit einem beweglichen Objekt vom Typ „Fahrzeug“ verwendet wird (vgl. Bild 82), um den Pegelstand des Tanks zwischen Minimum („leer“) und Maximum („voll“) abzubilden. Soll ein Transfer von Material in einen Tank oder aus einem Tank stattfinden, rechnen Schnittstellen-Methoden des Tank-Objekts die gewünschte Transferrate in eine neue Geschwindigkeit des als „Pegelmarke“ bezeichneten Fahrzeugs um, sofern der Tank aktuell überhaupt aufnahmefähig (also: nicht „voll“) bzw. lieferfähig (also: nicht „leer“) ist.

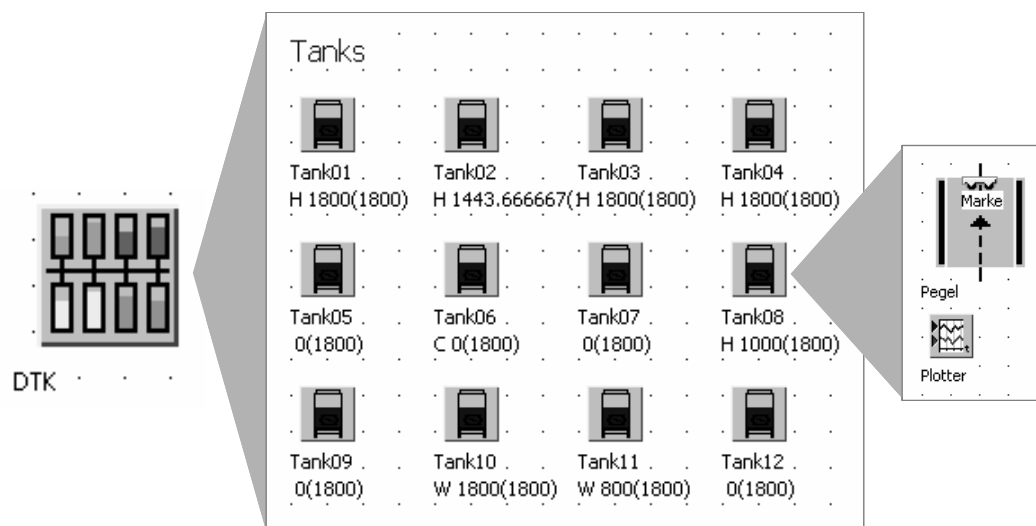


Bild 82: Schematischer Aufbau eines Drucktanklagers beim erweiterten prozessorientierten Ansatz

Dabei können multiple Transfers in beliebiger Richtung anliegen, d. h., der Tank kann gleichzeitig aus mehreren Quellen befüllt werden und mehrere Ziele beliefern, wobei lediglich die resultierende Füllstandänderung (steigender, sinkender oder stabiler Pegel) relevant ist. Solange keine äußeren Ereignisse diese „Strömungsverhältnisse“ beeinflussen, bewegt sich die Pegelmarke – abgesehen vom Sonderfall eines Fließgleichgewichts – mit konstanter Geschwindigkeit entlang der Wegstrecke, bis ein Ereignis „Tank voll“ (Startpunkt erreicht) oder „Tank leer“ (Endpunkt erreicht) eintritt. Dieser „ereignisarme“ Ablauf kann ohne großen Rechenaufwand simuliert werden. Nachdem die Länge der Wegstrecke das Fassungsvermögen des Tanks bestimmt, wurde für Brauereimodelle ein Abbildungs-„Maßstab“ gewählt, bei dem „1 m“ Weg einem Volumen von „1 hl“ entspricht. Demnach bedeutet eine Geschwindigkeit der Pegelmarke von „1 m/s“ eine Füllstandänderung mit einer Rate von „3600 hl/h“.

Tabelle 16: Parameter für das Transfer-Objekt im erweiterten prozessorientierten Filtrationsmodell

Parameter	Datentyp	Bedeutung
<b>sollMenge</b>	Dezimalzahl	Zu transferierendes Volumen (Einheit „hl“)
<b>sollRate</b>	Dezimalzahl	Gewünschte (maximale) Transferrate (Einheit „hl/h“)
<b>Quellen</b>	Tabelle	Liste von Quell tanks mit „Gewicht“ und „Priorität“ (s. u.) für jede potenzielle Quelle
<b>Ziele</b>	Tabelle	Liste von Zie tanks mit „Gewicht“ und „Priorität“ (s. u.) für jedes potenzielle Ziel
<b>anzahlQuellen</b>	Ganzzahl	Anzahl der <i>gleichzeitig</i> zu verwendenden Quellen
<b>anzahlZiele</b>	Ganzzahl	Anzahl der <i>gleichzeitig</i> zu verwendenden Ziele
<b>&lt;Quelle Ziel&gt;. Priorität</b>	Dezimalzahl	Rangnummer eines Tanks innerhalb einer Liste von Quellen oder Zielen; kann z. B. die Reihenfolgeposition bei einem mehrteiligen Transfer bestimmen
<b>&lt;Quelle Ziel&gt;. Gewicht</b>	Ganzzahl	Gewichtung des Tanks beim Einsatz in einer Gruppe von Quellen oder Zielen; kann z. B. das Mischungsverhältnis beim Verschneiden regulieren

Da für einen Transfer immer mindestens eine Quelle und mindestens ein Ziel miteinander zu koordinieren sind, wurde eine eigene Objektklasse „Transfer“ geschaffen, die mit Tank-Objekten über geeignete Schnittstellen kommuniziert. Das Transfer-Objekt wurde dabei als bewegliches Objekt angelegt, sodass es ähnlich wie das Chargen-Objekt in den bereits erörterten Ansätzen zur Laufzeit im Modell erzeugt, verschoben und vernichtet werden kann. Jede Instanz der Transfer-Klasse stellt damit einen Transferauftrag dar, der über die in Tabelle 16 aufgelisteten Parameter spezifiziert werden kann. Als Abbruchkriterium für einen Transfer kann eine gewünschte „sollMenge“ angegeben werden. Die „sollRate“ dient als Obergrenze für die Transferleistung, wobei ggf. auch entsprechend parametrisierte Quell- oder Zie tanks limitieren können. Sind meh-

rere potenzielle Quellen oder Ziele für den Transfer angeben, so hängt die Zugriffslogik wesentlich davon ab, wie viele von diesen gleichzeitig genutzt werden sollen (Parameter „anzahl-Quellen“, „anzahlZiele“).

Bei einem Einzelzugriff werden die aufgelisteten Tanks entsprechend ihrer Verfügbarkeit, Priorität und Füllmenge bzw. Kapazität sequenziell ausgewählt. Sofern bei paralleler Fahrweise mehr Tanks aufgelistet sind als gleichzeitig genutzt werden sollen, werden diese bei Bedarf gestaffelt angesteuert, wie die folgenden Beispiele verdeutlichen:

Tabelle 17: Erstes Beispiel für den gestaffelten Zugriff auf Quellentanks

Quellen (anzahlQuellen = 2)				Transfer-Abschnitte			Ergebnis
Tank	Bestand	Priorität	Gewicht	#1	#2	#3	Restbestand
LT 01	400 hl	1	1	400 hl	.-	.-	0 hl
LT 02	800 hl	2	1	400 hl	400 hl	.-	0 hl
LT 03	1000 hl	3	1	.-	400 hl	200 hl	400 hl
LT 04	1000 hl	4	1	.-	.-	200 hl	800 hl
Dauer bei sollRate = 400 (hl/h)				2 h	2 h	1 h	
Ziele (anzahlZiele = 1)				#1	#2	#3	sollMenge =
DT 01	0 hl	(1)	(1)	800 hl	800 hl	400 hl	2000 hl

Tabelle 18: Zweites Beispiel für den gestaffelten Zugriff auf Quellentanks  
(Priorität und Gewicht gegenüber Tabelle 17 geändert)

Quellen (anzahlQuellen = 2)				Transfer-Abschnitte			Ergebnis
Tank	Bestand	Priorität	Gewicht	#1	#2	#3	Restbestand
LT 01	400 hl	2	2	400 hl	.-	.-	0 hl
LT 02	800 hl	3	2	.-	800 hl	.-	0 hl
LT 03	1000 hl	4	2	.-	.-	133 hl	867 hl
LT 04	1000 hl	1	1	200 hl	400 hl	67 hl	333 hl
Dauer bei sollRate = 400 (hl/h)				1,5 h	3 h	0,5 h	
Ziele (anzahlZiele = 1)				#1	#2	#3	sollMenge =
DT 01	0 hl	(1)	(1)	600 hl	1200 hl	200 hl	2000 hl

Im Zuge der Filtration sollen 2000 hl Bier mit einer Rate von 400 hl/h in einen Drucktank verschoben werden. Als Quellen stehen vier unterschiedlich vorbelegte Lagertanks bereit. Zum

Verschneiden zwecks Qualitätskonstanz soll der Filter möglichst aus zwei Lagertanks gleichzeitig zu gleichen Teilen beschickt werden. Tabelle 17 zeigt die entsprechenden Parameter und ein Ablaufschema für diesen Transfer.

Tabelle 18 zeigt eine Variante dieses Szenarios, in dem aufgrund geänderter Prioritäten und Gewichtungsfaktoren für die Quell tanks ausgehend von denselben Startbedingungen ein vollkommen anderer Verlauf der Staffeln erreicht wird. Hier wird der Inhalt von Lagertank „LT 04“ mit dem Bier aus den übrigen Tanks nach und nach verschneiden. Der Wechsel zum nächsten Tank bei der gestaffelten Ansteuerung wird in diesen Beispielen jeweils durch das Ereignis „Tank leer“ eines Lagertanks ausgelöst, das dem Transfer-Objekt gemeldet wird, worauf dieses die Transferraten für alle aufgelisteten Quellen und Ziele überprüft und für den folgenden Transferabschnitt ggf. neu „aushandelt“.

Das hier als prozessorientierter Ansatz für die Filtration vorgestellte Konzept des Materialtransfers zwischen Quell- und Zieltanks kann mit gewissen Einschränkungen und Anpassungen auch zum Modellieren anderer Prozessstufen der Bierherstellung und der Abfüllung verwendet werden. Bild 83 zeigt einen mit schematischen Elementen aufbereiteten Screenshot aus einem Demonstrationsmodell, dessen Spannweite vom Sudhaus bis zum Vollgutlager reicht. Entlang dieser Prozesskette wechseln sich Transfer-Stufen (Ausschlagen, Umpumpen, Filtration und Abfüllung) mit Aufhalten in Tanklagern ab (Gärkeller, Lagerkeller, Drucktankkeller).

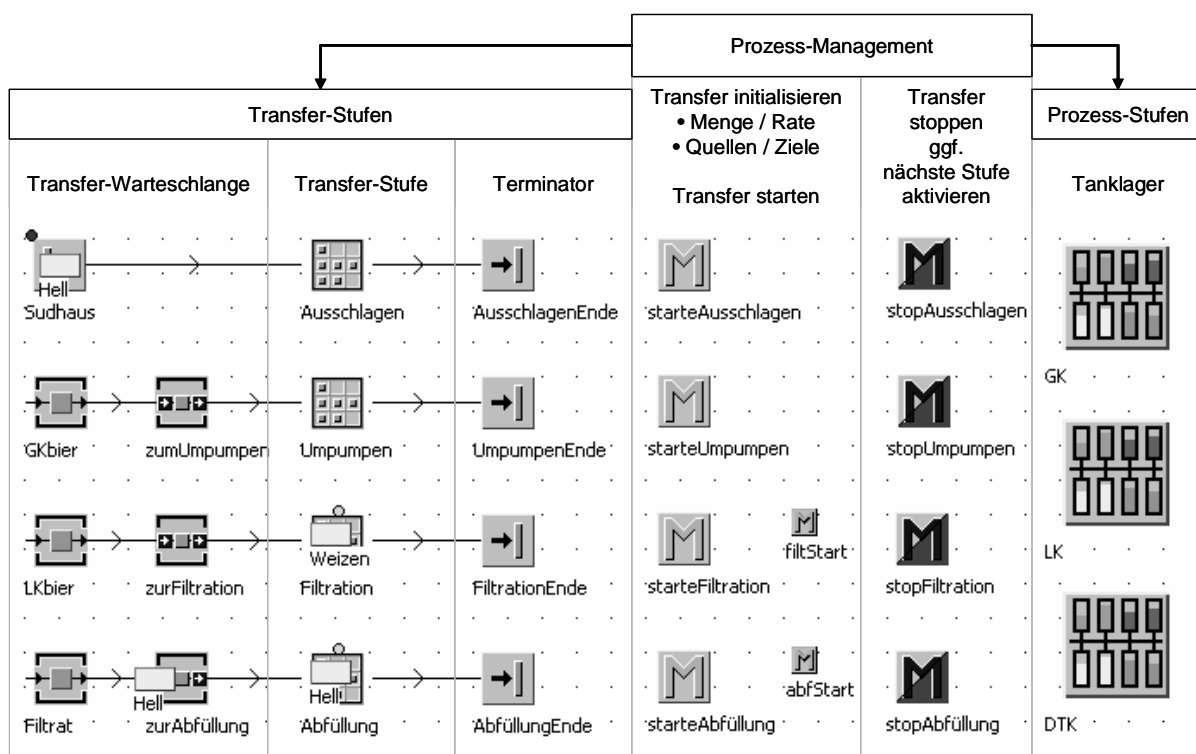


Bild 83: Erweiterter prozessorientierter Modellansatz für die Filtration als Basis eines Brauerei-Gesamtmodells

Als globaler Initiator dient in diesem System das Sudhaus, repräsentiert durch einen Baustein des Typs „Quelle“, der periodisch nach einer statisch vorgegebenen Sudfolge Transfer-Objekte erzeugt. Während das Ausschlagen von Würze zum Gärkeller stets verzögerungsfrei gewährleistet sein muss, sollen in den nachfolgenden Transfer-Stufen auch Wartezeiten zwischen der Initialisierung und dem Start eines Transfers zulässig sein. Dies wird jeweils durch einen Puffer-Baustein dargestellt, in dem sich eine Warteschlange von Transfer-Objekten vor der eigentlichen Transfer-Stufe aufbauen kann. Die Transfer-Stufe ist als Lager-Baustein ausgeführt, in dem das Transfer-Objekt nach dem Aufruf der zugehörigen „Start“-Methode verbleibt, bis der betreffende Transfer abgewickelt oder ein anderes Abbruchkriterium erreicht ist. Die diesem Element zugeordnete Lagerkapazität begrenzt damit die Anzahl der gleichzeitig zulässigen Transfers der Stufe. Sofern für den Transfer Einrichtungen (Leitungswege, Produktionslinien) mit unterschiedlichen Merkmalen zur Auswahl stehen, können mehrere Lagerbausteine parallel verschaltet und geeignete Verteilungsmechanismen definiert werden.

Abschließend wird das Transfer-Objekt von einem hier als „Terminator“ bezeichneten Baustein vom Typ „Senke“ vernichtet, nachdem die „Stop“-Methode der jeweiligen Stufe aufgerufen wurde. Im Demonstrationsbeispiel werden an dieser Stelle außerdem Ereignisse ausgelöst, die mit einer gewissen Zeitverzögerung in der nachfolgenden Stufe Transfer-Objekte generieren. Diese könnten alternativ auch aus einem hinterlegten Produktionsplan oder dynamisch aufgrund der Belegungssituation der benachbarten Tanklager abgeleitet werden.

In jedem Fall muss bei diesem Ansatz eine gewisse Logik für das übergreifende „Prozess-Management“, ggf. zusammen mit Regeln und Restriktionen für eine taktisch motivierte Vorauswahl von Quellen und Zielen beim Initialisieren von Transfers, in geeigneter Form codiert werden, da das Zusammenspiel von Tank- und Transfer-Objekten lediglich die unmittelbare operative Abwicklung von Transfers mit Rücksicht auf Kapazitätsgrenzen regulieren kann. Die in den obigen Beispielen vorgestellten Parametrierungsmöglichkeiten des Transfer-Objekts verbessern zwar den Realitätsgrad der Abläufe beim Materialtransfer deutlich gegenüber den einfacheren Ansätzen, tragen damit aber nicht unbedingt zu einer optimalen Belegung der Tanklager bei. Auch beim Modellieren von Kapazitätsbeschränkungen für Transfer-Ressourcen durch Schichtpläne, Störungen, Rüstzeiten erfordert die komplexere Transfer-Logik detailliertere Mechanismen. Für das nachfolgend angeführte Demonstrationsbeispiel wurde von solchen Faktoren abgesehen.

Das in Bild 83 skizzierte Modellkonzept wurde zur Demonstration gemäß Tabelle 19 parametrisiert, um ein einfaches Szenario für einen mittelgroßen Brauereibetrieb zu simulieren, der ohne Diversifikationsstufen drei verschiedene Sorten Bier mit einem wöchentlichen Volumen von ca. 30 000 hl (vereinfachende Annahme: 1 hl Kaltwürze ergibt verlustfrei 1 hl Verkaufsbier) produziert. Während das Sudhaus die Wochenproduktion von 40 Suden in ca. 4,5 Produktionstagen bewältigt, wurde für die übrigen Abteilungen und Ressourcen kein Schichtmodell hinterlegt,

sodass jederzeit umgepumpt, filtriert und abgefüllt werden kann, sofern die erforderlichen Ressourcen nicht bereits belegt sind. Für Filtration und Abfüllung wurde neben der Warteschlange, die Filtrations- und Abfüllaufträge staffelt, auch eine Warteschleife mit einer Zykluszeit von 1 h eingerichtet, in die Aufträge gestellt werden, für die vorübergehend keine geeigneten Zieltanks verfügbar sind. Theoretisch kann sich durch diese Vorkehrungen ein Rückstau entwickeln, der sich über mehrere Stufen fortpflanzt. Sofern ein termingerechtes Ausschlagen mangels Zieltank nicht mehr möglich ist, bricht die Simulation mit einer Fehlermeldung ab. Allerdings sollte auch bei weniger extremem Simulationsverlauf kontrolliert werden, ob die Häufigkeit von Warteschleifen und damit auch die Durchlaufzeit der Chargen und die Belegungszeit der Tanks noch als praxisgerecht betrachtet werden kann. Dies kann ggf. bereits während der Simulation erfolgen, z. B. wenn der Eintritt eines Transfer-Objekts in eine Warteschleife visuell und/oder akustisch signalisiert wird.

*Tabelle 19: Parameter im Demonstrationsmodell für den erweiterten prozessorientierten Ansatz in der Filtration*

Parameter	Sorte A	Sorte B	Sorte C
Volumen (Kaltwürze) je Sud	800 hl	720 hl	650 hl
Sude pro Woche (8-10 pro Tag)	24	8	8
Sudfolge (fixes Wochenschema)	AAAA CCCA AAAA AAAA BBBB CCCA AAAA BBBB AAAA		
Transferrate beim Ausschlagen	1000 hl/h (ohne limitierende Ressource)		
Steigraumbedarf im Gärtank	20 %	20 %	40 %
Gärzeit (ab Ende erster Zugang)	6 Tage	8 Tage	5 Tage
Zugeordnete Tankkapazität im GK	14 x 4000 hl (brutto)		
Zeitfenster für Vermischen im GK	12 h		
Transferrate beim Umpumpen	600 hl/h (zu gleichen Teilen auf zwei Lagertanks)		
Lagerzeit (ab Ende erster Zugang)	15 Tage	20 Tage	12 Tage
Zugeordnete Tankkapazität im LK	27 x 4000 hl		9 x 3000 hl
Zeitfenster für Vermischen im LK	2 Tage	4 Tage	4 Tage
Tranferrate bei der Filtration	500 hl/h (eine Filterlinie)		
Minimaler Aufenthalt im DT	6 Stunden		
Maximaler Aufenthalt im DT	2 Tage	4 Tage	3 Tage
Mittlerer Aufenthalt im DT	1 Tag	2 Tage	1,5Tage
Zugeordnete Drucktanks á 1800 hl	6 Tanks	3 Tanks	3 Tanks
Tranferrate beim Abfüllen	200 hl/h (eine Abfülllinie)		



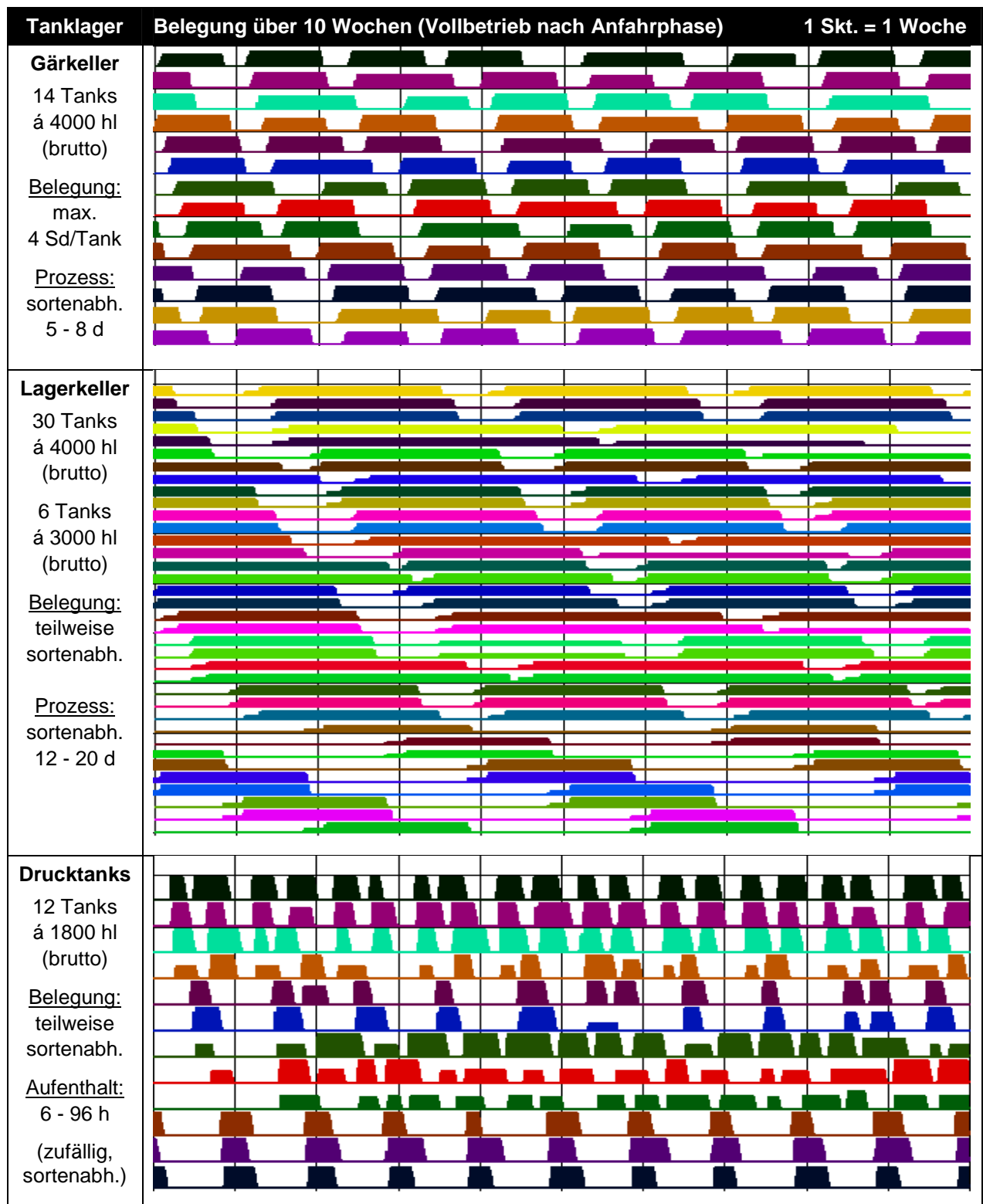


Bild 84: Simulierte Tankbelegung für ein Demonstrationsmodell, das den erweiterten prozessorientierten Ansatz für die Filtration für alle Stufen der Bierherstellung und -abfüllung verwendet.

Für das vorliegende Szenario wurde ausgehend von einem „sauberen System“ (ohne jede Vorbelegung) ein Zeitraum von insgesamt 100 Tagen simuliert, in denen keine wesentliche Überlastung einer Prozess- oder Transfer-Stufe zu verzeichnen war. Um die Anfahrphase sicher abzugrenzen, wurden die ersten 30 Tage von der Statistikerfassung im Modell ausgeschlossen. Für den übrigen Zeitraum kann von einem „Vollbetrieb“ aller Stufen ausgegangen werden, wobei die Auslastung der limitierenden Ressourcen (Filtration rund 36 % bei 500 hl/h und Abfüllung rund 89 % mit 200 hl/h) vor dem Hintergrund des konstanten wöchentlichen Durchsatzes als erwartungsgemäß zu bezeichnen ist.

Einen Einblick in die Belegung der Tanklager gibt Bild 84, in dem speziell gestaltete „Plotter“-Ansichten aus der Simulation übereinander montiert sind, die nach dem Konzept eines Gantt-Charts den Füllgrad aller Tanks derselben Stufe zeilenweise anzeigen. Auch wenn aufgrund einer gewissen Rotation bei der Tankauswahl alle Tanks belegt werden, sind nicht alle Tanklager grenzwertig ausgelastet. Auch wenn zwischen zwei Belegungen desselben Tanks eine Reinigungszeit (im Beispiel 12 h) einzuhalten ist, die hier nicht gesondert visualisiert wurde, lässt das Gesamtbild der Tankbelegung noch kapazitiven Spielraum vermuten. Ein schrittweises Reduzieren der Tankanzahl in verschiedenen Abteilungen ergab, dass ausgehend von der vorliegenden Konfiguration auf mindestens einen Gärtank und drei Lagertanks verzichtet werden kann, während die Drucktanks offenbar sämtlich benötigt werden, um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Zu bedenken ist dabei allerdings, dass Gärung und Lagerung hier ausschließlich deterministisch parametrisiert wurden, sodass trotz der Warteschlangen und Warteschleifen für die Transfer-Stufen eine gewisse Periodizität auf das Drucktanklager durchschlägt, was die Tankbelegung ungünstig beeinflussen kann. Außerdem werden die Transfer-Aufträge für die Filtration im Beispiel jeweils für den gesamten Inhalt eines Lagertanks erzeugt, der hier in der Regel auf mindestens zwei Drucktanks zu verteilen ist, was in der Praxis vor allem im Grenzlast-Bereich vermutlich intelligenter gehandhabt werden könnte. Andererseits sind im realen Umfeld konkrete Restriktionen und Präferenzen für den Betrieb von Filtration und Abfüllung zu unterstellen, sodass die Drucktankbelegung in der Regel nicht als isoliertes bzw. vorrangiges Optimierungsproblem behandelt werden kann. Das Optimieren der Produkt- und Formatreihenfolge und das kurzfristige Sicherstellen der Lieferfähigkeit abhängig von nicht detailliert planbaren Bestandsverläufen bei Leer- und Vollgut dürften die optimale Drucktankbelegung innerhalb der Hierarchie der Teilziele weitgehend dominieren, sodass das Drucktanklager gewisse Kapazitätsreserven und damit Dispositionsspielräume beinhalten sollte.

## 6 Projektbeispiele zur Prozesssimulation

Nachfolgend sollen einige typische Anwendungsfälle für die ereignisorientierte Prozesssimulation vorgestellt werden, die als Etappen auf dem Weg zu der im vorigen Kapitel diskutierten Systematik zu betrachten sind, und durch die wichtiger Input und ein unmittelbarer Praxisbezug im Zuge der Entwicklungsarbeit sichergestellt wurde. Da es sich um interne und externe Studien und Projekte der KRONES Gruppe handelt, wird hier auf ausführliche Angaben zu Projektdetails und Simulationsergebnissen, die den Rahmen dieser Arbeit ohnehin übersteigen würden, zugunsten eines verkürzten neutralisierten Profils verzichtet. Neben einem kurzen Überblick über das bisherige Einsatzspektrum der Prozesssimulation bei KRONES verdeutlichen die umfangreicheren Beispiele auch die Versatilität der Simulation innerhalb desselben Projekts.

Art und der Umfang eines Simulationsprojekts werden erheblich davon bestimmt, in welcher Hinsicht und in welchem Ausmaß Freiheitsgrade bestehen, vor deren Hintergrund eine konkrete Fragestellung am Modell zu untersuchen ist. Im Kontext prozesstechnischer Produktionssysteme kann man dabei prinzipiell unterscheiden zwischen Entscheidungsspielräumen hinsichtlich der technischen Anlagen (Konfiguration, Dimensionierung) und Variationsmöglichkeiten (Verfahrensgestaltung, Disposition) oder auch Unwägbarkeiten (Prozessverlauf, Bedarfentwicklung) bezüglich deren

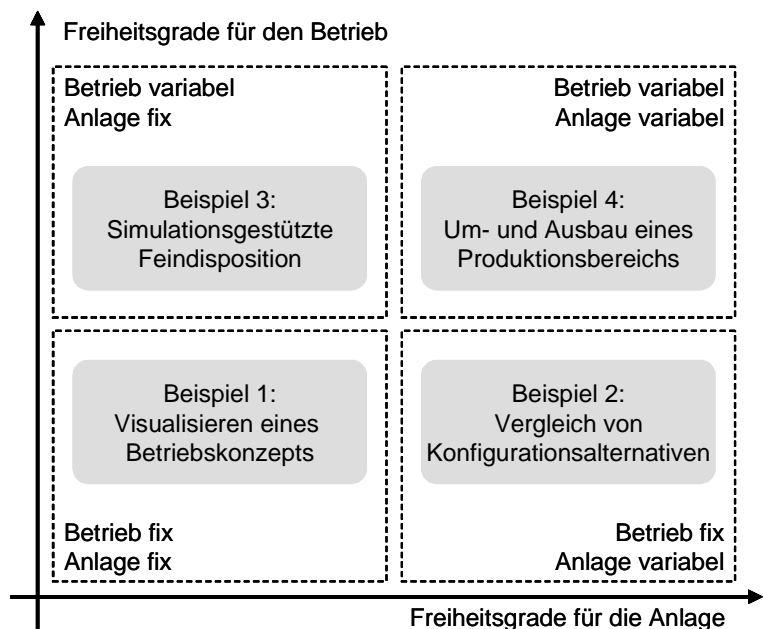


Bild 85: Fallbeispiele für die Prozesssimulation

Betrieb. Diese beiden Kriterien spannen als Dimensionen das in Bild 85 dargestellte Schema auf, in das die nachfolgend näher charakterisierten Projektbeispiele eingeordnet wurden. Die Nummerierung korrespondiert mit der Endziffer in der Überschrift der folgenden Abschnitte.

### 6.1 Projektbeispiel: Visualisieren eines Betriebskonzepts

#### 6.1.1 Zielsetzung

In diesem besonders einfachen Anwendungsfall für die Simulation bestehen keinerlei Gestaltungsspielräume für die Anlage oder den Betrieb, da bereits ein vollständiges Konzept für beide

Bereiche vorliegt, das mit Hilfe der Simulation lediglich visualisiert oder ggf. verifiziert werden soll. Sofern die dem Konzept zugrunde liegenden Annahmen korrekt sind und ohne Fehler in das Simulationsmodell übertragen wurden, dient die Simulation hier nicht als Entscheidungshilfe, sondern lediglich als detailreicher und anschaulicher „proof-of-concept“ anhand geeignet aufbereiteter Simulationsergebnisse. Im vorliegenden Fall handelte es sich um die Reorganisation und Erweiterung eines bestehenden Sudhauses.

### 6.1.2 Vorgehensweise

Ausgehend von strukturierten Angaben zur Anlagenkonfiguration und der Gefäßbelegung im Normalbetrieb für die Hauptsorte wurde ein einfaches Simulationsmodell erstellt, das nach der in Kapitel 5 diskutierten Systematik dem ressourcenorientierten Ansatz entspricht, da innerhalb der Belegung der Gefäße und Geräte des über zwei Linien teilweise vernetzten Sudwerks lediglich Transfer- und Reinigungsschritte individualisiert wurden.

### 6.1.3 Simulationsergebnisse

Als wesentliches Ergebnis der Simulation wurde das in Bild 86 gezeigte Gantt-Chart erzeugt, das die Belegungszeit und teilweise auch den Füllstandverlauf für alle relevanten Ressourcen des modernisierten Sudwerks darstellt.

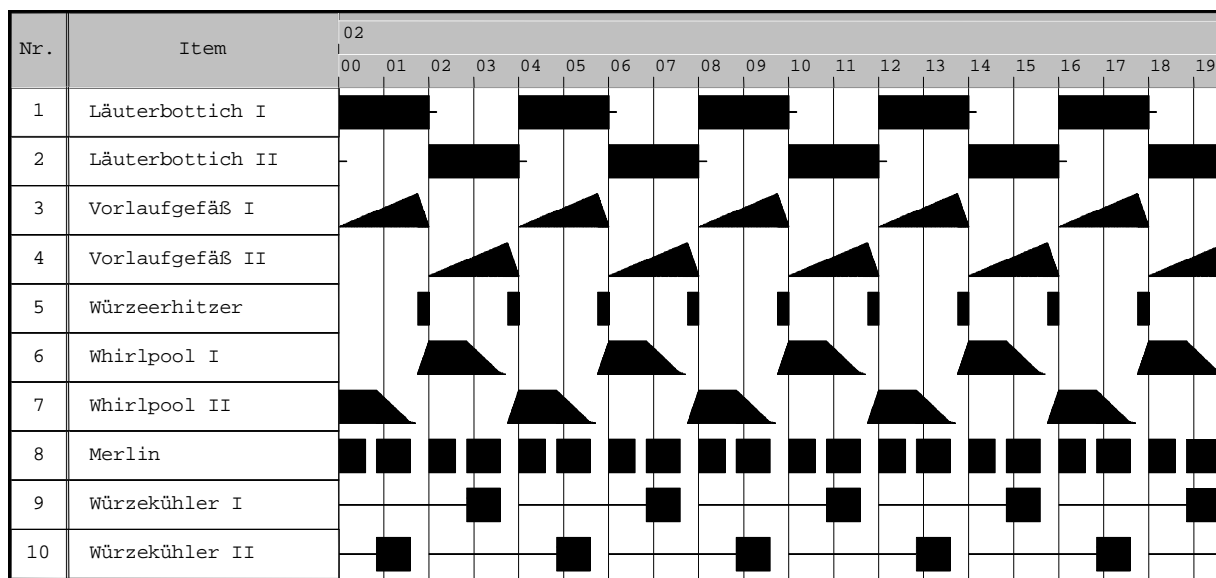


Bild 86: Dokumentation eines Ablaufschemas für die Würzeproduktion in einem modernisierten Sudwerk mit Würzekochsystem Merlin® (STEINECKER) anstelle der konventionellen Würzpfanne

## 6.2 Projektbeispiel: Vergleich von Konfigurationsalternativen

### 6.2.1 Zielsetzung

In Erweiterung des im vorigen Beispiel vorgestellten Ansatzes sollten neben der reinen Verifikation eines Entwurfs mehrere alternative Konzepte für eine Kapazitätserweiterung und Rekonfiguration eines bestehenden vernetzten Sudwerks analysiert werden, um Unterschiede bzw. Vor- und Nachteile der verschiedenen Layouts zu identifizieren.

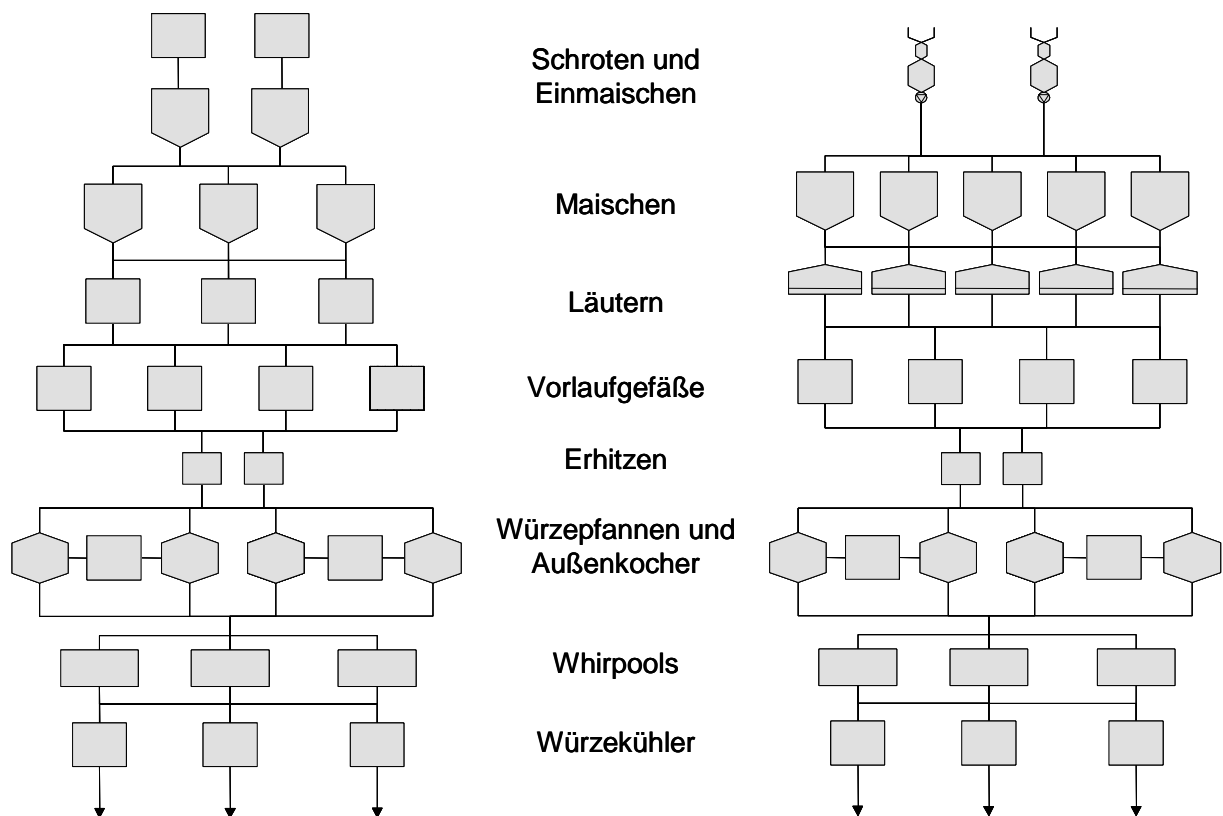


Bild 87: Konfigurationsalternativen für den Ausbau eines bestehenden Sudhauses

### 6.2.2 Vorgehensweise

Für zwei grundlegend unterschiedliche Konfigurationsansätze wurden separate Simulationsmodelle angelegt, die durch interaktiv konfigurierbare Komponenten zur Simulation verschiedener Untervarianten genutzt wurden. Als Basis für die Evaluation wurde ein detaillierter Produktionsplan vorgegeben, der mit geringfügigen variantenspezifischen Anpassungen auf der Grundlage eines je Basisvariante definierten Verfahrens interpretierbar ist. Die Simulation verwendet dabei eine prozessorientierte Perspektive, die das Verfahren der Würzproduktion in zahlreiche Teilschritte gliedert.

### 6.2.3 Simulationsergebnisse

Als wesentliches Kriterium für den Vergleich der beiden Basiskonzepte wurde die unterschiedliche Auslastung der jeweils eingesetzten Ressourcen untersucht, die Bild 88 als Belegungsstatistiken für eine Produktionswoche gegenüberstellt. Außerdem konnte in der Simulation gezeigt werden, dass in einer der Varianten (links im Bild) auf eines der vier Vorlaufgefäße des bestehenden Sudwerks verzichtet werden könnte. Prinzipiell wurde die Machbarkeit für beide Konzepte durch die Simulation bestätigt. Allerdings erwies sich diese Variante vor allem aufgrund der besonders hohen Auslastung der Maischefilter als wesentlich empfindlicher gegenüber simulierten Abweichungen vom planmäßigen Prozessverlauf, sodass bereits geringfügige Überschreitungen der Zykluszeit einzelner Stufen das Gesamtsystem nachhaltig destabilisieren konnten.

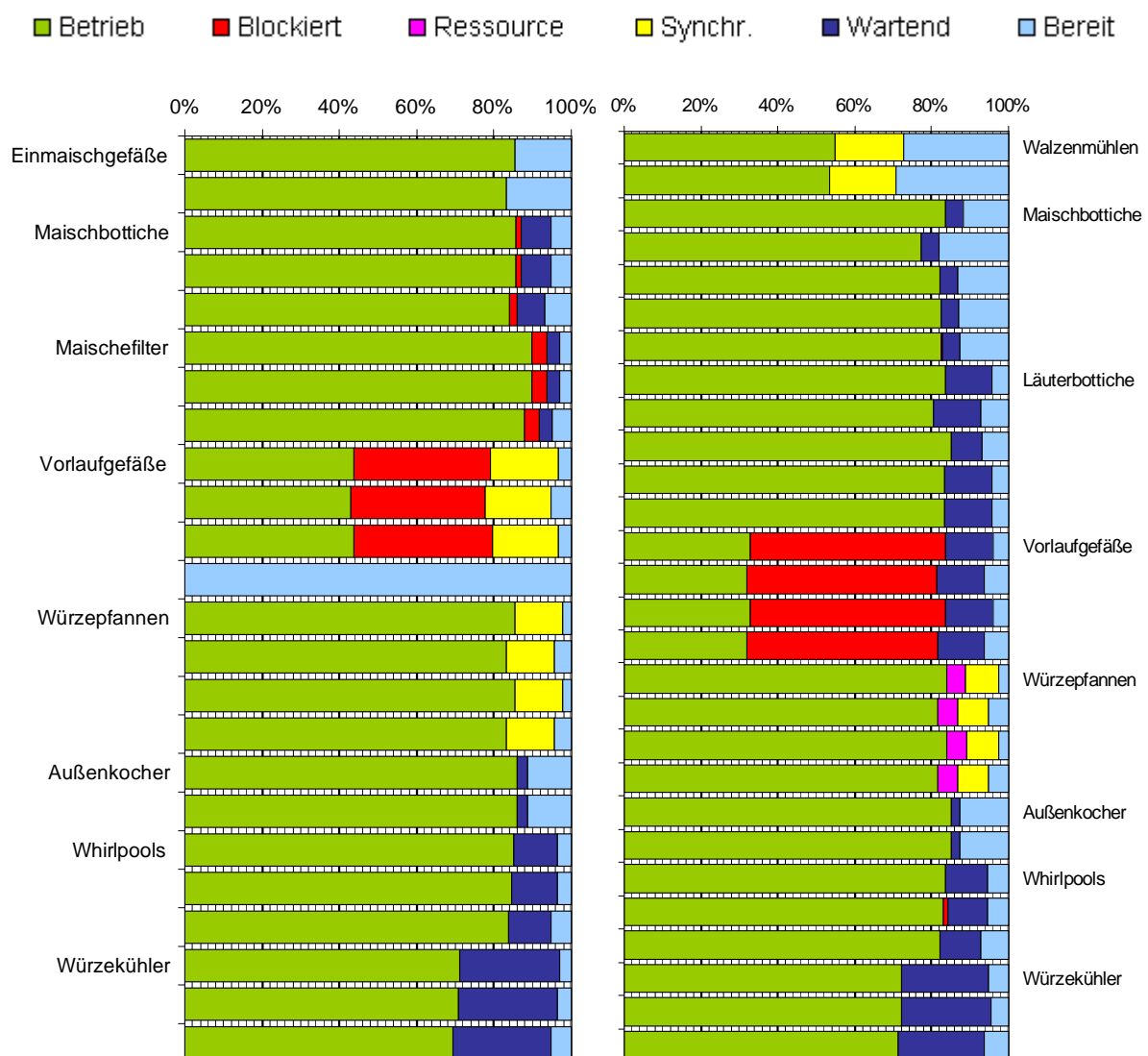


Bild 88: Auslastung der Ressourcen in zwei Konfigurationsvarianten für den Ausbau eines Sudhauses

## **6.3 Projektbeispiel: Simulationsgestützte Feindisposition**

### **6.3.1 Zielsetzung**

Anhand einer detaillierten Simulation der Abläufe bei der Würzproduktion mit zahlreichen in Gruppen gegliederten und vernetzten Sudlinien sollte deren Zugriff auf die gemeinsame Dampfversorgung durch eine Turbine mit Kraft-Wärme-Kopplung so optimiert werden, dass diese möglichst gleichmäßig betrieben werden kann. Als besonders kritisch wurden dabei Unterbrechungen der Dampfabnahme ab einer Größenordnung von 15 min eingestuft, da in diesen Fällen die Turbinenleistung und damit auch die Stromerzeugung zurückgefahren werden muss, was bei unverändertem Strombedarf überproportionale Mehrkosten für den Fremdstrombezug bedingen kann. Nachdem die Zeitabläufe bei der Würzproduktion, die vor allem beim Maischen und im Zuge der Würzekochung erhebliche Dampfleistung beansprucht, weitgehend technologisch motiviert sind, können sie nur in engen Grenzen manipuliert werden. Begrenzte Spielräume für die Optimierung waren lediglich bezüglich der Zeitpunkte des Einmischens und des Aufheizens zum Kochen gegeben, für die jeweils moderate Verzögerungen von bis zu 30 min zulässig sein sollten, sofern diese den Durchlauf der übrigen Chargen im vernetzten Sudwerk nicht zu stark beeinträchtigen. Ausgehend von einem Sudplan, der einen gleichmäßigen zyklischen und zwischen gruppierten Sudlinien auch ideal gestaffelten Start der Sude vorsah, sollte durch diese Feindisposition der Gefäßbelegung und mit Rücksicht auf den aktuellen Prozessfortschritt bereits gestarteter Sude die Häufigkeit von kritischen Unterbrechungen bei der Dampfabnahme soweit möglich verhindert werden.

### **6.3.2 Vorgehensweise**

In einem ersten Schritt wurden die umfangreichen Sudhausanlagen in einem prozessorientierten Simulationsmodell nachgebildet, um die simulierte Dampfabnahme mit vergleichbaren Betriebsdaten aus dem realen System abzugleichen. Ausgehend von diesem Ansatz wurde eine optimale Annäherung an den tatsächlichen Dampfverbrauch mit Hilfe von Genetischen Algorithmen vorgenommen, mit deren Hilfe die geeignete Parametrierung der Simulation wesentlich verbessert werden konnte.

In der zweiten Stufe des Projekts wurden wiederum Genetische Algorithmen in Verbindung mit einer überarbeiteten Version des Simulationsmodells als Optimierungsmodell (vgl. 4.1.6.2) eingesetzt, um ausgehend von vorgegebenen Sudplänen experimentell das Optimierungspotenzial durch die individuelle Feindisposition jeder Charge zu ermitteln. Diese Phase wurde durch einen mehrtägigen Testlauf abgeschlossen, bei dem die prinzipielle Wirksamkeit der anhand der Simulation optimierten Staffelung der Zeitabläufe im „Live“-System untersucht wurde.

In der dritten Stufe wurde der dauerhafte betriebsbegleitende Einsatz des Optimierungsmodells analysiert, indem dieses über eine Datenbank mit einem zweiten Simulationsrechner verbunden

wurde, der als virtuelles „reales System“ fungierte. Auf diesem System wurde ein Simulationsmodell betrieben, das weitgehend mit dem zur Optimierung eingesetzten Modell identisch war, aber im Unterschied zu diesem in Echtzeit (bzw. Echtzeitvielfachen) betrieben wurde. Das Zusammenspiel zwischen den echtzeitproportional simulierten Prozessabläufen und der vom Optimierungsmodell kontinuierlich überarbeiteten Feindisposition konnte so unter anderem mit Blick auf die Auswirkungen von außerplanmäßigen Abläufen im „realen“ System detailliert getestet werden.

### 6.3.3 Simulationsergebnisse

Die Wirksamkeit des Optimierungsmodells konnte bei einem mehrtägigen Testlauf in der Praxis und auch in den anschließenden umfangreicheren Tests belegt werden. Bild 89 zeigt für ein Zeitfenster von 24 Stunden am Beginn einer Sudwoche die reale Dampfabnahme (violett) im Vergleich zu Simulationsdaten mit und ohne Optimierung. Die „binäre“ Sicht auf die Dampfabnahme im unteren Bereich verdeutlicht dabei einerseits, dass die Lage vor allem der größeren Unterbrechungen in der Simulation weitgehend korrekt prognostiziert wird (Vergleich violett/rosa). Andererseits können durch eine optimale Feindisposition (blau) kritische Unterbrechungen fast vollständig vermieden werden, sobald nach Abschluss der Anfahrphase alle Linien voll arbeiten.

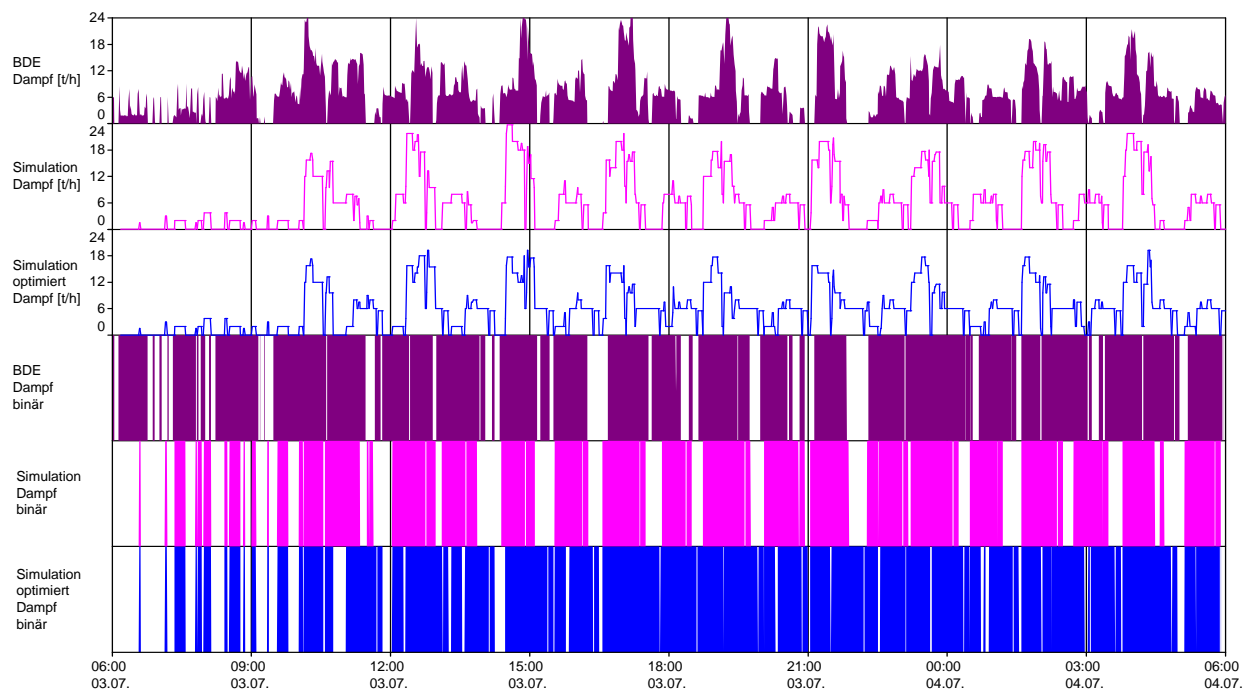


Bild 89: Effekt der simulationsgestützten Feindisposition der Würzproduktion auf den Dampfverbrauch  
 violett: realer Prozess, rosa: Simulation ohne Optimierung, blau: Simulation mit Optimierung  
 obere Zeilen: absolute Dampfabnahme in [t/h], untere Zeilen: binäre Sicht: „Dampfabnahme ja/nein“



## **6.4 Projektbeispiel: Um- und Ausbau eines Produktionsbereichs**

Im Unterschied zu den übrigen hier angeführten Beispielen war der Autor in diesem mehrstufigen Großprojekt nicht in allen Phasen direkt involviert und nur teilweise unmittelbar verantwortlich. Die in diesem Kontext gesammelten Erfahrungen und Eindrücke waren allerdings ausgesprochen wertvoll für die Konzeptbildung zu der vorliegenden Arbeit. Deshalb und da es sich um ein nach Art und Umfang einzigartiges Projekt handelte, wurde es in die Reihe der Praxisbeispiele aufgenommen.

### **6.4.1 Zielsetzung**

Im Zuge der Planungsunterstützung für eine stufenweise Modernisierung und Kapazitätserweiterung der Bereiche Filtration und Drucktanks sowie der zugehörigen Transfereinrichtungen (Leitungswege und Ventile) sollten anhand detaillierter Simulationsmodelle eine Vielzahl von Varianten für die Konfiguration und Dimensionierung der Anlagen einerseits und die Gestaltung der Betriebsabläufe sowie der Um- und Ausbaustufen andererseits vor dem Hintergrund unterschiedlicher strategischer Szenarien für die Absatzentwicklung untersucht werden.

### **6.4.2 Vorgehensweise**

Der Fokus der Simulation reichte in allen Projektphasen vom Lagerkeller bis zur Abfüllung, wobei die maßgeblich betroffenen Bereiche der Filtration und Drucktanks und deren Peripherie mit erhöhtem Detaillierungsgrad abgebildet wurden. Im ersten Schritt wurde ein Basismodell für den damaligen Ist-Zustand erstellt und gegen reale Betriebsdaten validiert. Anschließend wurden über mehrere Projektstufen verschiedene Gestaltungsvarianten und Planszenarien systematisch kombiniert. Dabei wurde unter anderem die im Modell codierte Logik für die Drucktankbelegung nach den Vorgaben der Prozessspezialisten immer weiter verfeinert. Nachdem in den ersten Projektstufen eine geeignete Neukonfiguration für die Stufe Filtration definiert war, rückten anschließend das Drucktanklager und die Anbindung der zusätzlichen Drucktanks an Filter- und Abfülllinien in den Vordergrund. In diesem Kontext wurden zahlreiche Varianten untersucht, um eine optimale Gruppierung der Drucktanks zu Clustern mit gemeinsamer Anbindung zu ermitteln, durch die die Investitionskosten gegenüber einer vollständigen Einzelanbindung aller Tanks erheblich reduziert werden konnten.

Da es während der anschließenden Realisierungsphase in einigen Gewerken zu erheblichen Abweichungen vom Zeitplan kam, wurden die bereits bestehenden Simulationsmodelle erneut herangezogen, um die Effektivität provisorischer Ersatzlösungen für einen Erhalt der Produktionsleistung zu quantifizieren. Das Konfigurationsschema in Bild 90 gibt eine Vorstellung von der Komplexität des nach Clustern, Tankgrößen und hinsichtlich der Anbindung an zwei Gruppen von Abfülllinien gegliederten Drucktanklagers in einem während der Umbauphase simulierten Szenario.

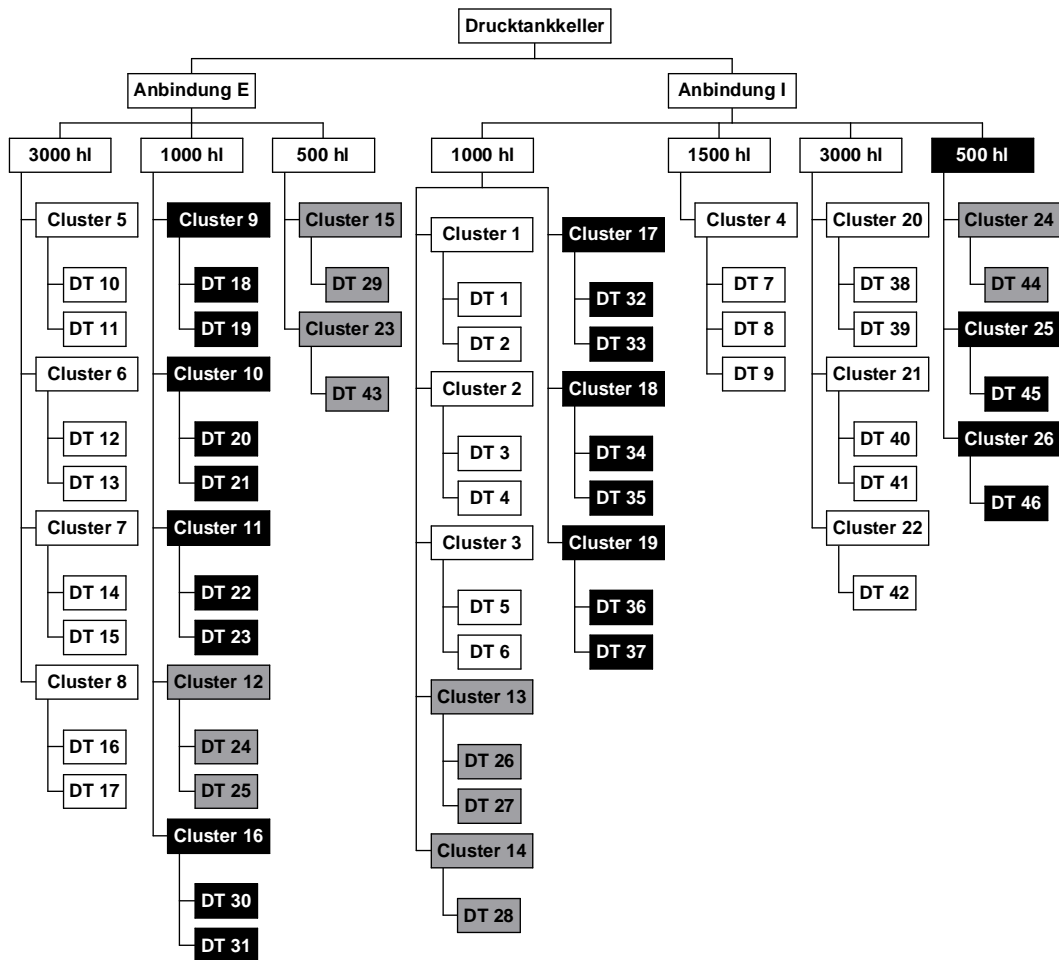


Bild 90: Überblick zur Konfiguration des Drucktankkellers während der Umbauphase (schwarz schattiert: Tank nicht verfügbar, grau schattiert: Tank teilweise verfügbar)

### 6.4.3 Simulationsergebnisse

Die Neugestaltung der Produktionsbereiche Filtration und Drucktanks samt internen und externen Transferwegen wurde von der Konzeptfindung bis zur Realisierung in einem dynamischen Dialog durch zahlreiche und umfangreiche Simulationsstudien mit wechselndem Fokus begleitet. Die Simulationsergebnisse hatten dabei wesentlichen Einfluss auf die Realisierung der mittlerweile einige Jahre in Betrieb befindlichen Anlage.

Aus einer Fülle von Material zu jeder der Projektstufen wurde mit Bild 91 nur ein Beispiel herausgegriffen, das die auch ohne ausführlichen Kontext nachvollziehbare simulierte Belegung des in Bild 90 dargestellten Drucktankkellers wiedergibt. Da der Ausschnitt des Gantt-Charts fast den gesamten Zeitraum der Statistikerfassung zeigt, wird der enge Bezug zwischen den beiden Diagrammtypen unmittelbar anschaulich.

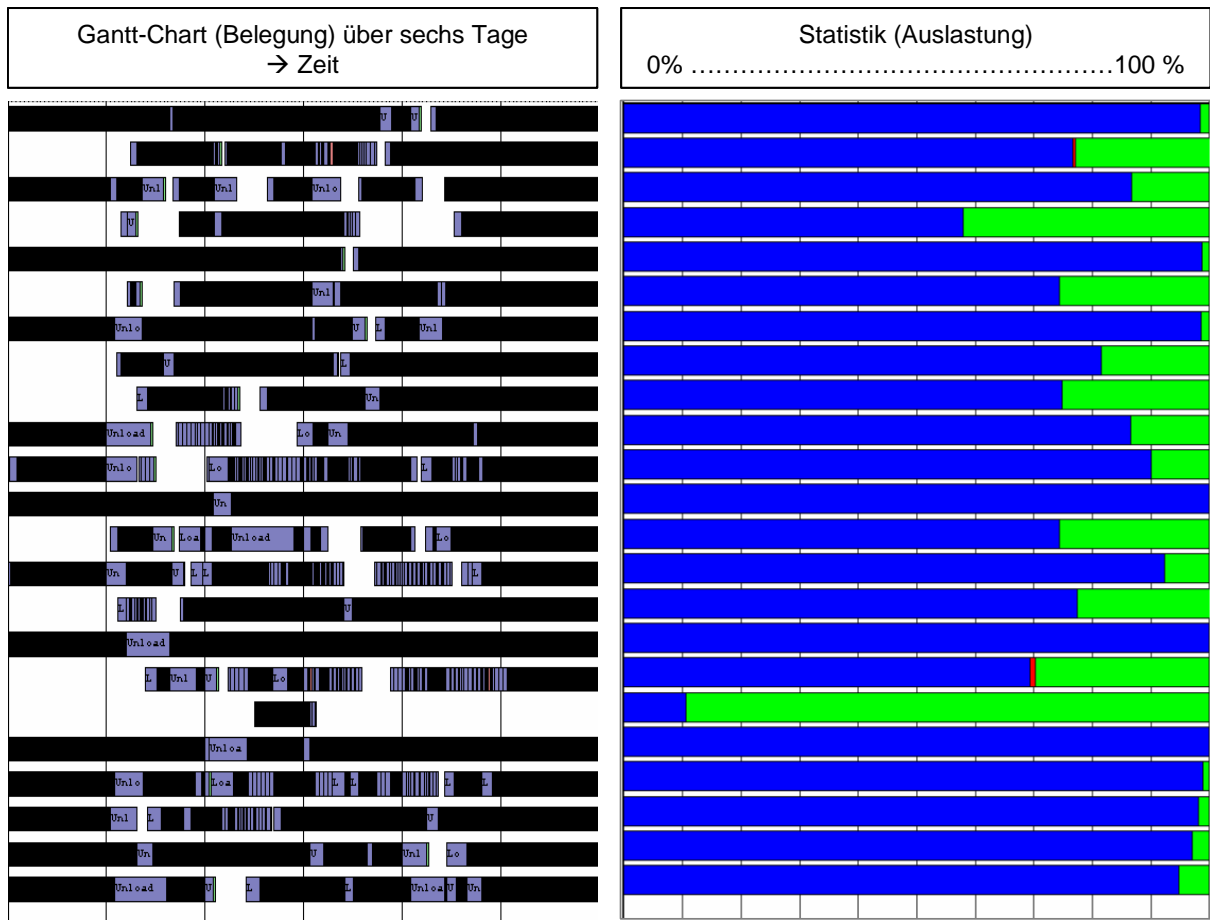


Bild 91: Gantt-Chart und Belegungsstatistik für das in Bild 90 dargestellte Drucktanklager (nur die tatsächlich aktivierten und belegten Tanks sind dargestellt)

## **7 Zusammenfassung und Ausblick**

### **7.1 Zusammenfassung**

Die prinzipielle Machbarkeit einer ereignisorientierten Ablaufsimulation von Ausschnitten der Bierherstellung konnte für unterschiedliche Aufgaben im Kontext der Anlagen- und Produktionsplanung bereits während der Anfangsphase dieser Arbeit durch Experimente und Projekte mit direktem Praxisbezug belegt werden. Ausgehend von diesem Erfahrungsschatz wurde die in Kapitel 5 diskutierte Systematik aus unterschiedlichen Modellperspektiven erstellt und durch die Entwicklung konkreter Prototypen und Beispielmodelle mit „Leben“ gefüllt. Diese Konzepte und Strukturen sind dabei überwiegend als „Destillat“ aus zuvor in der Praxis erprobten Ansätzen mit gelegentlichen Erweiterungen und Korrekturen entstanden, durch die neuen Erkenntnissen, zusätzlichen Anforderungen oder dem Entwicklungsfortschritt des vom Hersteller regelmäßig aktualisierten und erweiterten Simulationssystems Rechnung getragen wurde. In Verbindung mit den erstellten Modellkomponenten wurden vor allem für den Kontext der Tanklager aussagekräftige Kennzahlen definiert und Visualisierungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Die hier verwendeten Grundbausteine aus der Basisbibliothek des Simulationssystems eMPlant (Tecnomatix) dürften auch in vergleichbaren Produkten anderer Anbieter in ähnlicher Form zu finden sein, sodass die hier vorrangig behandelte brauereispezifische Logik im Zusammenspiel der Komponenten zumindest sinngemäß übertragbar sein sollte. Der im Zuge dieser Arbeit geschaffene Fundus an Modellansätzen für die unterschiedlichen Prozessabschnitte der Bierherstellung kann in Verbindung mit den Überlegungen zur Skala der Modellperspektiven als Grundlage für die Spezifikation und Umsetzung zukünftiger Simulationsprojekte dienen bzw. den Einstieg in eine individuelle Problemstellung beschleunigen und damit zur deren Wirtschaftlichkeit beitragen.

### **7.2 Ausblick**

Auch für den Brauereikontext greift die in der Literatur [20] [29] [53] geschilderte allgemeine Problematik bezüglich einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Simulationsstudien, die im wesentlichen darauf beruht, dass einem unausweichlichen und nicht unerheblichen Personal- und Investitionsaufwand zwar vielfältige und weitreichende Nutzenpotenziale gegenüberstehen, der tatsächliche Nutzeffekt im Einzelfall aber vorab kaum abzuschätzen und meist nicht einmal nachträglich angemessen quantifizierbar ist. Einem regelmäßigen Einsatz der Simulation im Kontext der Planung von Brauereianlagen steht dies trotz aller Fortschritte bislang jedenfalls vielfach im Weg. Dabei wäre gerade Routine eine wichtige Voraussetzung, um die erforderliche hohe Qualifikation „simulierender Planer“ oder eines spezialisierten Stabs von „planenden Simulanten“ aufzubauen, zu erhalten und nicht zuletzt auch angemessen zu verwerten.

Abschließend sei noch einmal ausdrücklich betont, dass von der Computersimulation als isoliertem Werkzeug trotz vielfältiger Gestaltungs- und Einsatzmöglichkeiten weder eine unmittelbar „problemlösende“ noch eine „hellseherische“ Wirkung bezüglich der eingangs erwähnten Unschärfen und Unsicherheiten bei der Planung erwartet werden sollte. Entsprechendes gilt für die gelegentlich beschworene Vision von einem globalen Simulationsmodell – nach dem Konzept der „Großen Vereinheitlichten Theorie“ in der Physik – mit dem sämtliche Fragen der Anlagen- und/oder Produktionsplanung von Brauereien auf Knopfdruck beantwortet werden können.

Aufgrund ständiger Fortschritte hinsichtlich der Komplexität der Modellstrukturen, der Leistungsfähigkeit von Optimierungsalgorithmen und der Verfügbarkeit von Rechenleistung treten primär für den operativen Einsatz konzipierte Produktionsplanungssysteme zunehmend in Konkurrenz zur Simulation als Planungswerkzeug. Vor allem bei ausgeprägter *Scheduling*-Problematik, wie sie im Brauereibetrieb vor allem zwischen Filtration und Vollgut-Lager vorliegt, sind solche meist mit heuristischen Optimierungsmethoden operierenden Werkzeuge dabei überlegen, sofern die Optimierungslogik mit angemessenem Aufwand praxisgerecht parametrisiert werden kann. Dagegen eignet sich die ereignisorientierte Ablaufsimulation innerhalb der Bierherstellung besonders für den Prozessabschnitt von der Würzproduktion im Sudhaus bis zum Lagertank, da dieser Abschnitt weitgehend druckgesteuert abläuft und selbst die dynamische Auswahl von Gär- und Lagertanks meist mit einfachen Regeln und ohne den Einsatz von Optimierungsverfahren praxisnah modelliert werden kann. Vor diesem Hintergrund wären duale oder hybride Ansätze aus Simulations- und Planungsmodellen denkbar, die die komplementären Vorzüge beider Ansätze vereinigen.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] ANSI/ISA-95.00.01-2000: Enterprise-Control System Integration. Part 1: Models and Terminology. 2000
- [2] ANSI/ISA-S88.01-1995: Batch Control, Part 1: Models and Terminology. 1995
- [3] ARNOLD, D.: Materialfluß in Logistiksystemen. 3. Aufl., Berlin, 2003
- [4] ARNOLD, U.: Stichwort: Lagerhaltung. In: Lexikon der Betriebswirtschaft. Hrsg. W. Lück.. 5. Aufl., Landsberg am Lech, 1993
- [5] BARRETT, A.: Optimize The Enterprise. <http://www.informationweek.com/789/optimize.htm>, Juni 2000
- [6] BECHMANN, F.; KEHL, H.; RÄDLER, TH.; WEISSER, H.: Computer Aided Techniques in Breweries. Zouterwoude: European Brewery Convention Technology & Engineering Forum, Report, 1998
- [7] BERNECKER, G.: Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen. 3. Aufl., Düsseldorf, 1984
- [8] BOMZE, I. M; GROSSMANN, W.: Optimierung – Theorie und Algorithmen. Eine Einführung in Operations Research für Wirtschaftsinformatiker. Mannheim, 1993
- [9] COWIE, A. P. (HRSG.): Oxford Advanced Learner's Dictionary of Current English. 4. Aufl., Oxford, 1989
- [10] DAENZER, F.; HUBER, F. (HRSG.): Systems Engineering. Zürich, 1992
- [11] DIN 19222: Leittechnik, Begriffe. Beuth, Berlin, 1985
- [12] DIN 19226: Regelungs- und Steuerungstechnik: Begriffe; Allgemeine Grundlagen. Beuth, Berlin, 1984
- [13] DIN 25424: Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen. Beuth, Berlin, 1981
- [14] DIN 28004, Teil 1: Fließbilder verfahrenstechnischer Anlagen; Begriffe; Fließbildarten, Informationsinhalt. Beuth, Berlin, 1988
- [15] DOLEZALEK, C. M.; WARNECKE, H. J.: Planung von Fabrikanlagen. 2. Aufl., Berlin, 1981
- [16] ELFNER, P.: Ein Beitrag zur Effizienzsteigerung der Datenanalyse und -aufbereitung für Simulationssysteme. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 272. Düsseldorf, 1998
- [17] FÖRSTER W.; JÄNICKE, W; THÄMELT, W.: Ende der Hierarchien. In: Chemie Technik 29 (2000), Nr. 9, S. 45-47
- [18] GERHARDT, K.: Stichwort: Planung. In: Lexikon der Betriebswirtschaft. Hrsg. W. Lück. 5. Aufl., Landsberg am Lech, 1993
- [19] GRUNDMANN, U.: Szene-Marken im Convenience Bereich. In: Brauwelt 142 (2002), Nr. 16, S. 556
- [20] GÜNZEL, U.: Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung. München, Dissertation, 1993
- [21] HARPER, D. (HRSG.): Online Etymology Dictionary. <http://www.etymonline.com>, November 2001
- [22] HEYSE, K.-U. (HRSG.): Handbuch der Brauerei-Praxis. 3. Aufl., Nürnberg, 1994
- [23] HEYSE, K.-U. (HRSG.): Praxishandbuch der Brauerei. Hamburg, Behr's, 9. Aktualisierungs-Lieferung 04/2003

- [24] INTRA, C.: Effiziente Produktionsplanung durch eine vereinfachte Ablaufsimulation. Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik. Band 2000/30. Aachen, 2000
- [25] KAHLE, E.: Stichwort: Chargenfertigung. In: Lexikon der Betriebswirtschaft. Hrsg. W. Lück. 5. Aufl., Landsberg am Lech, 1993
- [26] KAHLE, E.: Stichwort: Fertigungsprogramm. In: Lexikon der Betriebswirtschaft. Hrsg. W. Lück. 5. Aufl., Landsberg am Lech, 1993
- [27] KEHL, H.: Organisation und Technik integrierter Informations- und Kommunikationssysteme in Brauereien. Freising-Weihenstephan: TU München, Lehrstuhl für Brauereianlagen- und Lebensmittel-Verpackungstechnik, Dissertation, 1996
- [28] KOOPMANN, M.: Simulation und Optimierung von Chargenprozessen mit flexibler Anlagenstruktur. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 3 Nr. 445. Düsseldorf, 1996
- [29] KOŠTURIK, J.; GREGOR, M.: Simulation von Produktionssystemen. Wien, 1995
- [30] KUNZE, W.: Technologie Brauer und Mälzer. 7. Aufl., Berlin, 1994
- [31] KÜSTER, J.: Konzeption und exemplarische Realisierung einer objektorientierten Betriebsmittelbibliothek für die Simulation in der Produktionstechnik. Fortschritt-Berichte. VDI Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren. Nr. 152. Düsseldorf, 1995
- [32] LIEFELDT, A.; LÖHL, T.; STOBBE, M.; ENGELL, S.: Simulation and scheduling of recipe-driven batch processes based on a single data model. 1999
- [33] LÜCK, W. (HRSG.): Lexikon der Betriebswirtschaft. 5. Aufl., Landsberg am Lech, 1993
- [34] LULAY, W. E.: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen. München, Dissertation, 1999
- [35] MANGER, H.-J.: Planung von Anlagen für die Gärungs- und Getränkeindustrie. Berlin, 1999
- [36] MANGER, H.-J.; ANNEMÜLLER, G.: Die Kühlung von Gärbehältern. In: Brauwelt 136 (1996) Nr. 5, S. 2160-2170
- [37] MÄRZ, L.: Simulation als Vertriebshilfe von Anlagen. Nutzenpotentiale innovativer Planungsmethoden im Vertrieb. In: A&D NEWSLETTER. Juli/August/September 2001, S. 68-70
- [38] MICHALEWICZ, Z.; FOGEL, D. B.: How to Solve It: Modern Heuristics. Berlin, 2000
- [39] MIGNON, D.: Retrofitting and Energy Integration of Brewery Operations. Université Catholique de Louvain: Faculté des Sciences Appliquées Unités des Procédés, Dissertation, 1993
- [40] NAMUR: NE 33: Anforderungen an Systeme zur Rezeptfahrweise, 1992
- [41] NARZISS, L.: Abriß der Bierbrauerei. 6. Aufl., Stuttgart, 1995
- [42] NARZISS, L.: Die Bierbrauerei – Die Technologie der Würzebereitung. 7. Aufl., Stuttgart, 1992
- [43] NISSEN, V.: Einführung in Evolutionäre Algorithmen. Optimierung nach dem Vorbild der Evolution. Braunschweig, 1997
- [44] PAPANICOLAOU, M.: Optimierung. Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung. München, 1991

- [45] PETERSEN, H.: Brauereianlagen. Nürnberg, 1993
- [46] POLKE, M. (HRSG.): Prozessleittechnik. 2. Aufl., München, 1994
- [47] RÄDLER, TH.: Modellierung und Simulation von Abfülllinien. Freising-Weihenstephan: TU München, Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik, Dissertation, 1999
- [48] SCHARBRODT, M.: Produktionsplanung in der Prozessindustrie: Modelle, effiziente Algorithmen und Umsetzung. München: TU München, Lehrstuhl für Effiziente Algorithmen des Instituts für Informatik, Dissertation, 2000
- [49] SCHMIDT, H.-J.: Hauptgärung in der untergärigen Brauerei. In: Brauwelt 136 (1996), Nr. 13, S. 608-610
- [50] SCHMIDT, U.; KUHN, A. (Hrsg.): Angewandte Simulationstechnik für Produktion und Logistik. Dortmund, 1997
- [51] SCHÖNEBURG, E. u. a.: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien: Eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution. Bonn, 1994
- [52] SINZ, E. J.: Stichwort: Fertigungssysteme, flexible. In: Lexikon der Betriebswirtschaft. Hrsg. W. Lück. 5. Aufl., Landsberg am Lech, 1993
- [53] SKUDELNY, C.: Entwicklung eines simulationsgestützten Optimierungsmodells zur Planung Flexibler Produktionssysteme. Ein Beitrag zur Effizienzsteigerung bei der Durchführung von Planungsprojekten. Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 94,4. Aachen, 1994
- [54] SPITZ, B. M.: Rechnerintegrierte Produktion in Brauereien. Systemanalyse für den Aufbau eines produktionsspezifischen Auswertesystems auf der Basis von Datenbanktechnologie. Freising-Weihenstephan: TU München, Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik, Dissertation, 1996
- [55] STANDOP, D.: Stichwort: Produktpolitik. In: Lexikon der Betriebswirtschaft. Hrsg. W. Lück.. 5. Aufl., Landsberg am Lech, 1993
- [56] UHLIG, R.; BRUNS, M.: Automatisierung von Chargenprozessen. München, 1995
- [57] UNTERSTEIN, K.: Planung von Sudhausanlagen – Grundsatzüberlegungen (Teil 1). In: Brauwelt 146 (2006), Nr. 28, S. 837-841
- [58] UNTERSTEIN, K.: Wie viele Tanks braucht das Bier? –Teil 1: Gärungs- und Reifungsverfahren als Basis für die Ermittlung des Tankbedarfs. In: Brauwelt 146 (2006), Nr. 34-35, S. 1008-1009
- [59] UNTERSTEIN, K.: Wie viele Tanks braucht das Bier? –Teil 2: Berechnungsweise der ZKTs. In: Brauwelt 146 (2006), Nr. 37, S. 1095-1096
- [60] UNTERSTEIN, K.: Wie viele Tanks braucht das Bier? –Teil 3: Kältebedarf und CO<sub>2</sub> Rückgewinnung. In: Brauwelt 146 (2006), Nr. 40, S. 1184-1186
- [61] UNTERSTEIN, K.: Zylindrokonische Gärtanks. In: Brauwelt 132 (1992), Nr. 27, S. 1280-1285
- [62] UNTERSTEIN, K.: Kapazitätsberechnungen für Gär- und Lagerkeller. In: Brauwelt 134 (1994), Nr. 12, S. 470-476
- [63] UNTERSTEIN, K.: Entwicklung von Kenngrößen für eine systematisierte Brauereianlagenplanung. Freising-Weihenstephan: TU München, Lehrstuhl für Technische Mikrobiologie und Technologie der Brauerei II, Dissertation, 1990



- 
- [64] VAVILOV, A. A. (HRSG.): Modellierung und Simulation von Produktionsprozessen. Berlin, 1983
- [65] VDI Richtlinie 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Grundlagen. Beuth, Berlin, 2000
- [66] VEY, S.: Anlagenplanung in Brauereien und Getränkeabfüllbetrieben unter Verwenden von Standardsoftware. Freising-Weihenstephan: TU München, Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik, Dissertation, 2000
- [67] VOIGT, T.: Neue Methoden für den Einsatz der Informationstechnologie bei Getränkeabfüllanlagen. Freising-Weihenstephan: TU München, Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittel-Verpackungstechnik, Dissertation, 2004
- [68] WILDEMANN, H.; SCHMIDT, K.-J.: Stichwort: Produktion In: Lexikon der Betriebswirtschaft. Hrsg. W. Lück. 5. Aufl., Landsberg am Lech, 1993
- [69] WÜRTH, H. J.: Produktionsplanung in der Getränkewirtschaft. In: Brauwelt 142 (2002). Nr. 8, S. 250-273
- [70] WÖHE, G.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 18. Aufl., München, 1993
- [71] ZAHN, E.: Stichwort: Produktionsplanung. In: Lexikon der Betriebswirtschaft. Hrsg. W. Lück. 5. Aufl., Landsberg am Lech, 1993