



DISSERTATION

Modellbildung und Simulation in der Produktion eines Pharmakonzerns

**Optimierung und Analyse der praktischen Anwendbarkeit
computerunterstützter Simulation in der Praxis**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften
unter der Leitung von

o. Univ. Prof. i. R. Dipl. – Ing. Dr. Peter Fleissner

E-187

Institut für Gestaltungs- und Wirkungsforschung

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Wirtschaftsinformatik

von

Mag. Christian Piffer

Matr. Nr. 9915997

Speisingerstrasse 221, 1230 Wien

Wien, im September 2009

Danksagung

Beginnen möchte ich mit den Personen, denen meine Dissertation gewidmet ist, mit meiner Familie. Ohne die grenzenlose und uneingeschränkte Unterstützung meiner Frau Ilona, die sich um unsere Kinder Lena und Fabian und um meine Motivation gekümmert hat, und ohne meine Eltern, die mir immer eine Stütze waren, wäre ich nicht in der Position, in der ich heute glücklicherweise bin.

Ein besonderes Dankeschön gebührt meinem wissenschaftlichen Doktorvater o. Univ. Prof. i. R. Dr. Peter Fleissner. Er entfachte durch seinen Themenvorschlag mein in den Folgejahren wachsendes Interesse im Gebiet der Computersimulation. Weiters möchte ich mich für seine Geduld und seine Ausdauer bedanken.

Die praktische Durchführung dieses Projektes wäre nicht möglich gewesen, ohne die Bereitschaft der Octapharma Pharmazeutika Produktionsgesellschaft mit beschränkter Haftung und der intensiven Unterstützung durch Hrn. Dr. Volker Weimar.

Wien im September 2009,



Christian Piffer

Publikationserlaubnis

Diese Arbeit wurde in enger Zusammenarbeit mit der Octapharma erstellt. Daher wurde das vertrauliche Wissen aus der Dissertation entfernt oder stark verallgemeinert dargestellt.

Geschlechtsneutrale Formulierung

Aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit wird auf die geschlechtsspezifische Differenzierung, zum Beispiel BenutzerInnen, verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für beide Geschlechter.

Kurzfassung

Schlüsselworte: Modellbildung, Simulation, Pharmaindustrie, Produktionsprozesse, Systemanalyse

Die Aktualität des Themas Simulation ist nach wie vor in vielen Bereichen unserer Gesellschaft gegeben. Gerade in Zeiten wirtschaftlicher Krisen, gilt es Ursachen-Wirkungsprinzipien auszuloten und möglichst gute Prognosen über Veränderungsmöglichkeiten und Optimierungsmaßnahmen für Unternehmen und staatliche Systeme zu erstellen.

Das zentrale Forschungsziel dieser Arbeit ist, einen Teil eines komplexen pharmazeutischen Produktionsprozess als Simulationsmodell abzubilden und anhand der Ergebnisse die Anwendbarkeit und den Nutzen für das Unternehmen aus pragmatischer Sicht abzuleiten.

Nach der Aufarbeitung der wesentlichen wissenschaftlichen Grundlagen im Simulationsbereich, wird die Herstellung der Fraktion II-Paste simuliert. Die Fraktion II-Paste stellt ein aufwendig bereinigtes Proteinzwischenprodukt dar, welches aus menschlichem Blutplasma gewonnen wird und für andere Produkte der Octapharma als Grundlage dient.

Im ersten Schritt wird über eine Situationsanalyse das Umfeld des Simulationsprojektes erörtert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis für die Zielformulierung, den konzeptionellen Modellentwurf und die Planung der Experimente.

In der darauf folgenden Modellentwicklung in AnyLogic werden iterativ die Schritte der Verifizierung und Validierung zur Überprüfung des Simulationsmodells, beziehungsweise zur Fehlerbehebung, verwendet. Nach einer abschließenden Gesamtmodellvalidierung ist die Richtigkeit und Gültigkeit für das erstellte Simulationsmodell sichergestellt.

Aufbauend auf dem validierten Modell kann eine variantenreiche Simulation die verschiedenen Szenarien der Produktion durchspielen und so helfen, Optimierungen aufzufinden. Anhand des Simulationsmodells des Produktionsprozesses werden durch Experimente planerische und optimierungsrelevante Fragen beantwortet.

Im letzten Schritt, der Interpretation, wird eine allgemeine Modellanalyse anhand des Simulationsmodells im definierten Gültigkeitsbereich durchgeführt und anhand der

Experimente die prognostische und dynamische Gültigkeit diskutiert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei den hier gezeigten Ergebnissen für den Produktionsprozess das Modell nicht mit dem realen System verwechselt oder gar als gleichwertig angesehen werden darf. Die Brauchbarkeit für die Produktion in Pharmaunternehmen ist trotzdem eindeutig gegeben, als Ergebnis dieser Arbeit festgehalten und ausreichend analysiert worden.

Um den maximalen Nutzen für das Unternehmen zu erreichen, ist es jedoch erforderlich nicht nur Teilbereiche, sondern die gesamte Produktionslandschaft in Simulationsmodellen abzubilden (besonders wenn die Produktionsprozesse nicht unabhängig von einander ablaufen!).

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG.....	9
2. GRUNDLAGEN.....	11
2.1 BEGRIFFSSYSTEM UND DEFINITIONEN	13
2.1.1 Systeme.....	13
2.1.2 Modelle	17
2.1.3 Simulation	23
2.2 MODELLBILDUNG UND SIMULATION	27
2.3 ABLAUF VON SIMULATIONSSTUDIEN	32
2.3.1 Problemdefinition	34
2.3.2 Projektplan und –ziele	34
2.3.3 Modellentwurf	35
2.3.4 Datenerhebung.....	36
2.3.5 Modellimplementierung.....	39
2.3.6 Modellverifikation	40
2.3.7 Modellvalidierung.....	41
2.3.8 Simulation.....	43
2.3.9 Ergebnisanalyse	44
2.3.10 Dokumentation und Berichterstattung	44
2.3.11 Implementierung	45
2.4 ANWENDUNGSGEBIETE DER SIMULATION	47
2.5 VOR- UND NACHTEILE DER MODELLBILDUNG UND SIMULATION	50
2.6 ELEMENTE ZEITDISKRETER SIMULATION	55
2.7 STATISTISCHE VERFAHREN UND ZUFALLSZAHLEN.....	58
2.8 SIMULATIONSSOFTWARE	61
2.8.1 AnyLogic.....	64
2.8.1.1 Aktive Objekte	67
2.8.1.2 Struktur Diagramm	67
2.8.1.3 Ports.....	68
2.8.1.4 Variablen.....	68
2.8.1.5 Parameter	68
2.8.1.6 Connectoren.....	68
2.8.1.7 Messages.....	68

2.8.1.8	<i>Datenanbindung und Datenprotokollierung mit Microsoft Excel</i>	69
3.	METHODISCHER ABLAUF	80
3.1	ZIELSUCHE	82
3.1.1.	<i>Problemstellung</i>	82
3.1.2.	<i>Ziele und Hypothesen</i>	83
3.1.3.	<i>Projektmanagement</i>	85
3.1.4.	<i>Situationsanalyse</i>	85
3.1.5.	<i>Softwareauswahl</i>	91
3.2	MODELLENTWICKLUNG	94
3.2.1	<i>Datenerhebung</i>	94
3.2.2	<i>Datenanalyse</i>	95
3.2.2.1	<i>Produktionsdauer</i>	97
3.2.2.2	<i>Tanks</i>	98
3.2.2.3	<i>Filterpresse</i>	98
3.2.2.4	<i>Cryopoor Plasma</i>	99
3.2.2.5	<i>Fraktion I+II+III-Paste</i>	104
3.2.2.6	<i>Paste-II-Fraktion</i>	107
3.2.2.7	<i>pH-Wert</i>	110
3.2.2.8	<i>Ethanol, Natrium, WFI, und andere</i>	110
3.2.3	<i>Modellentwicklung</i>	111
3.2.3.1	<i>Operationalisierung der Daten und Abläufe</i>	111
3.2.3.2	<i>Umsetzung in AnyLogic</i>	113
3.2.4	<i>Modellverifizierung</i>	133
3.2.5	<i>Modellvalidierung</i>	135
3.3	SIMULATION	142
3.3.1	<i>Simulationsmodell</i>	142
3.3.2	<i>Experimente</i>	147
3.3.2.1	<i>Kapazitätsschätzung einer neuen Anlage</i>	147
3.3.2.2	<i>Kapazitätsverdopplung</i>	148
3.3.3	<i>Interpretation</i>	150
4.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUßFOLGERUNG	153
5.	AUSBLICK	155
	LITERATURLISTE	156

VERZEICHNIS DER WEBRESSOURCEN	157
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	158
ANHANG: SIGNIFIKANZTABELLE UND KORRELATION	163
LEBENS LAUF	164

1. Einleitung

In den vergangenen Jahren konnten Wissenschaftler mit Hilfe der computergestützten Simulation in den Bereichen Natur, Technik und Gesellschaft komplexe Zusammenhänge besser verstehen und analysieren. Dies wurde möglich, da Simulation immer öfter das konkrete Experiment mit der Natur und die klassische Theoriebildung durch virtuelle Experimente am Computer ablöst und den Brückenschlag zwischen Informatikmethodik und dem jeweiligen Anwendungsgebiet ermöglicht.

Anwendungsbeispiele findet man täglich in von Form spielerisch anmutenden Flugsimulatoren, die aber für die Sicherheit der Luftfahrt eine zentrale Bedeutung besitzen, oder Wetterprognosen bis hin zu wirtschaftlichen und demografischen Veränderungsprozessen.

Computergestützte Simulation wird in den letzten Jahrzehnten eingesetzt, um Analysen und Vorhersagen eines Systems durchzuführen und operative oder ressourcenspezifische Entscheidungen zu treffen.

Durch die Möglichkeit, tausende Einflussparameter berücksichtigen zu können, gibt es kaum eine Branche, in der Simulation nicht eingesetzt werden kann. Selbst politische, militärische, wirtschaftliche und soziale Entscheidungen lassen sich mit Hilfe von Modellbildung und Simulation studieren. Diese Möglichkeiten fördern die engen Beziehungen zwischen Modellierung, Simulation und Operations Research.

Auch in der Pharmaindustrie werden schon seit längerem Simulationen eingesetzt, vor allem in der Pharmakologie¹ und in der Pharmakokinetik². Motive dafür sind mögliche Kosteneinsparungen und der Wunsch nach einem besseren Verständnis der Wirkungen von Medikamenten im menschlichen Körper.

1 Die *Pharmakologie* (von gr. pharmakon - Arzneimittel, logos - Lehre) beschäftigt sich mit der Wirkung von Arzneimitteln im menschlichen oder tierischem Körper. Sie wird allgemein in zwei Hauptbereiche unterteilt: der Pharmakodynamik und der Pharmakokinetik.

2 Die *Pharmakokinetik* beschreibt den zeitlichen Verlauf von Arzneistoffkonzentrationen im Organismus, d.h. in verschiedenen biologischen Flüssigkeiten und Geweben. Sie beinhaltet die Prozesse der Resorption, der Verteilung, der Metabolisierung und die der Elimination.

Das Forschungsziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe computerbasierter Simulation einen komplexen Produktionsprozess in einem Pharmaunternehmen abzubilden. Anhand der Ergebnisse der Simulationsdurchläufe soll auf die Anwendbarkeit und den Nutzen von Modellbildung und Simulation in der Produktion des Pharmaunternehmens geschlossen werden.

Um dies zu prüfen, wird ein spezieller Herstellungsprozess des Pharmaunternehmens Octapharma simuliert. Die Simulation des Herstellungsprozesses ist dabei die Ausgangslage, um durch Experimente mit der Simulation Lösungen für planerische Fragen im Produktionsbereich zu finden und möglichst valide³ Prognosen über das Ergebnis unterschiedlicher Produktionsvarianten zu erhalten.

Die Vor- und Nachteile, welche sich aus den Simulationsergebnissen abschätzen lassen, werden hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit für das Unternehmen analysiert. Danach stellen sich folgende Fragen: Inwieweit kann Simulation in komplexe und nicht immer idente Produktionsabläufe sinnvoll integriert werden? Wo sind Ansätze für Simulation, die dem Unternehmen einen Mehrwert bringen und wo sind ihre Grenzen? Die Antworten auf diese Fragen werden im dritten Teil der Arbeit, der Analyse der Ergebnisse, diskutiert.

³ *Validität* [lateinisch] die, Gültigkeit eines wissenschaftlichen Versuchs oder eines Messverfahrens. Die Validität gibt den Grad der Genauigkeit an, mit dem ein Verfahren das misst, was es messen soll. [Quelle: Der Brockhaus: in 15 Bänden. Permanent aktualisierte Online-Auflage. Leipzig, Mannheim: F.A. Brockhaus 2002-2007. © Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim, besucht am 01.08.07]

2. Grundlagen

Menschen haben von jeher in Denkmodellen Pläne gemacht, durchdacht, mitgeteilt, diskutiert, verändert, in die Tat umgesetzt oder verworfen. Modelle sind demnach ein wesentlicher Teil unserer Erfahrungswelt [vgl. Bossel 92]. Modelle sind Hilfsmittel zum rationalen Umgang mit der Realität. Ein Simulationsmodell ist ein spezielles Modell, dessen Gegenstand, Inhalt und Darstellung für Zwecke der Simulation konstruiert wird⁴.

Die Welt beinhaltet ein großes, nicht überschaubares Netz von komplexen Beziehungen zwischen einzelnen Objekten. Um dieses komplexe Gefüge besser verstehen zu können, grenzt der Mensch Teile ab und bezeichnet sie als System. Um Folgen, welche durch Eingriffe in Systeme entstehen, abschätzen zu können, benötigt man detailliertes Wissen über die Eigenschaften einzelner Objekte, sowie über deren strukturelle Beziehungen zueinander. Man unterscheidet daher zwischen Detailwissen und Strukturwissen. Erst diese Unterscheidung des Wissens hilft uns, konkret Einfluss auf das zu untersuchende Verhalten von Systemen zu nehmen, da die strukturellen Beziehungen das Ablaufgeschehen beschreiben und durch das Detailwissen eine genaue Gewichtung und Interpretation der jeweiligen Funktion möglich wird.

Die Systemanalyse als Wissenschaft hat das Ziel, komplexe Systeme systematisch und ganzheitlich zu untersuchen, sowie mögliche Handlungsmaximen und Handlungsalternativen mit den damit verbundenen Auswirkungen auf das jeweilige System zu erörtern.

Um gezielt Informationen über ein System zu erhalten, ist es sinnvoll, die Untersuchungen und Experimente nicht am realen System vorzunehmen, sondern an

⁴ Simulation [lat. »Vorspiegelung«] die, -/en, Wissenschaft und Technik: die modellhafte Darstellung oder Nachbildung bestimmter Aspekte eines vorhandenen oder zu entwickelnden kybernet. Systems oder Prozesses, insbesondere auch seines Zeitverhaltens. Die Simulation erlaubt Untersuchungen oder Manipulationen, deren Durchführung am eigentl. System zu gefährlich, zu teuer oder unmöglich ist. [Quelle: Brockhaus Naturwissenschaft und Technik. Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim und Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 2003]

einem validen Modell. Das Modell muss die wesentlichen Eigenschaften des zu analysierenden Systems besitzen, jedoch mit einer reduzierten bzw. einer auf die problemrelevanten Eigenschaften des Originals beschränkten Komplexität. Häufig ermöglicht erst die Vereinfachung, das System mit seinen Zusammenhängen zu verstehen und zu untersuchen.

2.1 Begriffssystem und Definitionen

Im Folgenden werden die Begriffe System, Modell und Simulation präzisiert, da erst ihr genaues Verständnis zu einer realistischen Anwendung auf der Ebene der Simulation führt.

2.1.1 Systeme

Viele Objekte der Realität bezeichnen wir als System. Aber nicht alles in unserer Umwelt ist ein System. Daher unterscheiden wir anhand folgender Merkmale, ob ein Objekt ein System ist oder nicht [vgl. Bossel 92, S.35]:

1. Das Objekt erfüllt eine bestimmte Funktion, die den Systemzweck definiert.
2. Das Objekt besteht aus Systemelementen und deren Verknüpfungen (Relationen), die seine Funktion bestimmen (Systemstruktur).
3. Das Objekt verliert seine Systemidentität, wenn seine Systemintegrität zerstört wird. Das heißt, es existieren Elemente und Relationen in diesem Objekt, deren Entfernung die Erfüllung des ursprünglichen Systemzwecks nicht mehr erlauben würde.

Ein Tisch verfügt über einen Systemzweck, eine zielgerichtete Funktion oder Verhalten, und eine Systemstruktur, Elemente mit entsprechenden Wirkungsbeziehungen, und ist folglich ein System. Das Abtrennen bestimmter Elemente (z.B.: dreier Beine) führt zu einer Zerstörung der Systemintegrität. Das heißt, der ursprüngliche Systemzweck wird nicht mehr erfüllt.

Ein Gewichtsstein (wie ein Gewicht bei alten Waagen) hingegen besitzt zwar einen Systemzweck, nämlich das Feststellen von Gewichten anderer Objekte. Auch besitzt er eine Identität, die durch eine Halbierung zerstört werden würde. Der Gewichtsstein besteht (für die Zwecke dieser Betrachtung) aber aus einem einzigen Element ohne irgendwelche Relationen (vgl. Punkt 2).

J.W. Forrester beschreibt ein System als eine Menge miteinander in Beziehung stehender Komponenten, die zu einem gemeinsamen Zweck interagieren. [J. W. Forrester (1972), S.9ff] Das heißt, für Bossel ist auch die Systemidentität ein wesentlicher Faktor, während für Forrester der Zweck und die zugehörige Systemstruktur zur Definition des Systems ausreichen.

Systeme haben eine Umwelt oder eine Systemumgebung, deren Objekte auch als äußere Einflussfaktoren auf die Systeme einwirken können. Ebenso können Objekte in Systemen Auswirkungen auf ihre Umwelt haben.

Für die Systemanalyse ist es wichtig, Systemgrenzen zu definieren, die das System klar von seiner Umwelt abgrenzen. Die Grenzziehung hängt in erster Linie von dem zu Grunde liegenden Beschreibungszweck ab. Es gilt eine Grenze zu finden, in der sich das System in relativer Autonomie verhalten kann und gleichzeitig den Ansprüchen seines Entwicklers genügt. Hat man ein System identifiziert, wendet man daher immer auch subjektive Kriterien an, nach denen man seine Beobachtungen bewertet und ordnet. Dadurch ist ein System auch von der Sichtweise seines Entwicklers geprägt.

In der Systemanalyse bestehen große Freiheitsgrade⁵, denn die untersuchten Systeme werden problemabhängig definiert, und weniger interessierende Erscheinungen im Vorhinein ausgeklammert. Das hat zur Folge, dass unnötige Elemente, die zu einer Erhöhung der Komplexität führen würden, weggelassen und dadurch nur jene spezifischen Bereiche zweckmäßig analysiert werden.

Das Innenleben eines Systems besteht aus Elementen, die als unterteilbare Komponenten, so genannte Teilsysteme, oder als nicht mehr unterteilbare Komponenten definiert sind. Für die Analyse des Systems bietet es sich an, die bereits vorhandene Modularität, z.B. die Tischplatte und die dazugehörenden Tischbeine, des realen Systems beizubehalten, um die jeweiligen Teilsysteme und ihr Verhalten auf Veränderungen von außen zu untersuchen. Wenn man die Wirkungsstruktur des Zusammenspiels der Elemente untereinander erarbeitet hat, kann man das Verhalten des Gesamtsystems besser verstehen, sowie kritische Parameter und Problemstellen leichter auffindig machen.

Kann man Systeme und Teilsysteme auf verschiedenen Ebenen unterscheiden, spricht man von einer Hierarchie der Systeme. Das heißt, es lassen sich

⁵ Ein *Freiheitsgrad* steht allgemein für die Befähigung eines Systems, sich gegenüber einer bestimmten Anzahl von Größen, welche der Anzahl der Freiheitsgrade entspricht, unabhängig zu zeigen. Das heißt, das System ermöglicht es einer bestimmten Anzahl von Größen, unabhängig voneinander zu variieren, und legt diese nicht von vornherein fest. [<http://de.wikipedia.org/wiki/Freiheitsgrad> (besucht am 11.02.06)]

übergeordnete und untergeordnete Systeme zuweisen. Je nach Komplexität können Systeme mehrere Hierarchiestufen beinhalten. Diese sorgen durch ihre Modularität dafür, dass komplexe Systeme transparenter und überschaubarer werden.

Die untergeordneten Teilsysteme regeln im Normalfall ihre Prozesse selbständig. Nur wenn Systeminputs das normale Verhalten des Teilsystems aus dem Gleichgewicht⁶ werfen, müssen diese mit dem übergeordneten System abgeglichen werden, um wieder eine gleichgewichtige Lösung zu finden. Ebenso kann eine Veränderung des übergeordneten Systems eine Anpassung eines Teilsystems veranlassen, was zu einer lokalen Lösung des Problems führen würde.

Den verschiedenen Elementen, Systemen und Teilsystemen verschiedener Ebenen können Attribute, also gewisse Eigenschaften, zugeordnet werden. Veränderliche Eigenschaften werden als Zustandsvariablen bezeichnet und die verschiedenen Ausprägungen dieser Eigenschaften als Werte der Zustandsvariablen. Genauer sind Zustandsvariablen als diejenigen Größen definiert, aus denen sich zu jeder Zeit der Zustand des Systems vollständig abbilden lässt. Jedes System ist durch eine ganz bestimmte Anzahl von Zustandsvariablen definiert, diese Zahl ist die so genannte Dimensionalität des Systems. Diese Zahl entspricht auf der mathematischen Ebene der Anzahl der Differential- oder Differenzgleichungen, welche die Zustandsänderungen des Systems beschreiben. Daraus ergibt sich, dass die Werte, welche die Zustandsvariablen im Lauf der Zeit annehmen, so genannte Zustandsfolgen, das Verhalten des Systems darstellen. [vgl. Page 91, S.2]

Damit ein System überhaupt ein Verhalten besitzen kann, müssen seine Elemente eine Wirkungsstruktur untereinander besitzen und externe oder interne Inputs bekommen. Die Wirkungsstruktur selbst besteht aus Beziehungen, die mathematisch durch zwei- oder mehrstellige Relationen dargestellt werden. Für das Systemverhalten sind dafür speziell Interaktionsbeziehungen von Bedeutung. Eine solche Beziehung liegt dann vor, wenn der Zustand eines Elements den Zustand eines anderen Elements kausal beeinflusst. Die Komplexität eines Systems ist daher

⁶ **Gleichgewicht**, *Physik*: Zustand eines Körpers oder Systems, bei dem wesentliche Größen zeitlich konstant sind und/oder Wirkung und Gegenwirkung sich aufheben. [Quelle: Der Brockhaus in einem Band. 9., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Mannheim: Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus 2002.]

durch die Anzahl der Elemente und ihrer Beziehungen bestimmt.

Je nach der Art der Beziehung eines Systems zu seiner Umgebung unterscheidet man offene und geschlossene Systeme. Offene Systeme haben mindestens eine Interaktionsbeziehung zu einem umgebenden System - zum Beispiel durch Systemeingang oder Systemausgang. Geschlossene Systeme hingegen haben keine Interaktionsbeziehungen zu anderen Systemen. Das Verhalten des Systems ist somit unabhängig von äußeren Einflüssen, sprich autonom.

Für die Analyse von realen Systemen bietet es sich an, gedanklich geschlossene und dadurch überschaubarere Systeme zu definieren, obwohl sie an sich immer offen sind. Ob man eine solche Vereinfachung zulassen kann oder nicht, hängt von der zu analysierenden Problemstellung ab.

Weiters kann man Systeme bezüglich ihres Verhaltens in der Zeit in statische und dynamische Systeme unterteilen. Bei dynamischen Systemen ändert sich der Zustand im Zeitverlauf, bei statischen nicht. Auch hier entscheidet das Subjekt, das die Abgrenzung des Systems vornimmt, wie es das System sehen will.

Die dynamischen Systeme lassen sich in kybernetische und nichtkybernetische Systeme einteilen. Die Relationen eines kybernetischen Systems enthalten Schleifen, also Rückkoppelungen.

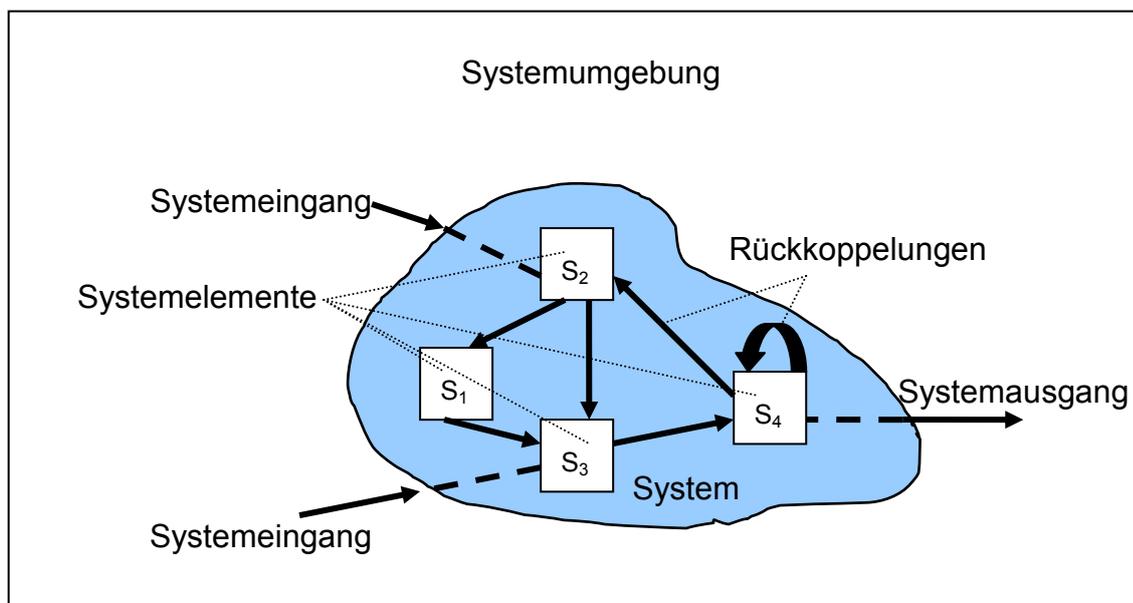


Abbildung 1: Grundlegende Systembegriffe, [Bossel, 1989, S. 11]

2.1.2 Modelle

"All models are wrong, but some are useful" [George Box]

In der Simulation wird nicht am System selbst experimentiert, sondern lediglich an einem zugehörigen Modell. Bei einem Modell handelt es sich um ein Abbild eines Systems, welches jene Eigenschaften des Systems enthalten soll, die für das zu untersuchende Problem von Bedeutung sind.

Nach Stachowiak [Allgemeine Modelltheorie, 1973] ist der Begriff Modell durch die drei Merkmale Abbildung, Verkürzung und Pragmatismus beschrieben. Das Abbildungsmerkmal besagt, dass ein Modell immer das Abbild von etwas, von einem Original, das selbst wieder ein Modell sein kann, ist. Die Abbildung wird durch eine Zuordnung zwischen Attributen des Modells und denen des Originals realisiert. Durch die Verkürzung (Abstraktion) werden relevante, also entscheidende Eigenschaften des Originals erfasst. Dafür muss der Modellersteller Kenntnis über alle Attribute des Modells und des Originals besitzen. Zuletzt beschreibt das pragmatische Merkmal die Zuordnung von Modell und Original durch die Fragen „Für wen ist das Modell bzw. wer ist der Modellnutzer?“, „Welches Original wird durch das Modell repräsentiert? (auch zeitlich: Wann?)“ und „Was ist der Zweck des Modells?“, da ein Modell immer von einem erkennenden oder modellbenutzenden Subjekt, innerhalb einer gewissen Zeitspanne, zu einem ganz bestimmten Zweck für ein Original eingesetzt wird. [vgl. W. Dangelmaier 2001, S.11-12]

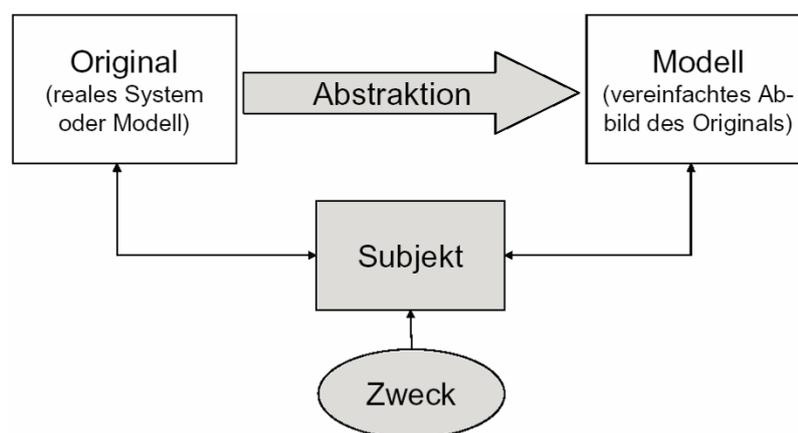


Abbildung 2: Allgemeine Modelltheorie [Stachowiak, 1973]

Modelldefinitionen

„Modelle sind materielle oder immaterielle Systeme, die andere Systeme so darstellen, dass eine experimentelle Manipulation der abgebildeten Strukturen und Zustände möglich ist.“ [Niemeyer 77, S.57]

"Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild. Es wird genutzt, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung mittels direkter Operation am Original nicht mehr möglich oder zu aufwendig wäre." [VDI Richtlinie VDI 3633 (Dezember 93)]

Niemeyer führt eine sehr allgemeine Definition für materielle und immaterielle Modelle an. Die Kernaussage liegt darin, dass Modelle Systeme sind, die andere Systeme darstellen. Die Darstellung soll eine experimentelle Manipulation der abgebildeten Strukturen und Zustände ermöglichen. Die VDI Richtlinie hingegen gibt einen genauen Rahmen vor, durch welche Gesichtspunkte ein Modell sich von einem (Original-) System unterscheidet und welche wichtigen Parameter berücksichtigt werden müssen. So werden *untersuchungsrelevante Eigenschaften* eines Untersuchungsziels in Abhängigkeit vom realen System gesehen. Das Modellziel ist als eine *bestimmte Aufgabe* definiert, deren Durchführung am realen System nicht möglich ist oder zu aufwendig wäre.

Zusammenfassend kann man sagen, dass ein Modell ein Abbild und gleichzeitig ein subjektiver Entwurf eines realen Systems oder Teilsystems ist, wobei ein Modell immer eine vereinfachte, abstrakte Abbildung des realen Bezugssystems ist. Durch die Abstraktion, welche in Bezug zu den charakteristischen (wichtigen) Eigenschaften des realen Systems stehen muss, besitzt das Modell eine auf das Untersuchungsziel eingeschränkte Gültigkeit des Originalsystems. Der Grad der Vereinfachung⁷ bestimmt dabei meist die Genauigkeit des Modells, folglich gibt es keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Ein Modell ist viel mehr eine Sicht auf das System von vielen,

⁷ [vgl. Banks 98, S.6] Das Modell sollte komplex genug sein, um die gestellten Fragen zu beantworten, aber nicht komplexer.

wobei die subjektive Sicht des Modellentwicklers und seiner wissenschaftlichen Disziplin meist in der Abbildung dominieren. Wichtig ist, dass ein Modell für den definierten Ausschnitt eine gültige, sprich valide, Aussagekraft besitzt. Ist dies nicht der Fall, so muss solange ein Anpassungskreislauf stattfinden, bis das Modell die auf das Modellziel abgestimmte Gültigkeit besitzt.

Je nach Aufgabenstellung können von einem System durchaus mehrere Modelle mit verschiedenen Schwerpunkten oder Sichtweisen vorhanden sein.

Ein Modell kann und soll in der Regel nicht alles erfassen, was im realen System an Relationen vorhanden ist. Dadurch wird die Transparenz und Beherrschung von komplexen Systemen⁸ vereinfacht und oft überhaupt erst möglich.

Modellklassifikationen

Nach Page können mathematische Modelle nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden [vgl. Page 91, S.4-7]:

- **Nach der Art der Untersuchungsmethode** - unterscheidet man *analytische Modelle* und *Simulationsmodelle* (in Abbildung 3 algorithmische Modelle genannt). Analytische Modelle sind einerseits wegen ihrer mathematischen Beschränkungen auf Systeme mit relativ geringer Komplexität begrenzt, andererseits erlauben sie es, durch ein vorhandenes Gleichungssystem die existierenden Relationen eines Systems direkt zu ermitteln. *Simulationsmodelle* errechnen ihre Ergebnisse und Zwischenergebnisse Schritt für Schritt und oft nach vielen Durchläufen als eine mögliche Interpretation des Originals. Vorteilhaft sind hierbei die Transparenz des Systemverhaltens und die Möglichkeit, jegliche Teilergebnisse mit Blick auf das gesamte System interpretieren zu können.

⁸ Die Komplexität hängt von der Anzahl der Systemelemente und deren Beziehungen (kausale Beeinflussungen) untereinander (Verflechtungsgrad) ab.

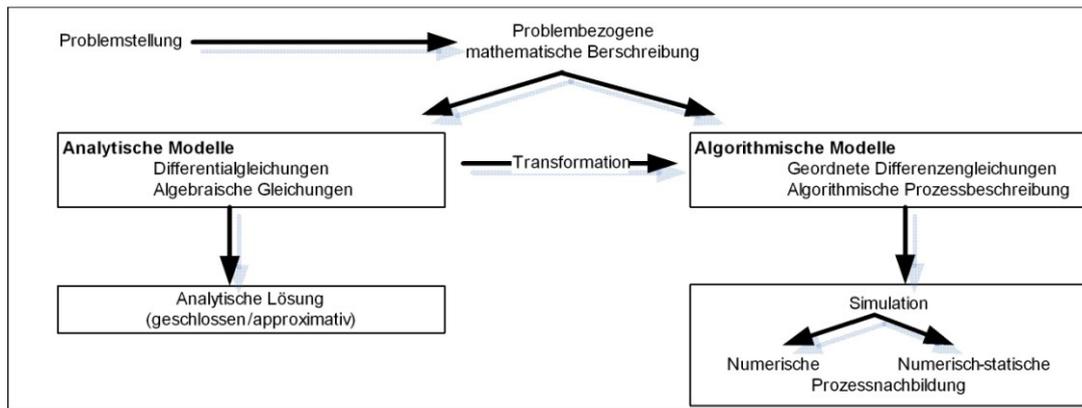


Abbildung 3: Modellierung / Simulation [Biethahn 99, S.51]

- **Nach dem Abbildungsmedium** – gestaltet sich eine breite Palette von verschiedenen möglichen Modellen: Vom einfachen Wortmodell, welches im Allgemeinen die erste umgangssprachliche Formulierung des Wissens über Struktur und Funktion des Systems darstellt [vgl. Bossel 04, S.26], über materielle Modelle, bis hin zu komplexen mathematischen Simulationsmodellen. Abbildung 2 zeigt eine Klassifikationsmöglichkeit von Modellen und Untersuchungsmethoden:

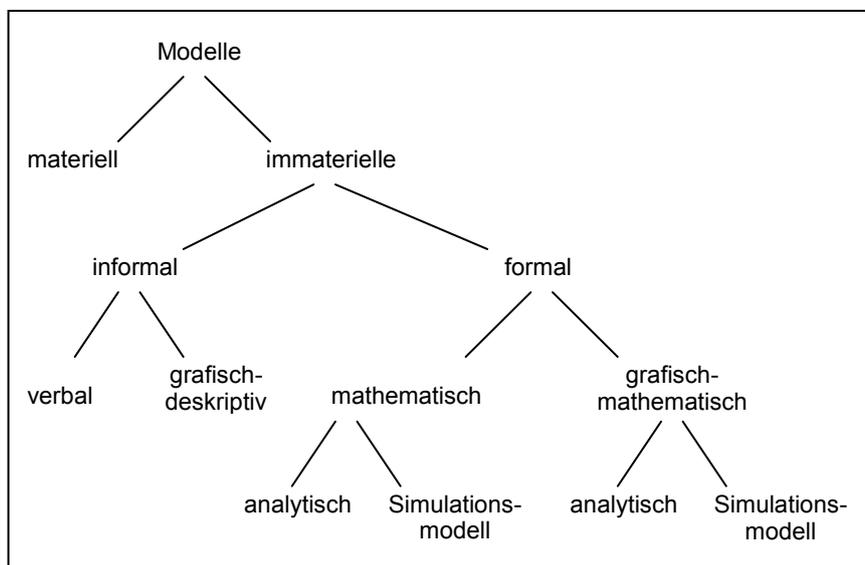


Abbildung 4: Klassifikation nach Abbildungsmedium [Page 91, S.5]

- **Nach der Art der Zustandsübergänge** – klassifiziert Page statische Modelle und dynamische Modelle. Statische Modelle kommen ohne Zustandsänderungen aus, für dynamische Modelle hingegen ist die explizite Berücksichtigung mehrerer

Perioden der Zustandsänderung kennzeichnend. Weiters lassen sich dynamische Modelle in *kontinuierliche* und *diskrete* unterteilen, wobei, wie bereits weiter oben erwähnt, die Zustandsvariablen im kontinuierlichen Fall durch eine Gleichung beschrieben werden, die stetig in der Zeit ist, und im diskreten Fall durch konkrete Werte, die den Zustand eines Systems explizit als Zahl festlegen (das kann natürlich auch eine Gleichung sein, z.B. eine Differenzengleichung). Eine weitere Unterteilung in *deterministische* und *stochastische* Modelle legt fest, ob das Verhalten eines Modells durch seine Inputs eindeutig bestimmt (streng deterministisch) oder durch Zufälle, die mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen auftreten, festgelegt ist (stochastisch).

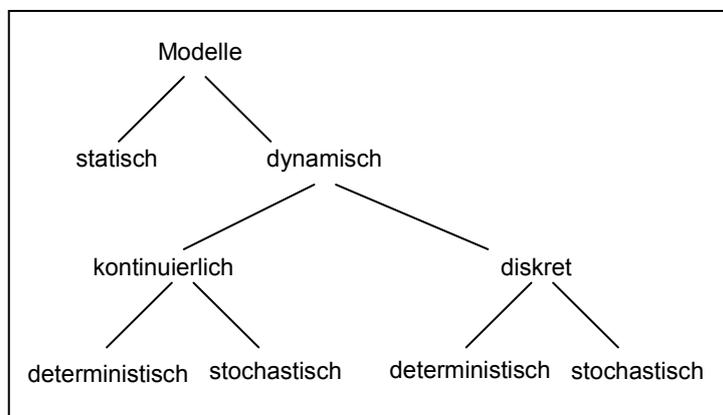


Abbildung 5: Klassifikation nach Art der Zustandsübergänge [Page 91, S.6]

- **Nach dem Verwendungszweck** – der sich aus der Anforderungsanalyse der zu lösenden Problemstellung ergeben sollte. Wenn man ein Modell sucht, anhand dessen man das (speziell) beobachtete Systemverhalten nachträglich detailliert erklären kann, benötigt man ein *Erklärungsmodell*. Will man aber ein Spektrum künftig möglicher Systemzustände, braucht man ein *Prognosemodell*. *Gestaltungsmodelle* werden inzwischen oft für das Vorgehen und Planen im Management verwendet, zum Beispiel das Freiburger Management-Modell für Nonprofit-Organisationen. [Schwarzer, Purtschert, 02, S.13]. Um kostensenkende und gewinnmaximierende Maßnahmen zu identifizieren, werden in der Unternehmensberatung *Optimierungsmodelle* zum Auffinden von Engpässen verwendet.

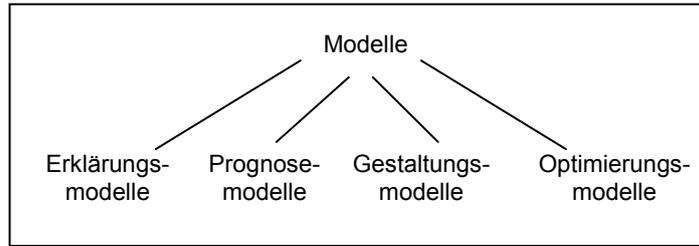


Abbildung 6: Klassifikation nach Verwendungszweck [Page 91, S.7]

Krallmann [H. Krallmann 07, S.74] erstellte eine übergreifende Klassifikation nach Eigenschaften, Darstellungsart und Verwendungszweck:

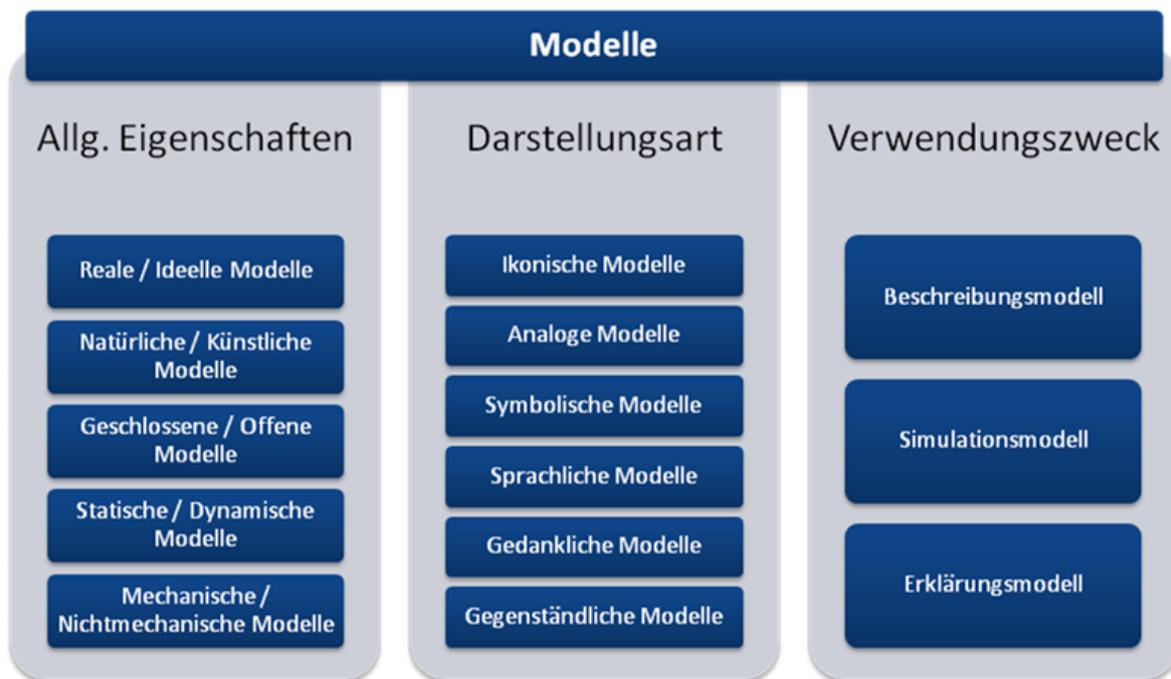


Abbildung 7: Modellklassifikation nach Eigenschaften, Darstellung und Verwendungszweck

2.1.3 Simulation

Das Wort „Simulation“ nimmt im sprachlichen Gebrauch viele Bedeutungen an. So kann Simulation bedeuten, dass man sich verstellt oder etwas vortäuscht (lat. simulatio), aber auch, dass man eine bestimmte Handlung nachahmt (lat. simulo). Begriffe, wie das virtuelle Labor⁹ oder Experimente (unter kontrollierten Bedingungen) im Rechner, sind Synonyme für computergesteuerte Experimente, die als Computersimulationen bezeichnet werden. In dieser Arbeit wird generell von Computersimulation gesprochen, sodass auch der Überbegriff Simulation im Weiteren als solche verstanden wird.

Im Folgenden werden drei gängige Definitionen für Simulation angeführt:

„Simulation is the process of designing a model of a real system and conducting experiments with this model for the purpose either of understanding the behavior of the system and its underlying causes or of evaluating various designs of an artificial system or strategies for the operation of the system.“ [Shannon, 75, S.1]

Shannon definiert Simulation als einen Modellbildungsprozess, der das Verhalten eines realen Systems für die Durchführung von Experimenten in einem zugehörigen Modell abbildet. Ziel der Experimente ist es, die dem System zu Grunde liegenden Relationen oder die verschiedenen Varianten von künstlichen Systemen zu verstehen bzw. Strategien festzustellen, wie das System unter bestimmten Umständen operieren könnte.

„Simulation is the imitation of the operation of a real-world process or system over time. [...] Simulation is an indispensable problem-solving methodology for the solution of many real-world problems. Simulation is used to describe and analyze the behavior of a system, ask what-if questions about the real system, and aid in the designing of real systems.“ [Banks, 98, S.3]

Banks setzt schon in der Definition Simulation reale Prozesse mit Systemen gleich, die über eine Zeitspanne imitiert werden. Beide laufen in der Zeit, sind also dynamisch. Simulation ist für ihn eine unerlässliche Methode für die Lösungsfindung von verschiedenen (realen) Problemstellungen. Weiters ist Simulation für Banks wie

⁹ Quelle: <http://www.isg.cs.uni-magdeburg.de/sim/WJ.html>, besucht am 03. Oktober 2006

für Shannon ein nützliches Tool zur Systembeschreibung und -analyse. Die Variation der Lösungen findet durch die Beantwortung der „Was ist, wenn“ -Fragen statt. Weiters findet Simulation als unterstützendes Werkzeug für die Planung von noch nicht existierenden Systemen Anwendung.

“Simulation ist die Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.” [VDI-Richtlinie 3633, Blatt1, 93]

In der Definition der VDI-Richtlinie sind wesentliche Teile der vorherigen Definitionen noch einmal enthalten. Erkenntnisse, welche auf die Wirklichkeit übertragbar sind, werden aus einem experimentierfähigen Modell, welches wiederum die Nachbildung des Systems ist, gewonnen.

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass sich Simulation als Problemlösungsverfahren versteht, das neue Blickwinkel aufdeckt und somit zusätzlichem Erkenntnisgewinn dient. Diese Erkenntnisse bauen auf einer modellbasierten Nachbildung eines realen Systems auf, welches es nach speziellen Problemstellungen zu untersuchen gilt. Wenn eine hinreichend korrekte Abbildung des Originals im Modell gewährleistet ist (Validität¹⁰), kann man mit dem eigentlichen Simulationsprozess beginnen. Wichtig dabei ist, dass die durch gezielte Simulationsexperimente gewonnenen Daten ebenfalls auf die Wirklichkeit bzw. auf das Verhalten des originalen Systems übertragbar sind. Die Auswertung der Daten kann planerischen, analytischen oder experimentellen Charakter haben, je nachdem, welcher Modellzweck der Simulation zu Grunde liegt, und welche Informationen zur Problemlösung verhelfen können.

Generell löste man die klassischen technisch-naturwissenschaftlichen Problemstellungen mittels Anwendung von Theorien und dem Ausführen von Experimenten. Heute bietet sich die Simulation als weiterer Problemlösungsansatz

¹⁰ Durch Simulation auf Basis des erstellten Simulationsmodells können Ausgangsvariablen im Experiment ermittelt werden, die mit denen am realen System verglichen werden. Dabei wird das Simulationsmodell mit den gleichen Eingangsvariablen ausgeführt, wie zuvor das reale System. Dieser Vergleich wird als **Validierung** des Modells bezeichnet. Abhängig vom Ergebnis der Validierung kann es anschließend notwendig sein, das Modell anzupassen, z.B. durch Änderung von Modellparametern oder sogar durch strukturelle Modifikationen. [vgl. J. Kahlert, 2004, S.19]

an. Simulation versteht sich als die dritte Säule der Wissenschaft, welche eine Vereinigung und Variation der ursprünglichen Lösungsansätze erlaubt [Bossel 04, S.63]. Weiters kann sie neue Wege gehen, wenn die reine Theorie nicht ausreicht, klassische Experimente nicht möglich sind oder Systeme noch nicht existieren (siehe 2.4 Anwendungsgebiete der Simulation bzw. Vor- und Nachteile). Abbildung 8 zeigt die Positionierung der Simulation im Problemlösungsprozess.

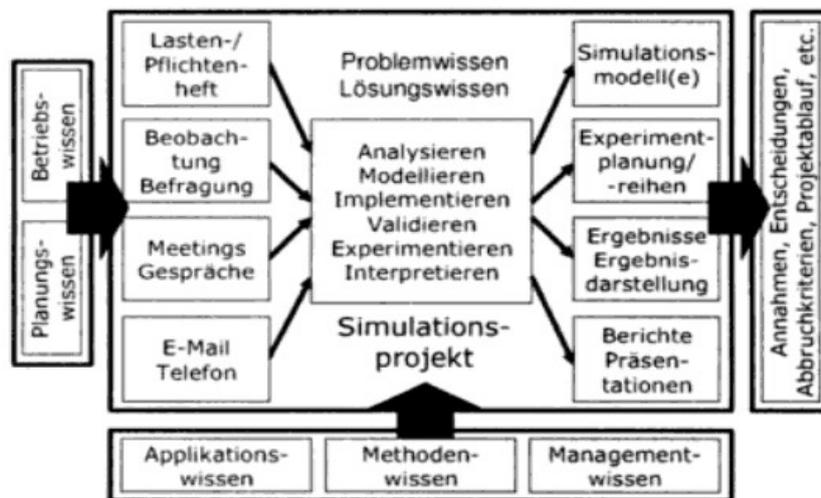


Abbildung 8: Positionierung der Simulation im Problemlösungsprozess [C. Engelhardt-Nowitzki, O. Nowitzki, B. Krenn, 07, S. 190]

Prinzipiell kann man zwischen kontinuierlicher (dynamischer) Simulation und diskreter (ereignisorientierter) Simulation unterscheiden. Bei vielen Prozessen in betriebswirtschaftlichen Systemen, wie Produktionsprozessen oder Lagerhaltungssystemen, ändert sich der Systemzustand nicht kontinuierlich, sondern ereignisabhängig (diskret – event driven). Das bedeutet, dass nur ausgewählte Werte zu bestimmten, klar unterscheidbaren Zeitpunkten berechnet werden und eine eindeutige oder sprunghafte Zustandsänderung darstellen.

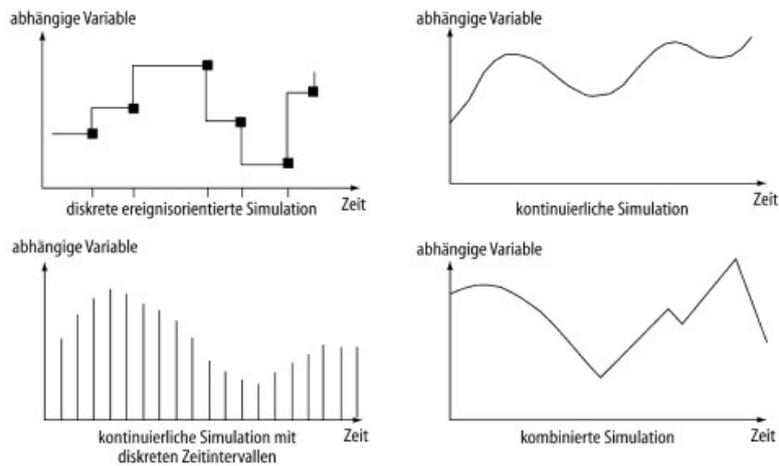


Abbildung 9: Unterschiede im Verhalten einer zeitabhängigen Variablen in Abhängigkeit von der Simulationemethode [D. Arnold, A. Kuhn, K. Furmans, H. Isermann, H. Tempelmeier, 08,S.79]

In der Natur vollziehen sich die Zustände meist kontinuierlich. In der zeitkontinuierlichen Simulation werden fortlaufend sämtliche Werte berechnet. Dazwischen gibt es viele Grade der Mischung beider Modelle, die als hybride Simulation bezeichnet wird.

Ob ein kontinuierliches, diskretes oder hybrides Modell gewählt werden sollte, hängt einerseits vom Prozess, andererseits aber auch von der jeweiligen Aufgabenstellung der Simulation selbst ab. Simulation besitzt aber in jedem Fall die Flexibilität, sowohl aggregierte als auch detaillierte Modelle zu behandeln.

Modellversionen ein gültiges, verlässliches, sensibles und plausibles Modell zu erstellen, mit dem es gelingen soll, das reale System im Computer zu simulieren.

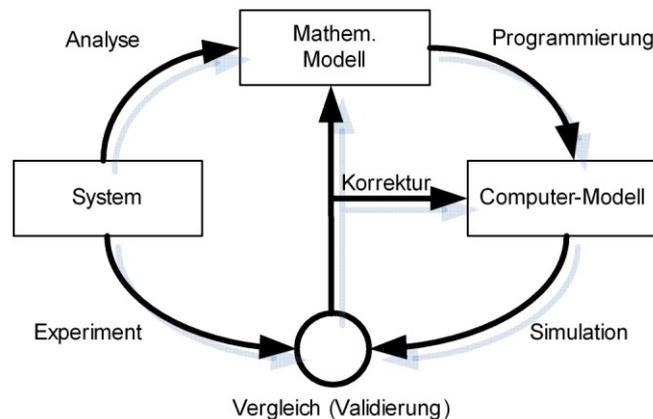


Abbildung 11: Simulationskreislauf [Jörg Kahlert 04, Simulation technischer Systeme, S.19]

Erst wenn das Modell eine geprüft-gültige Repräsentation des Originalsystems ist, können aussagekräftige Informationen über das dynamische Verhalten des Systems gewonnen werden. Generell kann man erst nach der Umsetzung eines Modells entscheiden, wie gut ein Modell dem Original entspricht, da ein gewisses Fehlerrisiko nie auszuschließen ist.

Golomb beschreibt schon 1970 die gängigen Fehlerquellen in seinen „*Don'ts of mathematical modelling*“ und regt damit zu einer kritischen Sicht, auch eigener Modelle, an [Golomb S.W., 70, S. 197-198]:

- ⇒ *Don't believe in the 33rd order consequences of a 1st order model.*
- ⇒ *Don't extrapolate beyond the region of fit.*
- ⇒ *Don't apply any model until you understand the simplifying assumptions on which it is based, and can test their ability.*
- ⇒ *Don't believe the model is reality.*
- ⇒ *Don't distort reality to fit the model.*
- ⇒ *Don't limit yourself to a single model: More than one may be useful for understanding different aspects of the same phenomenon.*
- ⇒ *Don't retain a discredited model.*
- ⇒ *Don't fall in love with your model.*
- ⇒ *Don't apply terminology of subject A to the problems of subject B if it is to the enrichment of neither.*

⇒ *Don't expect by having named a demon you have destroyed him.*

Simulationsmodelle sind idealerweise dem Problemlösungsansatz angepasst. Die folgende Abbildung veranschaulicht den logischen Ablauf:

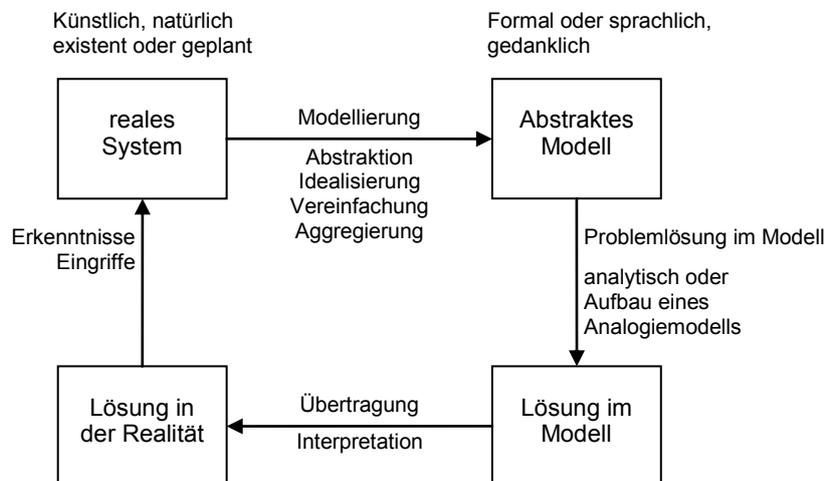


Abbildung 12: Simulation als Problemlösungsverfahren [Quelle: Vorlesung „Simulation“, Prof. Breiteneker, TU-Wien, 2005]

Banks beschreibt die Modellbildung als einen komplexen Prozess, der in den meisten Fällen induktives und deduktives Schließen involviert. Er sagt weiters, dass das Modellieren von Systemen einfacher ist,

- wenn physikalische Gesetze verfügbar sind,
- wenn grafische Darstellungsweisen des Systems gemacht werden können und
- wenn die Unsicherheit von Systeminputs, Komponenten und Outputs quantifizierbar ist.

Allgemein formuliert kann man daraus schließen, dass sich das Modellieren eines komplexen und umfangreichen Systems oft schwieriger gestaltet als das Modellieren eines rein physikalischen Systems. Dies aus mehreren Gründen:

- es sind wenige elementare Gesetze verfügbar
- viele verfahrensorientierte Elemente sind involviert, die schwierig zu beschreiben oder darzustellen sind
- Inputrichtlinien müssen definiert werden, welche schwer zu quantifizieren sind

- zufällige Komponenten sind signifikante Elemente und
- menschliche Entscheidungen sind ein wesentlicher Teil eines solchen Systems

Generell kann man die Modellbildung mit zwei verschiedene Modellierungsarten beginnen: Einerseits mit dem *Top-Down-Ansatz*, der von Anfang an alle Funktionen und mathematischen Gesetze berücksichtigt und im Nachhinein Schritt für Schritt unnötige Terme oder Relationen herausnimmt. Andererseits mit dem *Bottom-Up-Ansatz*, wobei mit einfachen Grundfunktionen des Systems begonnen wird und Schritt für Schritt Relationen und nötige Gleichungen hinzugenommen werden, bis das System ausreichend abgebildet ist.

Page beschreibt Modellbildung als den Vorgang der Abstraktion und Idealisierung, welcher die Komplexität des Originals reduziert. Die Schwierigkeit der Komplexitätsreduktion ist nach Diederichs¹¹ [05, S.22-24] eng mit dem bezugnehmenden System verknüpft, da sich die (bestimmt strukturierte) Komplexität auf Grund der Selektion von Relationen und Elementen ergibt.

Die *drei wichtigsten Grundlagen* dafür bilden:

Die Trennbarkeit:

Nur ein Teil der Zusammenhänge wird berücksichtigt, d.h. das betrachtete System wird (so die Annahme) nicht zusätzlich "von außen" beeinflusst.

Die Auswählbarkeit:

Nur bestimmte Interaktionen zwischen dem betrachteten System und der Außenwelt werden als relevant ausgewählt.

Die Kausalität:

Alles beruht auf Ursache und Wirkung (d.h. Ein- und Ausgänge sind kausal miteinander verknüpft, dynamische Systeme sind rückgekoppelt). Die für Simulationsexperimente wichtigen Zufallsprozesse haben hier eine Sonderstellung, sie lassen sich im Gegensatz zu echten Zufallsprozessen am Computer auf Wunsch

¹¹ Henner Diederichs nimmt in seinem Buch „Komplexitätsreduktion in der Softwareentwicklung“ 2005 stark Bezug auf spezielle Themen von Luhmann [Luhmann 75 S.111, Luhmann 87 S.50, Luhmann 99a/b S.140/S.176]

reproduzieren und steuern, sie sind somit deterministisch¹². Es obliegt somit dem Modellersteller, die Art und Weise festzulegen, wie Zufall in Modellen erzeugt wird. [vgl. Kapitel 2.7] Diese virtuelle Variation und Mutation¹³ können zu Veränderung und Entwicklung führen. Sie sind in gewisser Weise der Planung des Modells entgegengesetzt, dies zeigt sich auch durch die teilweise Unschärfe in Simulationsergebnissen und wie wichtig es ist, Fakten und Fiktion in der Simulation zu unterscheiden.

Die Modellbildung wird als hoch kreativer Prozess verstanden, der das Planen neuer Ideen bis hin zur Verfeinerung der Modellierungsaspekte iterativ festlegt. Sie folgt dem Simulations- bzw. Modellbildungsprozess, der im nächsten Kapitel nach den Konzepten von Page [01, S.13-18], Banks [98 S. 15-18] und Chan [04, Buchstruktur] genauer beschrieben wird.

¹² Ein deterministischer Algorithmus ist ein Algorithmus, bei dem nur definierte und reproduzierbare Zustände auftreten.

¹³ künstliches Leben [Abk. KL, engl. artificial life (AL)], analog zu den Forschungen zur künstlichen Intelligenz benanntes Gebiet der Informatik, das bestimmte Mechanismen der Evolution mithilfe von Simulationen untersucht. Dabei werden genetische Algorithmen eingesetzt, bei denen bestimmte Codeabschnitte variabel gestaltet sind (»**Mutation**«). Anhand einer Bewertungsfunktion wird aus einer Reihe unterschiedlicher Programmversionen die »beste« ausgewählt und diese wiederum in verschiedenen Versionen erstellt (»Fortpflanzung« und »Selektion«). Dieser Zyklus wird automatisch über eine große Zahl von Generationen durchgeführt, wodurch sich wie in der Biologie eine an die durch die Bewertungsfunktion vorgegebenen »Umweltbedingungen« optimal angepasste Version des Algorithmus ergibt. Neben Projekten der Grundlagenforschung und Computerspielen sind auch erste wissenschaftliche und kommerzielle Anwendungen des KL-Prinzips erstellt worden. [Quelle: Der Brockhaus Computer und Informationstechnologie. Mannheim: F.A. Brockhaus 2005.]

2.3 Ablauf von Simulationsstudien

Quer durch die Literatur werden für den Modellbildungsprozess annähernd gleiche Abläufe vorgeschlagen. Unterschiede zeigen sich lediglich in der Herangehensweise. Einerseits verfolgen Bossel [04, S.26] und Page [01, S.13-18] einen problemlösungsorientierten Ansatz, andererseits wird von Chung [04] und Banks[98 S. 15-18] ein praktischer, projektorientierter Ansatz gewählt. Banks definiert den Projektplan als eigenen Punkt in seinem Buch Handbook of Simulation [98 S. 15-18], während Chung [04, S.2f] den kompletten Aufbau seines Buches nach Projektmanagementkriterien ausgerichtet hat.

Im Folgenden wird der projektmanagementorientierte Ansatz angeführt, da dieser in meiner Arbeit Anwendung findet. Der Gesamttablauf teilt sich chronologisch in drei große Phasen: die Vorbereitungsphase, die Durchführungsphase und die Auswertungsphase [nach VDI 93].

Schritte in einer Simulationstudie

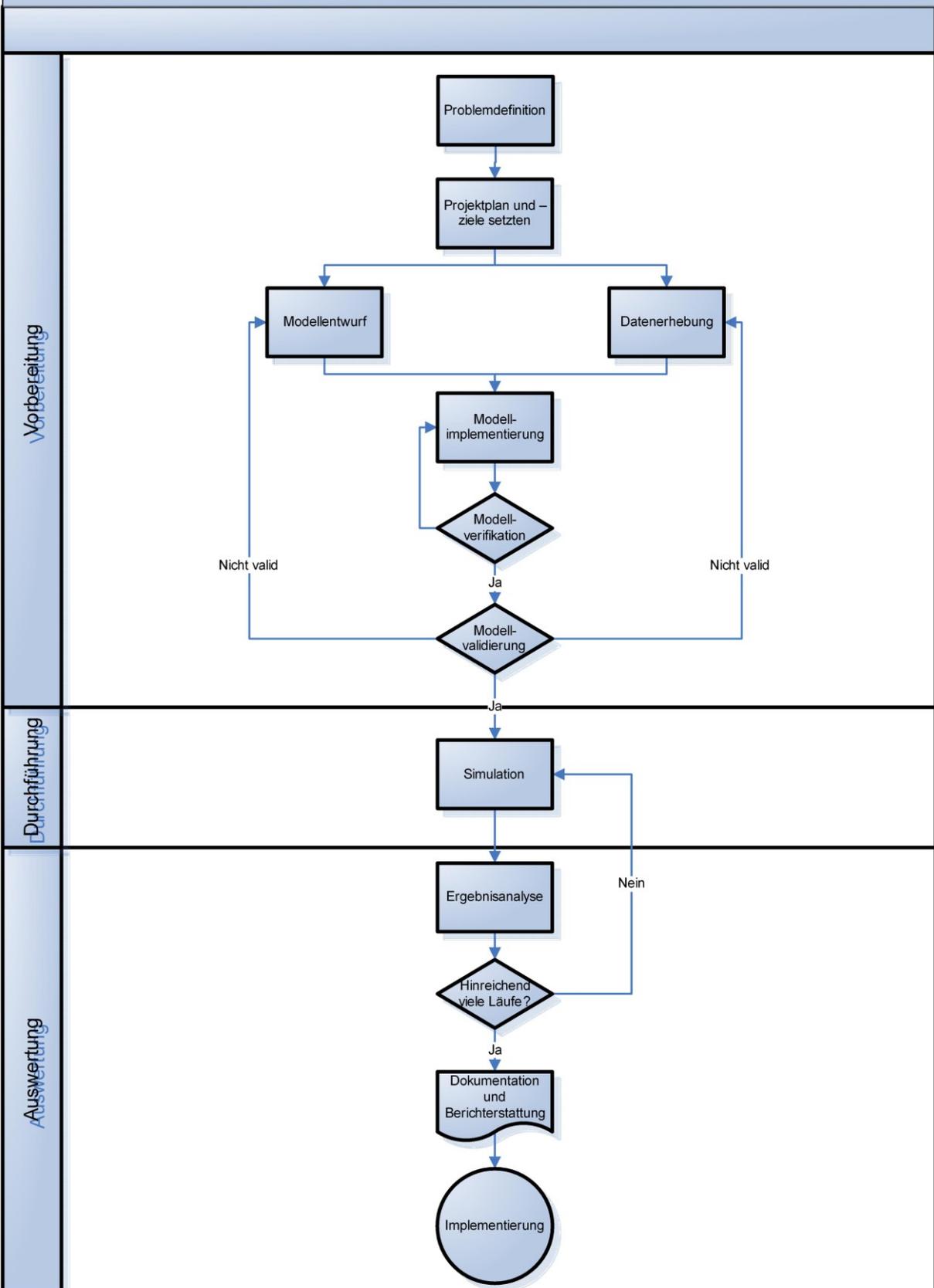


Abbildung 13: Schritte in einer Simulationsstudie [vgl. Banks 98, S16]

2.3.1 Problemdefinition

Die Problemdefinition ist notwendig, um die Aufgabenstellung klar nach allen Seiten abzugrenzen. Um entscheiden zu können, welche Elemente des Systems abstrahiert werden können und welche für den zu erfüllenden Modellzweck zwingend notwendig sind, müssen Modellentwickler den späteren Verwendungszweck und die Problemstellung für das Modell kennen. Diese Definition erhält man am besten von einem Systemkenner, z.B. einem Firmenmitarbeiter, der mit dem Prozess vertraut ist. Wichtig ist, dass Modellentwickler und Systemkenner die Problemstellung in gleicher Weise verstanden haben, damit keine Zielverfehlung stattfindet. Hier muss man besonders sorgfältig vorgehen, da sonst eine wiederholte Problemformulierung stattfinden kann und der gesamte Prozess rückwirkend adaptiert werden muss. Dies würde zu einem erheblichen zeitlichen und finanziellen Verlust führen.

Es empfiehlt sich auch aus Eigeninteresse, mit dem Klienten, für den das Modell erstellt wird, ehrlich und offen zu kommunizieren und seine Erwartungen und Fragen mit der Realität von Simulationsmodellen zu beantworten [siehe Kapitel 2.4, Vor- und Nachteile]. Es ist einfacher, zu Beginn keine allzu hohen Erwartungen an die Möglichkeiten eines Simulationsmodells zu erzeugen, als später das allzu hohe Anspruchsniveau reduzieren zu müssen [vgl. Banks 98, S.723ff], beziehungsweise erweist es sich als unangenehm, wenn man das falsche Problem gelöst hat. Hilfreich ist hier, ein Pflichten- und Lastenheft nach VDI Blatt2 [93] anzufertigen.

2.3.2 Projektplan und -ziele

Die Projektziele sind implizit die Fragen, die es im Rahmen der Problemstellung zu beantworten gilt. Der Projektplan sollte über eine Beschreibung der verschiedenen Szenarien verfügen, die auftreten können. Weiters sollte er eine Übersicht geben, welche Ressourcen verbraucht werden und wie viel die jeweiligen Szenarien kosten könnten. Typische Punkte wären zum Beispiel eine Aufwandsschätzung, eine Terminplanung, eine Einsatzmittelplanung, eine Kostenplanung und eine Risikoabschätzung. Dies sollte man, wie oben angeführt, in einem Pflichten- und Lastenheft niederschreiben. Die vorliegende Simulationsstudie sollte dann in eine passende Projektstruktur umgewandelt werden, das heißt, man definiert Arbeitspakete und die zu erwartenden Meilensteine. Dieser Prozess geschieht in Anbetracht des Projektumfangs und der zur Verfügung stehenden Ressourcen in

Punkto Personen und deren Qualifikationen, der Simulationssoftware und der verhandelten finanziellen Mittel.

2.3.3 Modellentwurf

Direkt nach der Problemformulierung kann man mit der Erstellung eines konzeptuellen Modellentwurfs beginnen. Dabei sollte man sich Ziele setzen.

Das zu untersuchende System wird zuerst von der Umwelt abgegrenzt und darauf aufbauend die Systemstruktur erfasst. In einem nächsten Schritt werden die relevanten Systemelemente, ihre Attribute und Relationen erfasst und grob entschieden, welche davon für die Lösung der Problemstellung dienlich sind. Kurz, es werden Schlüsselstellen identifiziert und priorisiert.

Die relevanten Systemgrößen werden identifiziert und danach informell beschrieben, meistens durch Fluss- oder Strukturdiagramme (grafisch-deskriptive Medien).

Nun sollte man, anhand der visuell vorliegenden Information, den für das Problem geeigneten Modelltyp wählen und sich über die Zerlegung in mögliche Subsysteme Gedanken machen (Modularisierung). Banks empfiehlt den *Bottom-Up Ansatz*, damit man auch selbst mit der Komplexität des Modells wachsen kann (Entwicklung der Wirkungsstruktur) und zu komplexe und damit unwirtschaftliche Modelle im Vorhinein vermeiden kann.

Aus den vorangegangenen Arbeitsschritten ergibt sich ein informelles, konzeptuelles Modell, welches als Grundlage für die Projektplanung dient.

Nun folgt die formale Spezifikation des konzeptuellen Modells. Das heißt, das Modell beinhaltet eine Serie von mathematischen und logischen Verknüpfungen, unter Berücksichtigung der ausschlaggebenden Komponenten und der Struktur des Systems - der eigentliche Modellentwurf. Wichtig ist hier, dass man spätere Modelleingaben spezifiziert und die formalen Strukturen passend abgleicht. [vgl. Page 01, S.13f, Banks 98, S.728].

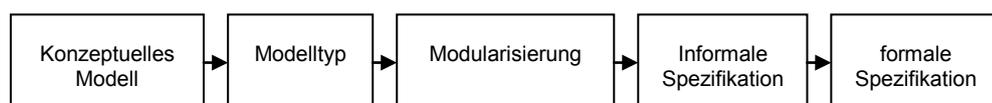


Abbildung 14: Modellentwurfsablauf [Page 01, S.13f]

2.3.4 Datenerhebung

Die Modellentwicklung ist gekennzeichnet durch eine meist aufwändige Datenbeschaffung und Parameterschätzung, das heißt, die beiden Phasen Modellentwicklung und Datenerhebung müssen weitgehend parallel durchgeführt werden.

Daten sind gerade am Anfang einerseits oft empirische Daten, die als Grundlage eines induktiven Schlusses in das Modell einfließen. Andererseits kann man über deduktives Schließen, aus den Fachkenntnissen und Erfahrungen des Modellentwicklers, seinem a priori Wissen, ebenfalls hilfreiche Schlussfolgerungen ziehen, besonders dann, wenn das reale System noch gar nicht existiert.

Die Datenerhebung kann einen beträchtlichen Teil des Aufwandes einer Simulationsstudie ausmachen, speziell dann, wenn Daten erst durch gezielte Messungen am Realsystem gewonnen werden müssen. Zeitschonender gestaltet sich dieser Arbeitsschritt, wenn bereits historische Daten gesammelt vorliegen oder man relevante Schätzwerte durch Expertenbefragungen erhält.

Ziel ist es, alle benötigten Daten für Modellkonstanten, Anfangswerte, Querschnittsdaten oder Zeitreihen, sowie Modellvariablen, Verteilungstypen und Verteilungsparameter für stochastische Modellgrößen in einer Datenanalyse zu ermitteln.

Um gute Ergebnisse erzielen zu können, sollten die Daten einer hinreichenden Qualität, Quantität und Streuung genügen. Oft werden Daten in Unternehmen zwar gesammelt, aber später gerundet oder gemittelt und genügen dann unter Umständen nicht mehr den Datenanforderungen der Modellentwicklung.

Um Annahmen und Kennzahlen ableiten zu können, müssen die Daten ausgewertet und mit einer entsprechenden statistischen Verteilung oder einer Gleichung abgebildet werden. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass eine Komplexitätsverringerung gegenüber den speziellen Beobachtungsdaten erreicht wird. In stochastischen Modellen lassen sich auch solche Komponenten des Systems durch Zufallsprozesse nachbilden, die zwar prinzipiell deterministisch beschreibbar wären, aber weil sie zu komplex sind oder der empirische Nachweis eines deterministischen Zusammenhangs schwer zu erbringen ist, als stochastische Größen ins Modell eingebaut werden. Datenanalyse

Nach der Datenerhebung gilt es für das Modell die richtigen Kennzahlen mit ihren unterschiedlichen Ausprägungen und Wertebereichen aus den gesammelten Daten herauszufiltern. Die Statistik, die Lehre von Methoden zur Gewinnung, Charakterisierung und Beurteilung von zahlenmäßigen Informationen über die Wirklichkeit (Emperie), stellt hierfür die Werkzeuge zur Verfügung [vgl. Lippe 06, S.5].

Je nach Verfügbarkeit und Qualität der Daten können Methoden der beschreibenden (deskriptive) Statistik und - oder der schließenden Statistik (analytische Statistik, Inferenzstatistik) verwendet werden.

Dazu können nach Polasek zwei Gruppen von Daten unterschieden werden:

1. **Nichtexperimentelle Daten und historische Daten**

können nur mit Hilfe der deskriptiven Statistik (explorativen Datenanalyse) ausgewertet werden. Kausalbeziehungen können durch kontrollierte Experimente empirisch nicht bewiesen, sondern bloß aufgrund der Datenlage als Hypothesen nicht verworfen werden.

— Beispiele: Preisindex, Unfalldaten, Bevölkerung, Krankheiten.

2. **Experimentelle Daten**

erhält man zumeist mit Stichproben-Planung und Versuchsplanung (Experimental design, design of experiments). Ziel: Unter kontrollierten Versuchsbedingungen werden wiederholte Beobachtungen erzeugt. Durch vorgegebene Variation von Einflußfaktoren werden die Meßfehler der abhängigen Variablen minimiert.

— Beispiele: Würfelwurf, Ernteertrag, Medikamenten vergleich.

Die Methoden der deskriptiven Statistik ermöglichen eine übersichtliche Darstellung der erhobenen Daten oder einer Stichprobe zur Untersuchung und Beschreibung von Gesamtheiten oder Teilmengen von Gesamtheiten. Hierbei gilt es, Daten in geeigneter Weise zusammenzufassen, zu ordnen und grafisch darzustellen. Die Methoden der deskriptiven Statistik zielen darauf ab, diese unüberschaubare Datenmenge durch möglichst wenige, jedoch noch aussagekräftige Zahlen zu charakterisieren. Diese Aufbereitung oder Verdichtung ist die Grundlage einer sachgerechten Interpretation des numerischen Ergebnisses. Dies geschieht zum Beispiel durch Errechnung von Mittelwerten, Streuungsmaßen,

Korrelationskoeffizienten, Häufigkeitsverteilungen und andere mehr.

Die deskriptive Statistik unterscheidet sich von der schließenden Statistik dadurch, dass sie keine Aussagen zu einer über die untersuchten Fälle hinausgehenden Grundgesamtheit macht.

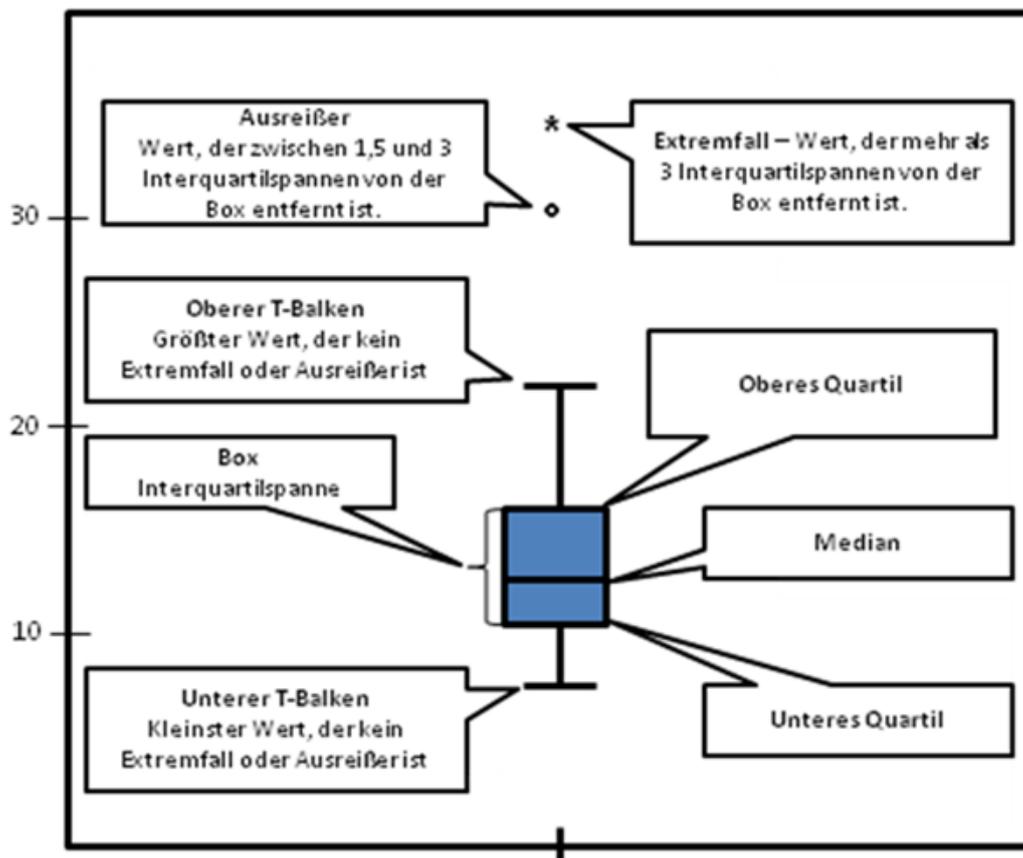


Abbildung 15: Beispiel Boxplot [eigene Grafik]

Die Verfahren der schließenden Statistik dienen dazu, aufgrund von Beobachtungen auf die einem zufälligen Vorgang zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten Rückschlüsse zu ziehen. Da bei Folgerungen aus unter Zufallseinfluß entstandenen Daten die Möglichkeit von Fehlschlüssen nicht auszuschließen ist, liegt das Bestreben darin, die Fehler kontrollierbar und kalkulierbar zu machen. Dies geschieht wiederum durch wahrscheinlichkeitstheoretische¹⁴ Verfahren, mit deren Hilfe man

¹⁴ Die Wahrscheinlichkeitsrechnung befaßt sich mit der Quantifizierung des Zufalls und seinen Gesetzmäßigkeiten, indem sie Zufalls-Mechanismen mathematisch modelliert. Mögliche Resultate eines Zufallsexperimentes, sind aber nur dann sinnvoll, wenn sie auf Beobachtungen beruhen, die

Aussagen über das Auftreten von Fehlern machen kann. [vgl. Lehn, Wegmann, S.106, 06]

Vielfach ist es unmöglich oder zumindest unzweckmäßig, statistische Datenreihen vollständig zu untersuchen (Grundgesamtheit). Man beschränkt sich stattdessen auf die Untersuchung einer Stichprobe. Stichproben-Verfahren liefern zufällige Daten aus einer Grundgesamtheit. Daher haftet allen Ergebnissen einer Stichprobenauswertung ein Zufallsfehler an. Methoden der schließenden Statistik sind hierauf anwendbar, wenn gewährleistet ist, dass ein Zufallsmechanismus verwendet wurde, um die statistischen Einheiten der Stichprobe auszuwählen oder zu erzeugen. [vgl. W. Polasek, S.1, 97] Je nachdem, welcher Zufallsmechanismus verwendet wird, unterscheidet man sog. einfache Zufallsstichproben sowie komplexere Stichprobenverfahren. [vgl. Degen, Lorscheid, S.277, 02]

2.3.5 Modellimplementierung

Das Ziel der Modellimplementierung ist die Übersetzung des formalen, konzeptuellen Modells in ein Computermodell, mit dem man Daten aus Experimenten gewinnen kann.

Diese Phase besteht aus zwei Teilschritten. Erstens muss man sich für eine geeignete Programmiersprache bzw. für ein geeignetes Softwarepaket entscheiden, zweitens muss man die erarbeiteten Relationen durch Programmierung ins Modell bringen.

Bei der Wahl einer geeigneten Simulationssoftware muss man darauf achten, dass die Software flexibel und schnell genug ist, um das gegebene Modell am Computer in geeigneter Weise zum Laufen zu bringen.

Simulationssoftware und Simulationssprachen bieten spezifische Basisfunktionen, wie Zeitführung, Zufallszahlenerzeugung etc. Weiters sollte man die jeweilige im Programm verwendete Programmiersprache beherrschen, insbesondere wenn man sich für eine rein programmierte Umsetzung des Modells entscheidet, um auch nicht standardisierte Lösungen umsetzen zu können.

während einer sehr großen Zahl von Durchläufen des gleichen Zufallsexperimentes zuvor gemacht worden sind.

Die Wahl der Simulationssoftware wird weiters durch die anfallenden Lizenzgebühren, den bereits vorhandenen Programmierkenntnissen des Modellentwicklers und die Art des Modells bestimmt.

Die Erstellung eines Simulationsmodells ist ein iterativer Prozess. Die Implementierung und Verifikation des Modells wird heute von Simulationsumgebungen unterstützt. Simulationssoftware wird für die Verwendung in Projekten ein größerer Nutzen zugeschrieben als einer reinen Programmiersprache und durch eine gute, meist graphische Umgebung unterstützt.

Bei der Entwicklung des Computermodells sollte man gängige Softwareentwicklungsmodelle miteinbeziehen, um auch hier möglichst effizient ans Ziel zu kommen. Modellversionen, sinnvolle Parameternamen, Dokumentation und regelmäßige Backups helfen bei der Implementierung.

Ergebnis der Modellimplementierung ist das experimentierfähige Computermodell, eine virtuell ausführbare Beschreibung des konzeptuellen Modells.

2.3.6 Modellverifikation

„Wer A sagt, muss nicht B sagen, er kann auch erkennen, dass A falsch war.“

[Berthold Brecht]

Die Modellverifikation behandelt die korrekte Abbildung des konzeptuellen Modells auf das Computermodell. Selbst kleine Modelle können dabei Schwierigkeiten haben. Es wird fortwährend geprüft, ob das Programm eine korrekte Implementierung des (formalen) konzeptuellen Modells darstellt. Das heißt, auch die Verifikation ist ein begleitender, iterativer Prozess der Modellbildung und sollte schon mit den ersten Zeilen eines Modells beginnen.

„Trotz der üblichen Bezeichnung „Verifikation“ handelt es sich normalerweise nicht um eine formale Programmverifikation, sondern vielmehr um systematische Programmtests.“ [Page 01, S.16]

Die Testtechniken kann man nach Banks [98, S.355] in informelle, statische, dynamische und formelle klassifizieren, welche sich, je nach ihrem wissenschaftlichen Ursprung, wiederum in Softwareentwicklung, Statistik, usw. einteilen lassen.

Allgemein lassen sich nach Banks folgende hilfreiche Regeln für die Verifikation definieren [Banks 98, S.22]:

- ⇒ *“Follow the principles of structured programming”*
- ⇒ *“Make the operational model as self-documenting as possible”*
- ⇒ *“Have the computer code checked by more than one person”*
- ⇒ *“Check to see that the values of the input data are being used appropriately”*
- ⇒ *“For a variety of input-data values, ensure that the outputs are reasonable”*
- ⇒ *“Use an interactive run controller (IRC) or debugger to check that the program operates as intended”*
- ⇒ *“Animation is a very useful verification tool, to find illogical actions”*

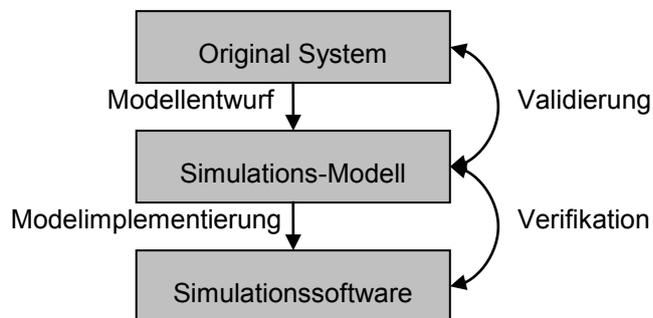


Abbildung 16: Simulationsmodellentwicklung [nach Banks 98, S.56]

2.3.7 Modellvalidierung

„Eine Erkenntnis von heute kann die Tochter eines Irrtums von gestern sein.“

[Marie von Ebner-Eschenbach]

Die Validierung des Modells ist die Bestimmung der Gültigkeit des Modells. Das heißt, dass das Modell eine angemessene Repräsentation der Wirklichkeit darstellt und dass es stellvertretend für das reale System den Zweck für Experimente erfüllt.

Auch die Überprüfung der Gültigkeit eines Modells verläuft parallel zu den anderen Phasen des Modellbildungsprozesses. Die Gültigkeit eines Modells lässt sich aber nicht ohne weiteres nachweisen, da sie immer von den vorgegebenen Zielsetzungen und Problemstellungen abhängt. Darum muss man auf den verschiedenen Ebenen der Modellbildung immer wieder Prüfungen vornehmen, um das Modell transparent zu halten und seine Tauglichkeit für die Problemstellung glaubhaft zu machen (*model credibility*).

Page führt drei Stufen für eine Modellvalidierung an [vgl. Page 01, S.16f und Banks 98, S23f]:

- **Validierung des konzeptuellen Modells**

Zur Überprüfung der Gültigkeit der Beschreibung, der wesentlichen Systemkomponenten, deren Attribute und Beziehungen.

- **Modellverifikation**

Siehe 2.3.6 Modellverifikation

- **Operationale Modellvalidierung**

Wird als der aufwendigste Schritt der Validierung beschrieben, da hier das dynamische Modellverhalten kontrolliert wird. Folgende Verfahren haben sich laut Page etabliert:

- **Outputvergleich:** Nach Banks der „ideale“ Weg, um Aufschluss darüber zu gewinnen, ob ein System valide ist oder nicht. Es werden hierbei empirische Daten des Systems mit den generierten Modellausgaben verglichen
- **Plausibilitätstest:** Dient der Untersuchung des plausiblen Verhaltens des Modells oder einzelner Module daraus, durch die Bewertung von Experten. (z.B.: reales System ist noch in Planung)
- **Sensitivitätsanalyse:** Ist die Untersuchung der Robustheit des Modells bezüglich der Veränderungen der Eingabewerte. (z.B.: durch Parametervariation Grenzen des Modells ausloten.)
- **Kalibrierung:** Die Anpassung des Modells an das reale System durch Änderungen von Parametern, welche nur ungenau erfasst werden konnten bzw. wo nur Schätzwerte vorliegen.
- **Prognostische und dynamische Gültigkeitsprüfung:** Ist der Nachweis der Prognosefähigkeit und der dynamischen Gültigkeit eines Modells im späteren Praxiseinsatz.

Werden während der Überprüfung der Gültigkeit Fehler entdeckt, müssen bestimmte Phasen der Modellentwicklung neu durchlaufen werden. Die Modellvalidierung gehört zu den schwierigsten Aufgaben im Laufe des Modellbildungsprozesses. Sie erfordert weitreichendes Erfahrungswissen über das Systemverhalten, das häufig nur

Fachleute besitzen, die mit dem Realensystem eng vertraut sind und fundiertes interdisziplinäres Wissen aus den verschiedenen aufeinander treffenden Disziplinen besitzen.

2.3.8 Simulation

„Is that some kind of game you are playing?“ [A. Chung, 04, Kap. 1.8]

Die Simulation beginnt mit einem lauffähigen und verifizierten Computermodell. Dabei kann man auch mit einem vorläufigen Design beginnen (*experimental design*), um besser abschätzen zu können, wie viele Simulationsläufe durchgeführt werden und wie lange diese dauern sollen. Diese Phase umfasst die Planung und Durchführung von Experimenten.

In der Planungsphase ist es angebracht, mit hoher Genauigkeit zu arbeiten, da man so den Aufwand für die Durchführung der Experimente gering halten kann und gleichzeitig die Anzahl der Simulationsläufe auf ein geeignetes Maß reduziert. [vgl. Page 01, S.17]

Um aus Simulationsexperimenten Daten zu generieren, benötigt man einen oder besser mehrere Simulationsläufe. Für jeden Simulationslauf werden die Variablen des Modells im Zeitverlauf unter den vorher festgelegten Parametern errechnet. Dabei ist es sinnvoll, die Eingabewerte von Lauf zu Lauf zu variieren, um aus speziellen Werten oder Wertebereichen Informationen über die verschiedenen Szenarien und Ausgangsgrößen zu erhalten. Für eine Untersuchung sind häufig mehrere Experimente mit strukturell unterschiedlichen Modellvarianten notwendig. Prinzipiell wird die Anzahl der Simulationsläufe für ein Modell als „*hinreichend viele*“ definiert, da man aufgrund der Unterschiedlichkeit von Simulationen keine allgemeingültigen Regeln festlegen kann (*More runs?*). [vgl. Banks 98, S.18]

Die experimentellen Ausgabedaten der Simulationsläufe, also die Simulationsergebnisse, müssen in einer angemessenen Form präsentiert und protokolliert werden, um eine entsprechende Weiterverarbeitung und Analyse zu ermöglichen.

2.3.9 Ergebnisanalyse

Die Funktion dieser Phase ist es, die notwendigen Informationen für den Modellentwickler herauszufiltern, um Empfehlungen oder Lösungsvorschläge in Anbetracht der Problemstellung zu geben. Die Analysephase ist statistisch gesehen am aufwändigsten und bedarf Sorgfalt und Genauigkeit. In nicht terminierenden Systemen, wie in der Produktion, können die Simulationsdaten aus den verschiedenen Läufen verglichen werden, um die Auswirkungen der Eingabewerte auf das Modellverhalten zu untersuchen. Weiters müssen bei stochastischen Modellen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Ausgabevariablen mit statistischen Methoden geschätzt werden.

Die Verfügbarkeit von Analysefunktionen, wie zum Beispiel in Excel oder in der jeweiligen Simulationssoftware, erleichtert den Zugang zu einer brauchbaren Ergebnisanalyse. Die Bewertung der Ergebnisse aus den Simulationsläufen erfolgt aufgrund der ursprünglichen Fragestellung und Zielsetzung der Simulationsstudie. Wichtig ist hier, die Anwendbarkeit der gewonnenen Daten für eine Übertragung auf das Originalsystem nicht aus den Augen zu verlieren und jegliche beiläufige Änderung im Modellbildungsprozess zu berücksichtigen.

2.3.10 Dokumentation und Berichterstattung

„documentation n. [Latin documentum “warning”] 1 The promised literature that fails to arrive with the supporting hardware. 2 A single, illegible, photocopied page of proprietary caveats and suggested infractions. 3 The detailed, unindexed description of a superseded package.“ [S. Kelly-Bootle, 1981, The Devil’s DP Dictionary]

Eine umfassende Dokumentation sollte sowohl von der Modellprogrammierung als auch von allen Modellbildungsphasen erstellt werden. Dadurch wird die Kommunikation zwischen allen Beteiligten der Simulationsstudie erleichtert. Sie stellt eine vernünftige Ausgangsbasis für die Verwendung und Erweiterung der Software, der Fehlersuche, sowie praxisnahes Hintergrundwissen für spätere Projekte dar.

Ebenso dient die Dokumentation als Arbeits- und Beurteilungsgrundlage für die Benutzer der Modelle. Weiters wird das Vertrauen der Benutzer gesteigert, wenn sich das Modell für sie transparenter gestaltet. Die Dokumentation sollte dabei klar und präzise formuliert sein, da es so leichter fällt, das System zu vergleichen, zu

verändern oder darauf aufbauend Entscheidungen zu treffen.

Grafische Darstellungsformen können die Dokumentation entscheidend unterstützen, da das Verständnis dadurch erleichtert und beschleunigt wird. Die meisten Simulationsprojekte werden über eine längere Zeitperiode entwickelt. Daher müssen auch die Dokumentationen regelmäßig modifiziert werden. Oft hinken aber die Dokumentationen der Weiterentwicklung dem Projektverlauf hinterher. Eine mögliche Strategie dagegen ist, die gesamte Dokumentation in die Software einzuarbeiten oder als Funktion der Software vorzusehen. [vgl. Raj Jain 91, Kap.24.2]

2.3.11 Implementierung

Der Erfolg einer Implementierung hängt davon ab, ob die Simulation bzw. die Simulationsergebnisse, welche in einer Simulationsstudie erzielt wurden, vom realen System bestätigt werden oder nicht. Page unterscheidet nach Maryanski zwei mögliche Grundrichtungen für Modellstudien:

- Einerseits werden Simulationen für den Ausbildungs- und Forschungsbereich, so genannte *classroom projects*, unterschieden. Hierbei steht der Erkenntnisgewinn, der sich durch die einmalige Modellentwicklung einstellt, im Vordergrund.
- Andererseits wird das Modell als dynamische Anwendung (*practical application*) verwendet, das adaptiv mehrfach als Entscheidungshilfe für diverse Problemstellungen in der Praxis dient. Hier muss meist mehr Aufwand betrieben werden, um die Kunden zufrieden zu stellen.

Grundlegend für die Phase der Implementierung ist eine besonders gründliche Validierung bezüglich der Benutzerbedürfnisse der Simulationsanwendung, da sie für die Akzeptanz des Modells von großer Bedeutung sein kann.

Eine Nachbearbeitungsphase von 60 Tagen ist in Simulationsprojekten häufig erforderlich, da eine Einschulung der zukünftigen Anwender nötig ist. Die Benutzerorientierung eines Modells ist selten so entwickelt, dass im Vorhinein ein selbständiges Erlernen der Simulationsanwendung möglich und sinnvoll erscheint. Hier kann natürlich schon in der Modellentwicklung auf die Prinzipien der Softwareergonomie geachtet werden, um später den Anwendern den Einstieg zu erleichtern. Softwareupdates und die Nachbearbeitung des Modells sollten in einem Pflichten- bzw. Lastenheft vereinbart werden, um spätere Diskrepanzen zwischen

Simulationsentwicklern und Simulationsbenutzern zu vermeiden. [vgl. Page 91, S. 18, Banks 98, S. 741]

2.4 Anwendungsgebiete der Simulation

Wie in der Einleitung erwähnt, findet die Simulation als Analysewerkzeug für komplexe Systeme immer mehr Eingang in die verschiedensten Fachgebiete. Die Gebiete reichen von Natur- und Ingenieurwissenschaften über Wirtschafts- und Sozialwissenschaften bis hin zu Medizin oder Ökologie. Im Rahmen dieser Dissertation wird die zeitdiskrete Simulation für die Produktion eines Pharmakonzerns verwendet. Daher werden hier nur Beispiele zeitdiskreter Simulationsbereiche angeführt und aufgezeigt, wo, wie und wann man sie einsetzen soll, respektive wann nicht. [vgl. Page 01, S.19].

Banks [98, S.13] unterteilt zeitdiskrete Simulation nach der Winter Simulation Conference (WSC) [Fortschritte in der Simulationstechnik – 11.Symposium in Dortmund Nov. 1997, Kuhn Wenzel] in drei Gebiete:

Erstens **Produktion und Materialfluss**, wobei es oft um Untersuchungen und Optimierungen in betriebswirtschaftlichen Prozessen geht. Beispiele sind das Auffinden von Flaschenhälsen, Evaluierungen, Minimierungen von Verzögerungen, Maximieren des Outputs oder die Analyse und Modellierung von geplanten Anlagen oder Fertigungssystemen.

Zweitens **öffentliche Systemanwendungen**, die sich aus den verschiedenen Bereichen der Versorgungs- und Dienstleistungseinrichtungen zusammensetzen, wie zum Beispiel Gesundheitssysteme (Krankenhausauslastung), Militärsysteme (Strategieplanung), natürliche Ressourcen (Umweltschutz und Umweltforschung) und öffentliche Services, wie Krankenhäuser oder die Auslastung von Regierungsgebäuden.

Drittens **Servicesysteme**, wie Verkehrsplanung (Planung von Straßen, Personennahverkehrssystemen, Flughäfen,..) Computerperformance, Kommunikationssysteme und Datenverarbeitungssysteme.

In all diesen Gebieten kann die Simulation auch als Kommunikationswerkzeug, Problembeschreibung, Analysetool, Designvorschlag, Vorgehensplan, Testwerkzeug, Kontrollmechanismus, Trainingshilfe, Teil eines technischen Systems oder zur Informationsgewinnung eingesetzt werden. [vgl. Banks 98, S47-49, Chung 04, Kapitel 1.4]

Modellbildung und Simulation werden dann eingesetzt, wenn die Aufgabe analytisch nicht lösbar ist oder Experimente am realen System unmöglich oder nicht sinnvoll sind, weil sie sich als zu kostspielig, zeitaufwendig, schwierig, risikoreich, ethisch nicht vertretbar oder irreversibel erweisen. Weiters werden Modellbildung und Simulation dann als Planungswerkzeug eingesetzt, wenn das reale System noch gar nicht existiert.

Wann Simulation nicht verwendet werden sollte:

Simulation ist eines der wesentlichen Werkzeuge für viele verschiedene Typen von industriellen Systemen, wie zum Beispiel dem Analysieren der Produktionsperformance, der Validierung eines Designs, für die Demonstration und Visualisierung von Prozessen, um Hypothesen zu testen, und viele mehr. In manchen Unternehmen stellt Simulation mittlerweile sogar eine Hauptrichtlinie für alle größeren Kapitalinvestitionen dar.

Doch eine Frage, die gerne übersehen wird, ist, ob Simulation auch immer das richtige Werkzeug für ein Problem ist bzw. sich der Einsatz lohnt? Banks beschreibt zehn Regeln, anhand derer man vor einem Projekt durchdenken kann, ob eine erfolgreiche Simulationsstudie überhaupt möglich ist [Banks 98 S. 748]:

1. Das Problem kann mit „allgemeinen“ mathematischen Gleichungen gelöst werden.
2. Das Problem kann analytisch schneller gelöst werden als durch Simulation.
3. Es ist einfacher oder schneller am realen System zu experimentieren.
4. Die Simulationskosten übersteigen das mögliche Einsparungspotenzial.
5. Notwendige Ressourcen sind nicht verfügbar, z.B. Menschen, Software oder Gelder.
6. Die vorgegebene Zeitspanne ist zu kurz für eine sinnvolle Simulationsstudie.
7. Benötigte Informationen, wie Daten oder Schätzwerte, sind nicht verfügbar oder unzugänglich.
8. Das Modell kann nicht verifiziert oder validiert werden, da zu wenig Daten, Personen oder Zeit vorhanden sind.

9. Die Erwartungen des Auftraggebers können nicht erfüllt werden.

10. Das Systemverhalten ist zu komplex oder kann nicht definiert werden.

2.5 Vor- und Nachteile der Modellbildung und Simulation

Rasante technische Innovationen in der Computerindustrie haben ermöglicht, was vor einiger Zeit noch als undenkbar galt. So sind in Simulationsprojekten Software und Hardware kaum mehr bedeutsame Kostenfaktoren. Die einst Spezialisten und Großrechnern vorbehaltene Simulationssoftware wurde schneller und einfacher. Die Anzahl der Unternehmen, welche Simulation für sich nutzt, steigt weiter an. Viele Manager realisieren die Vorzüge einer relativ einfachen, mehrmaligen Remodellierung ihrer eigenen Anlagen oder Prozesse. Auch nutzen sie Simulation, um einen Blick in eine mögliche Unternehmenszukunft zu wagen.

Die Modellbildung und Simulation bietet eine Reihe von Vorteilen für die verschiedensten Bereiche der Anwendung. Dennoch muss man klar unterscheiden, welche Bereiche und Ergebnisse möglich und welche sinnvoll sind. Simulation ist ein Instrument zur Problemlösung und bietet, wenn sie gut durchgeführt wurde, Antworten auf konkrete Fragestellungen. Zur korrekten Auswahl der Fragestellung und Zielsetzung kann dieses methodische Instrumentarium keinen Beitrag leisten. [vgl. Page 1991, S.23ff, Bossel 2004, S.50]

Um einen erfolgreichen Einsatz der Modellbildung und Simulation umsetzen zu können, müssen die Grenzen und Risiken beachtet werden, die in solchen Projekten auftreten. Im Folgenden werden alle Vorteile und Nachteile zusammengefasst, die sich teilweise implizit aus den vorherigen Kapiteln ergeben.

- **Alternative zu Realexperimenten:** Einerseits wird das reale System keinerlei Risiko ausgesetzt. Eine Dynamik, die zur Systemzerstörung führen würde, hinterlässt am Computer keine Spuren. Das Simulationsprogramm kann nach wie vor weiter verwendet werden. Damit wird eine umfangreiche Untersuchung potenziell gefährlicher Systementwicklungen möglich.
- **Kosten sparend:** Andererseits kostet die Modellbildung und Simulation im Allgemeinen nur einen Bruchteil dessen, was ähnliche umfassende Untersuchungen realer oder analoger physikalischer Modelle kosten würde.
- **Ressourcen schonend:** Simulationsexperimente können beliebig oft (zum Beispiel durch Parametervariation) durchgeführt werden und sind dabei Ressourcen schonend, da es sich um virtuelle Versuche handelt.

- **Zeitspanne ändern:** Der zeitliche Ablauf des dynamischen Verhaltens von Simulationen kann je nach Bedarf erheblich komprimiert oder erheblich erweitert werden, sodass genaue Beobachtungen der jeweiligen Problemstellung möglich werden.
- **Transparenz:** Die Transparenz der Vorgänge in einem System für Außenstehende, wie z.B. Manager, die im Alltag nicht in der Produktion tätig sind, zu gewährleisten, schafft Systemvertrautheit und hilft bei der Fehlersuche. Des Weiteren kann eine solche Anwendung auch als Training für das Team oder für neue Mitarbeiter verwendet werden.
- **Entscheidungshilfen bei Systemänderungen:** Hier erlaubt die Simulationsstudie eine Abschätzung der Auswirkungen von geplanten Eingriffen in ein Realsystem. Somit kann man frühzeitig vor ungewollten kurz- oder längerfristigen Auswirkungen warnen und Gegenmaßnahmen setzen.
- **Erforschung neuer Möglichkeiten:** Als einer der größten Vorteile wird die Planungsmöglichkeit für neue Systeme, aufbauend auf einem Simulationsmodell, gesehen. Durch eine fundierte Anforderungsanalyse für neue Maschinen oder unbekannte, aber gewünschte Ziele, ergibt sich eine völlig neue Entscheidungshilfe durch Planspiele mit noch nicht realisierten Anlagen oder Ressourcen.
- **Tieferes Systemverständnis:** Simulation führt zu tieferem Systemverständnis für den Modellentwickler, da die explizite Formulierung der Vorgänge zusätzliches a-priori-Wissen und empirische Daten benötigt, und dabei hilft, die verwendeten Hypothesen und die logische Struktur des Modells, aber auch Inkonsistenzen und Unvollständigkeiten sichtbar machen. [vgl. Page 91] Beispiele wären das Erkennen von Schlüsselfaktoren für hochkomplexe Systeme, das Lokalisieren von Flaschenhälsen oder deren Ursachen.
- **Visualisierung:** Durch die heutzutage fast standardmäßige Visualisierung der Abläufe in Simulationsstudien durch Computeranimation werden neue Blickwinkel und Betrachtungsweisen in leichtverständlichen Modellen demonstriert.
- **Erfassung der Systemkomplexität:** Durch Modularisierung der einzelnen

Komponenten und Prozesse eines Systems reduzieren sich die analytischen Anforderungen.

- **Strategiebestimmung:** Simulation bildet einen gemeinsamen Konsens, da eine „objektive“ Einschätzung von Änderungen am Design möglich ist, im Gegensatz zu einer persönlichen Meinung, die von anderen schwieriger nachvollziehbar ist.
- **Wiederverwendbarkeit:** Das modulare System bzw. die Teilsysteme von Simulationsstudien können unter Beachtung der relevanten Einschränkungen wieder in anderen Modellen verwendet werden. Dadurch lassen sich die Ergebnisse aus mehreren Analysen systematisch kumulieren und integrieren.
- **Anregung zur Datenerfassung:** Durch die großen und speziellen Mengen an Daten, welche oft für eine Simulationsstudie benötigt werden, können Lücken in der Betriebsdatenerfassung festgestellt oder vielleicht sogar geschlossen werden. Auch könnte eine solche Studie der Anlass für den Aufbau eines Informationssystems sein.
- **Vielseitigkeit:** Es kann völlig unabhängig von der Art des betrachteten Systems mit einer einheitlichen Methodologie und vielseitig verwendbaren Softwareprogrammen gearbeitet werden. Weiters können die erworbenen Kenntnisse als Ausgangsbasis für neue Studien oder Anlagen dienen.

Die Nachteile der Modellbildung und Simulation sind, wie die Vorteile, in den meisten Fällen in Anbetracht eines gewissen Spielraumes zu sehen, da sie je nach Umsetzungsgrad andere Wirkungen erzielen können.

- **Realitätsferne:** Mit der Abstraktion des realen Systems werden oft Beziehungen falsch interpretiert, Probleme nicht erkannt und falsche Ziele gesetzt. Da sich der Modellbildungsprozess als ein kreativer Akt versteht, der nur über die Zeit und durch Erfahrung gelernt werden kann, bedarf es eines speziellen Trainings, respektive Expertenwissens. Dies ist nicht immer im ausreichenden Maß vorhanden. Dadurch entsteht oft Zweifel an der Realitätsnähe und somit an der Validität der Modelle. Man kann durch eine besonders gründliche Validierung Unsicherheiten weitgehend vorbeugen.
- **Gleichsetzung von Modell und Realsystem:** Gerade mit der anschaulichen Präsentation der Ergebnisse der Modellbildung und Simulation besitzt man eine

attraktive und manchmal sogar beeindruckende Methode, eine Querverbindung zum Realsystem herzustellen. Dies kann zu einer Überbewertung des Modells führen oder wie Banks es formuliert, kann Simulation keine einfache Antwort auf komplexe Fragestellungen geben, da ein Simulationsmodell nur indirekt, über verschiedenen Ebenen der Abstraktion, das reale System repräsentiert.

- **Mangelnde Transparenz:** Simulationsergebnisse und Simulationsabläufe sind oft hochkomplex und für Außenstehende kaum mit vertretbarem Aufwand nachvollziehbar. Transparenz ist wichtig, da Projektteammitarbeiter wechseln oder Modelle nach einiger Zeit einen weiteren Verwendungszweck gefunden haben könnten. Die geforderte Transparenz ist nur durch eine vollständige (alle Ebenen der Simulation betreffende) und verständliche Dokumentation möglich, was die Projektdauer wiederum verlängern könnte.
- **Datenmangel:** In manchen Anwendungsgebieten ist es schwierig, an brauchbares Datenmaterial zu kommen. Die schlechte Datenlage kann dazu führen, dass die Simulation keine passenden Ergebnisse liefert. In solchen Fällen ist es wichtig, zentrale Daten gezielt zu erheben. Der erweiterte Aufwand sollte sich rechtfertigen, zum Beispiel durch den analogen Aufbau einer Wissensdatenbank für ein Unternehmen, damit ein optimaler Einsatz der Ressourcen möglich ist.
- **Fehleranfälligkeit:** Die Komplexität des Modellbildungsprozesses kann in allen Phasen zu Fehlern führen. Zum Beispiel können Inkonsistenzen zwischen dem konzeptuellen Modell und dem Computer-Modell auftreten. Viele Simulationsergebnisse entstehen mit Hilfe von Zufallszahlen, somit sind Fehler oft schwer von zufälligen Ergebnissen zu unterscheiden.
- **Hoher Kostenaufwand:** Modellbildung und Simulation ist mit einem hohem Aufwand verbunden, denn solide Analyse- und Planungsphasen können sehr zeit- und kostenintensiv sein. Ebenso können sich bei der Durchführung schwieriger Simulationsstudien die Rahmenbedingungen derart ändern, dass das Modell nach Abschluss seiner Entwicklung bereits obsolet ist. Weiters kann das Knapphalten von Ressourcen zu einer nicht genügenden Erfüllung der Aufgabenstellungen führen.

- **Computergläubigkeit:** Computersimulation an sich kann keine Probleme eigenständig lösen oder Probleme erkennen – das bleibt den Menschen vorbehalten. Eine möglichst transparente Dokumentation kann hier helfen, ein möglichst objektives Urteil über die Validität eines Modells zu bilden.

2.6 Elemente zeitdiskreter Simulation

In dieser Arbeit werden Elemente zeitdiskreter Simulation behandelt, da das zu analysierende System des im Rahmen des in Kapitel 3 beschriebenen Projekts, ausreichend simuliert werden kann. In zeitdiskreten Simulationen können der interne Zustand oder der Wert jeder Variable zu jedem definierten Zeitpunkt (Systemzeit) abgefragt werden. Das heißt, zeitdiskrete Modelle (discrete event simulation) sind dynamisch, und der Faktor Zeit nimmt eine wichtige Rolle ein.

In zeitdiskreten Simulationen können folgende Elemente verwendet werden:

Zustandsvariablen (System State Variables) sind eine Ansammlung von Information, die man benötigt, um das System in geeigneter Weise und zu einem bestimmten Zeitpunkt zu beschreiben. Die relevanten Zustandsvariablen in einem System zu finden, ist gleichviel Kunst, wie Wissenschaft. In ein und demselben System können, je nach Ziel des Projekts, andere Zustandsvariablen als relevant, sprich systembeschreibend, gelten. Meist zeigt es sich im Laufe des Modellbildungsprozesses, ob eine Zustandsvariable weggelassen werden kann. Zustandsvariable in zeitdiskreten Systemen ändern ihre Werte nur nach Eintritt von Ereignissen. Zustandsvariable benötigen folglich Informationen über Beginn und Ende der Ereignisse (event times), während kontinuierliche Modelle ihre Zustandsvariablen durch Differenzialgleichungen beschreiben, welche sich kontinuierlich im Wert ändern. Prinzipiell gilt es festzuhalten, dass ein Computer (Digitalrechner) immer nur diskret rechnen kann, da jede Eingabe oder Berechnung binär verarbeitet und gespeichert wird. Analogrechner, mechanische oder elektrische Modelle hingegen führen ihre Berechnungen auf der Basis fließender Zustandsübergänge durch. Sie repräsentieren ihre Daten also nicht als diskrete Werte wie die Digitalrechner, sondern zum Beispiel in Form von Spannungen oder Strömen, die zu jedem Zeitpunkt einen wohldefinierten Wert besitzen.

Ereignisse (Events) lösen durch das so genannte Triggern¹⁵ die Veränderung eines Zustandes (state) zu einem bestimmten Zeitpunkt aus, dem so genannten Ereigniszeitpunkt. Man unterscheidet zwei Arten von Ereignissen:

¹⁵ Auslösen eines Ereignisses

- Exogene Ereignisse - sind von der Systemumgebung ausgelöst und sind unabhängig von internen Ereignissen.
- Endogene Ereignisse - treten als Folge von internen Zustandsänderungen ein, unabhängig davon, ob der Ereigniszeitpunkt deterministisch oder stochastisch ist.

Elemente und deren Eigenschaften (Entities and Attribute) beschreiben in der Modellbildung und Simulation Entitäten, welche, je nach dem zu beschreibenden System, verschiedene Formen bzw. Funktionen annehmen können. So kann zum Beispiel in einem Modell eine Entität eine Person sein, eine zweite Entität im selben Modell hingegen eine Schere. Diesen Entitäten können auch Eigenschaften zugeordnet werden. Durch Attribute können Entitäten eigene Informationen verwalten, so könnte die Entität Auto die Attribute „Treibstoff“ und „Insassen“ besitzen, deren Maßzahlen (Volumen bzw. Zahl) sich im Laufe der Zeit verändern, aber immer demselben Element zugeordnet bleiben.

Ressourcen (Resources, Server) sind Elemente, die eine Bearbeitung von Entitäten vornehmen können. Dazu kann eine Ressource mindestens zwei Zustände annehmen - belegt (busy) oder verfügbar (idle). Weitere denkbare Zustände wären: blockiert, kaputt, erschöpft usw. Diese Bearbeitung benötigt je nach Ressource Zeit, nach der die Entität wieder ausgegeben oder weiterverarbeitet werden kann.

Reihenfolgen (List Processing, Queues) – wenn in einem Modell viele Entitäten dieselbe Ressource durchlaufen müssen, kann es, z.B. abhängig von der Bearbeitungszeit, zu Wartezeiten und somit zu Warteschlangen kommen. Um die Warteschlangen der einzelnen Entitäten zu ordnen, werden sie in sogenannte *Queues, Files, Chains* oder *Buffer* gereiht. Um die Ausgabe dieser Listen logisch steuern zu können, kann man verschiedene Verfahren anwenden (List Processing). Das FIFO (first in, first out) und LIFO (last in, first out) Verfahren sind wohl die bekanntesten. Es könnte aber eine beliebige andere Abarbeitungsreihenfolge angewendet werden, wie die kürzeste Abarbeitungszeit oder Zufallsfaktoren.

Aktivitäten (Activities) ist jene Menge von Operationen, die während eines Zeitintervalls ausgeführt wird. Die Wirkung einer Aktivität ist die Zustandsänderung eines Elements, die dem Endzeitpunkt des Intervalls zugeordnet wird. Weiters kann man Aktivitäten planen, da ihre Dauer schon im vorhin bekannt ist bzw. berechnet

werden kann.

Verzögerungen (Delays) sind hingegen von unbestimmter Dauer, die sich aus verschiedenen Bedingungen des Systems ergeben, z.B. Wartezeiten in Queues. Beide, sowohl Aktivitäten als auch Verzögerungen, benötigen für die Auslösung des Beginns und für ihr Ende Ereignisse.

Die Beziehung zwischen Zustand und Zeit kann in einem diskreten Simulationsmodell durch Ereignisse, Aktivitäten und Prozesse (Folgen von Aktivitäten) hergestellt werden.

2.7 Statistische Verfahren und Zufallszahlen

Viele Aktivitäten in der Systemanalyse haben das Problem, dass man ihre Ergebnisse nicht deterministisch vorhersagen kann. Da man meist nur einen Möglichkeitsbereich angeben kann, nennt man solche Prozesse Zufallsexperimente. Simulationsexperimente mit stochastischen Modellen sind daher ebenfalls Zufallsexperimente. Um Zufall in Simulationsmodelle zu integrieren, gilt es, die entsprechenden statistischen Verteilungen für das Modell herzuleiten und die Ergebnisse von Simulationsexperimenten wiederum entsprechend auszuwerten.

Grundlage zufälliger Simulationsexperimente ist die Möglichkeit, real vorhandene Zufälligkeiten in ausreichender Weise im Modell nachzubilden. Nach Page dienen Zufallszahlen zur Realisierung von Zufallsvariablen. Dass heißt, der entsprechenden Variablen wird mittels einer Zufallszahl ein Wert ihres Wertebereichs zugeordnet. Die Transformation von einer stochastisch-physikalischen Aktivität in eine Pseudozufallszahl¹⁶ wird mittels verschiedener deterministischer Algorithmen vollzogen. Diese Algorithmen werden als Zufallszahlengeneratoren bezeichnet. Die Palette solcher Generatoren reicht von einfachen Tabellen bis hin zu hochkomplexen Verfahren, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Hervorzuheben ist, dass Simulationsergebnisse wesentlich von der Qualität der eingesetzten Zufallszahlengeneratoren abhängen und die Gesamtheit der Zufallszahlen jene wesentlichen Eigenschaften abbildet, die es zu simulieren gilt.

Ein großer Vorteil von Pseudozufallszahlen, die aus Generatoren stammen, ist ihre Reproduzierbarkeit, das heißt, es kann ein Simulationsexperiment mit denselben Zufallszahlen beliebig oft gestartet und auf verschiedene Änderungen im Modell getestet werden.

Prinzipiell unterscheidet man Zufallsgeneratoren, die gleichverteilte Zufallszahlen oder Zufallszahlen als Stichproben aus beliebigen Verteilungen liefern. Für die Simulationsstudie, die in dieser Arbeit durchgeführt wurde, benötigt man

¹⁶ Als *Pseudozufallszahlen* bezeichnet man Zahlenfolgen, die durch einen deterministischen Algorithmus (Pseudozufallszahlengenerator) berechnet werden (und somit nicht zufällig sind), aber (für hinreichend kurze Sequenzen) zufällig aussehen. (Wikipedia 22. Juli. 2006) vgl. Ullrich Christian, 06, S.268

Zufallszahlen aus empirischen Verteilungen. Hier entsprechen die Zufallsvariablen keinem theoretischen Verteilungstyp, sondern empirischen Verteilungen. Diese werden mit Hilfe von Histogrammen in entsprechenden Klassen (Teilintervalle) abgebildet, wobei man annimmt, dass die Werte innerhalb einer Klasse gleichverteilt sind. Aus diesem Grund sind die Linien in Histogrammen von einer Klasse zur nächsten auch gerade, das heißt, es wird linear interpoliert.

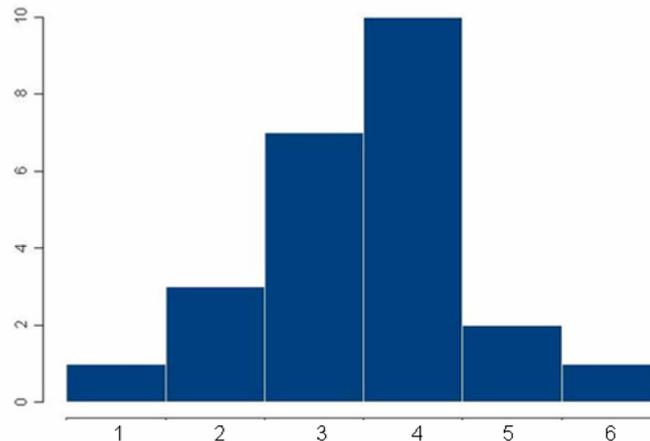


Abbildung 17: Beispiel-Histogramm

Zur genaueren Analyse von Simulationsexperimenten verwendet man häufig die Regressionsrechnung. Mit Hilfe der Regressionsfunktion ist es möglich, auszurechnen, welche Werte, ausgehend von den Pseudozufallszahlen, zu erwarten wären. Da sowohl Histogramme, als auch Regressionsrechnungen mit Standardtabellenkalkulationsprogrammen, wie MS Excel, einfach zu lösen sind, und genauere Angaben hier den Rahmen sprengen würden, wird auf weitere Erläuterungen verzichtet.

Um die aus den empirischen Daten erstellten Histogramme in das Simulationsmodell zu integrieren, müssen sie in eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion oder eine passende Verteilung überführt werden. Am pragmatischsten hierfür erweist sich die Dreiecksverteilung, die über das Histogramm gelegt wird und so die Häufigkeiten mit entsprechenden stetigen Werten umsetzt. Abbildung 18 zeigt ganz links den geringsten und ganz rechts den größtmöglichen Wert des Definitionsbereichs der Verteilung, während die Spitze den größten Wert der Dichtefunktion darstellt.

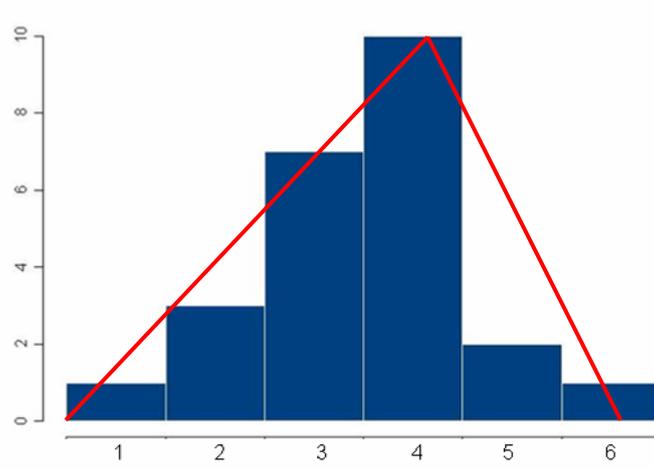


Abbildung 18: Dreiecksverteilung aus Histogramm erstellen

2.8 Simulationssoftware

Wesentlich für eine Simulation ist immer auch die ihr zu Grunde liegende Simulationssoftware, der sogenannte Simulator. Hier wird ein Überblick über die Auswahlkriterien gegeben, die man vor Beginn eines Simulationsprojekts berücksichtigen sollte.

Die Auswahl hängt vom Modelltyp, der Rechnerart, der verwendeten Programmiersprache (Processing) bzw. den Kenntnissen der benötigten Programmiersprache und natürlich von den persönlichen Präferenzen der Entwickler ab [vgl. Bossel 04, S.28f]. Weiters ausschlaggebend ist der spätere Verwendungszweck: benötigt man die Software als Repräsentation oder Schulungslösung oder reichen die errechneten Daten selbst als Ergebnis. Davon hängt ab, welche Software, welche Input- und Outputmöglichkeiten bzw. welche Schnittstellen die Software zu anderen Programmen offeriert, damit die Ergebnisse entsprechend aufbereitet und präsentiert werden können.

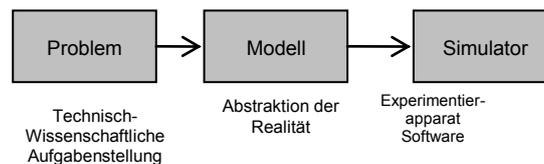


Abbildung 19: Stark vereinfachtes Ablaufschema

Um aus dem großen Angebot an Simulationssoftware die richtige zu finden, gilt es, neben den oben genannten Faktoren noch einige andere zu berücksichtigen. Einer der ausschlaggebenden Entscheidungsfaktoren ist der Preis. Die Preise reichten 1998 von 500\$ bis 50.000\$. Viele große Simulatoren haben sich damals in etwa bei 15.500\$ eingependelt. Heutzutage gibt es einerseits professionelle Simulationssoftware schon um die 6.000\$ und andererseits OpenSource Projekte, die ebenfalls professionelle Software zum Nulltarif (GPL¹⁷) zur Verfügung stellen.

¹⁷ Die GNU General Public License (GPL) ist eine von der Free Software Foundation herausgegebene Lizenz mit Copyleft für die Lizenzierung freier Software.

In der folgenden Tabelle werden die gängigsten Systeme und ihre Einsatzgebiete umrissen.

Produktbezeichnung	Modulares System	Stand-Alone	Logistik	Distribution	Diskrete Fertigung	Prozessfertigung	Qualitätsmanagement	Geschäftsprozessoptimierung
AnyLogic 6 (XJ Technologies)	X	X	X	X	X	X	X	X
ANSYS CFD	X	X	-	-	-	-	-	-
ORion-PI®	X	X	X	X	X	X	-	X
Powersim Studio 7	X	X	X	X	X	X	X	X
ANSYS	X	X	-	-	-	-	-	-
FASTRIM Version 3 R8 SP2	X	X	-	-	-	X	-	-
COMSOL Multiphysics 3.4	X	X	-	-	-	X	-	-
SCALE-RT, Version 4.1	X	X	-	-	-	-	-	-
DELMIA	X	X	X	X	X	X	X	X
Abaqus 6.8	X	X	-	-	-	-	-	-
Integrated Manufacturing Validation (IMV)	X	-	-	-	X	-	X	X
Enterprise Dynamics	-	X	X	X	-	X	-	X
PMS SIM	-	X	-	-	X	X	-	X
Vensim	X	X	X	X	-	X	X	X
Simul8	X	X	X	X	X	X	-	X
Max Load Pro	X	X	X	X	X	X	-	X
Plant Simulation (Siemens PLM)	X	X	X	-	-	X	-	X
AutoMod	X	X	X	X	X	X	-	X
Tops Pro	X	X	X	X	-	-	-	-
Demo3D	X	X	X	X	-	-	-	X

Abbildung 20: Übersicht kommerzieller Simulationssoftware [Quelle: <http://www.it-production.com/> besucht am 20.3.2009]

Zuletzt sollte man sich noch vor Augen führen, wie die Umwelt der Software aussieht. Ist die Software leicht genug zu bedienen, kann man den Umgang schnell genug erlernen? Ist eine qualitative Dokumentation oder ein breites Anwenderspektrum mit Foren vorhanden oder muss man für den Support extra zahlen? Kann man eine lauffähige Version erstellen und diese seinem Kunden weiterverkaufen? Ist die Software stabil und schnell genug für meine Anwendungszwecke? [vgl. Banks 98, S. 813ff]

Im Bereich der der OpenSource Simulationsprojekte gibt es auf SourceForge.net 783¹⁸ registrierte Projekte. Anbei einige Beispiele aus verschiedenen Themengebieten:

- **Scilab** ist keine exakte Kopie von **Matlab**, aber es kommt dem sehr nahe. Für Simulationsprojekte gibt es das **Scicos** Package, das eine grafische Modellierung von dynamischen und hybriden Systemen ermöglicht. [<http://www.scicos.org>]
- **Repast** ist ein Framework für die Erstellung von agentenbasierten Simulationen. Ihre Bibliothek stellt eine große Anzahl von Klassen für das Erstellen, Durchführen, Anzeigen und Datensammeln von agentenbasierten Experimenten zur Verfügung. [<http://repast.sourceforge.net/>]
- **Ns** (NetworkSimulator2) ist ein diskreter Event Simulator, welcher auf die Untersuchung von Netzwerken ausgelegt ist. Ns sieht beträchtlichen Support für die Simulation von TCP, Routing, und Multicast Protokollen über verkabelte and kabellose (lokale and Satelliten-) Netzwerke vor. [<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>]
- **OpenFOAM** - Die Open Source CFD Toolbox ist eine generische, programmierbare Software für Computational Fluid Dynamics (CFD). [<http://www.openfoam.org>]
- Das **Dutchroll project** stellt OpenSource Applikationen für Matlab and Simulink, mit dem Schwerpunkt auf Flugzeugbau, zur Verfügung. Die Hauptapplikationen sind die Flight Dynamics und die Control Toolbox. [<http://home.wanadoo.nl/dutchroll/>]
- **Topographica** hilft mittels Simulation Neurologen und Informatikern topographische Mappen von bestimmten Gehirnfunktionen zu erstellen und zu verstehen. [<http://topographica.org/Home/index.html>]
- **MASS** ist ein javabasiertes OpenSource Projekt der AITIA International AG und im Bereich der Multi Agenten-Simulation und Modellierung von komplexen Systemen anzusiedeln. Eine einfache Programmierungssprache, namens FABLES (Functional Agent-Based Language for Simulation) stellt ein Set an

¹⁸ [Quelle: www.SourceForge.net besucht am 02.10.08]

Funktionen zur Verfügung und stellt die integrierte Umgebung der gesamten Simulationssuite dar. [<http://www.aitia.hu/simulationen>]

Im folgenden Kapitel wird die Simulationssoftware AnyLogic 5 detailliert beschrieben, da sie für das im Rahmen der Dissertation durchgeführte Projekt verwendet wurde.

2.8.1 AnyLogic

Die Simulationssoftware AnyLogic (Version 5) umfasst alle Funktionen zur Simulationsvorbereitung, Durchführung und Auswertung der Projektanforderungen. Sie arbeitet sowohl auf Basis vorgefertigter als auch selbst definierter Modellbausteine. Die Modellbausteine sind in einer erweiterungsfähigen Objekthierarchie eingebunden und enthalten je nach Design Algorithmen des prozessdynamischen Verhaltens der Produktionsanlage. Die mitgelieferte Elementenbibliothek enthält viele fertige Bausteine, die jedoch aufgrund der speziellen Anforderung für das Projekt nicht eins zu eins verwendet werden können.



Abbildung 21: AnyLogic Enterprise Library (Version 5.2)

Durch Plazieren (Drag and Drop) der Elemente auf der Arbeitsfläche lassen sich sehr einfach und rasch Modelle bilden. Die Modellbausteine werden anhand des logischen Ablaufs und des Materialflusses in Verbindung gesetzt und sind danach sofort simulationsfähig. Die Modellelemente können durch Modifizierung der Standardparameter an eine Vielzahl von Szenarien angepasst werden.

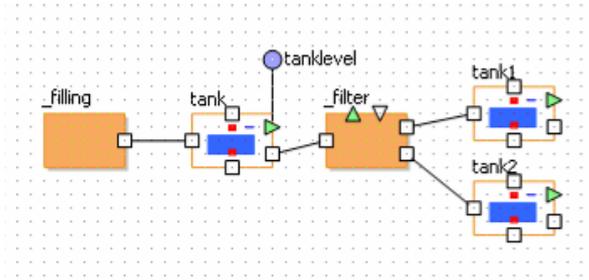


Abbildung 22: Selbstdefinierte Elemente mit Library Elementen verknüpft

Die Handhabung wird durch eine projektnahe Visualisierung sowie eine durchgängig menügestützte bzw. dialogorientierte Nutzerführung erleichtert. Das betrifft sowohl die Parametrisierung für die Dimensionierung der Elemente und deren Verknüpfungen, als auch die Kontrolle über den Simulationslauf.



Abbildung 23: Auswahl des zu startenden Experiments

Für das hier beschriebene Projekt sind geringfügige programmertechnische Kenntnisse des Anwenders in Java erforderlich, um die Steuerung des Ist-Prozesses abzubilden. Dazu kann man in AnyLogic über die Eigenschaften von Ports, Variablen, Chart Timer und Statecharts Codefragmente einfügen oder gar eigene Klassen abrufen.

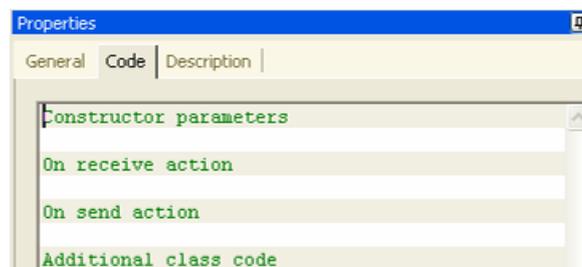


Abbildung 24: Karteikartenreiter Code eines Ports

Die Entwicklung des unternehmensspezifischen Modells ermöglicht es, die normalerweise manuell im Produktionsbericht durchgeführten Berechnungen direkt in das Simulationssystem zu integrieren. Darauf aufbauend können die in punkto Dauer, Ausgangsmenge und Endprodukt zum Teil sehr unterschiedlichen Produktionschargen valide simuliert werden.

Das Simulationsmodell (oder genauer AnyLogic) kann je nach unternehmensspezifischer Schwerpunktsetzung relativ einfach modifiziert werden. So lassen sich spezielle Fragestellungen behandeln, wie zum Beispiel die Analyse von Engpässen oder das Errechnen der maximalen Auslastung der Produktionsanlage. Neben dem Einsatz als Projektierungs- und Analysewerkzeug durch die Erweiterung der interaktiven Eingriffsmöglichkeiten oder die Entwicklung einer photorealistischen Animation des Produktflusses für die Qualifizierung und für die Präsentation kann AnyLogic auch im Schulungsbereich unterstützen.

Auf einem modernen PC¹⁹ erlaubt es der Simulator, das Verhalten auch umfangreicherer Anlagen oder größerer Chargen mit großer Zeitraffung nachzubilden. Die Möglichkeit, dies für jede zu untersuchende Produktions- und Anlagevariante vorzunehmen, verdeutlicht die gute Anwendbarkeit des Simulators.

Die in AnyLogic gewählte Simulationsmethode wird durch eine frei wählbare Anzahl automatisch zu wiederholender Simulationsdurchläufe unterstützt und kann für jeden Durchlauf protokolliert werden.

Damit wird es möglich, sich schon während der Projektzielerstellung auf unterschiedliche Prozessdaten für die Auswertung zu konzentrieren. Der Vorteil eines unternehmensspezifischen Simulationsmodells liegt dabei darin, dass sich während der Nutzung abschätzen lässt, für welche Belange des Unternehmens das Simulationsmodell weiterentwickelt werden kann.

¹⁹ Referenzmodell 2006 mit 1024MB RAM, 2600+ AMD CPU, NForce2 Chipsatz

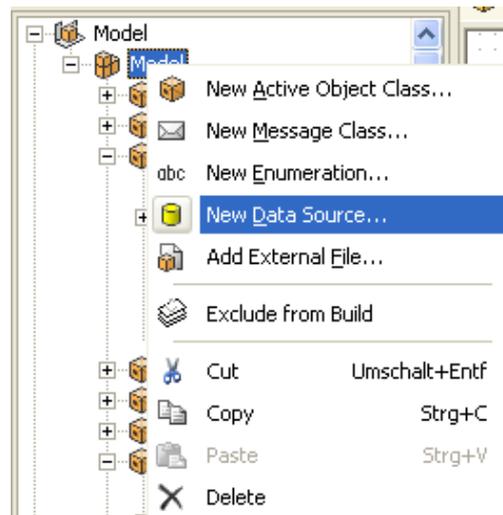


Abbildung 25: Datenquelle für das Modell hinzufügen

Die Auswertung der protokollierten Simulationsdaten ist mit jedwedem gängigen Tabellenkalkulationsprogramm, wie zum Beispiel MS Excel, möglich.

2.8.1.1 Aktive Objekte

Die modularen Bausteine heißen in AnyLogic, wie in allen objektorientierten Programmiersprachen, Objekte (=active objects). Diese Objekte können verschiedene Funktionen bzw. Aktionen wahrnehmen. Die Objekte werden in Objektklassen entwickelt und stellen bei der Ausführung Instanzen der übergeordneten Klasse dar.

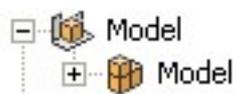


Abbildung 26: Objekt Klasse "Model"

2.8.1.2 Struktur Diagramm

Mit jedem Objekt ist ein Struktur Diagramm verknüpft. Dieses kann mehrere Funktionen erfüllen:

- Es stellt die Schnittstelle der Objektklasse dar
- Es definiert die beinhalteten Objekte und deren Interaktionen
- Es definiert das Verhalten der Elemente, wie z.B. Timer und Statecharts

Das Struktur Diagramm besteht aus mehreren Teilen: dem Objekt selbst, den beinhalteten Objekten, Ports, Variablen, Connectoren, Charttimer, Statecharts und Textboxen.

2.8.1.3 Ports

Ports stellen die Schnittstellen zwischen einzelnen Objekten oder Variablen dar. Sie werden entweder mit Connectoren fest verbunden oder können mit Befehlen zeitgesteuert verbunden oder getrennt werden.

2.8.1.4 Variablen

Variablen definieren einerseits Startwerte, andererseits können sie algorithmische Werte je nach definierter Berechnung in einem Objekt annehmen bzw. zugeordnet bekommen (state variables). Sie können in Objekten auch als Input- oder Outputvariablen zu anderen Objekten verwendet werden, um so Werte über Connectoren zu übernehmen oder abzugeben (interface variables).

2.8.1.5 Parameter

Parameter sind im Gegensatz zu Variablen Fixwerte, die ihren definierten Anfangswert im Simulationslauf behalten.

2.8.1.6 Connectoren

Connectoren stellen die visualisierte Verknüpfung zwischen zwei oder mehreren Ports oder Variablen von Objekten dar. Über diese Verbindungen können Nachrichten, so genannte Messages, gesendet werden.

2.8.1.7 Messages

Um zwischen Ports, Ports und Statecharts oder Objekten zu kommunizieren, werden Messages gesendet. Messages sind Nachrichten, die über die Send-Methode aufgerufen werden. In diesem Simulationsmodell der Produktion ist es sogar ausreichend, nur eine Instanz der Objekt Klasse ohne Informationen (leere Nachricht) aufzurufen, über die Receive-Methode zu empfangen und darauf eine nachfolgende Aktion auszuführen.

Zusammenfassend erweist sich AnyLogic durch eine benutzerfreundliche Oberfläche, kombiniert mit den benötigten Modellierungsmöglichkeiten, als das

richtige Werkzeug, um die unterschiedlichen Anforderungen des Projekts, wie Modellentwicklung, Simulation, Planung und eine mögliche Optimierung zu erfüllen.

Im folgenden Kapitel wird die Anbindung von Datenquellen in AnyLogic an Hand von Microsoft Excel (Version 2003) erläutert.

2.8.1.8 Datenanbindung und Datenprotokollierung mit Microsoft Excel

Einführung

Um in AnyLogic die Daten und Ergebnisse der Experimente protokollieren zu können, gibt es mehrere Möglichkeiten:

Es kann die **Standardvariante der Aufzeichnung** gewählt werden, die über das „New Chart“-Symbol zu finden ist. Dieses Symbol (Abbildung 27) kann jedoch nur ausgewählt werden, wenn das Simulationsprojekt bereits gestartet wurde.

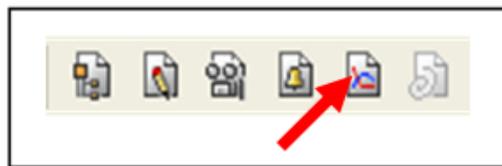


Abbildung 27: New Chart Symbol

Der weitere Vorgang der Datenerfassung, gestaltet sich etwas problematisch, da die in den Charts zu protokollierenden Daten händisch ausgewählt und die Diagramme bei jedem Simulationslauf graphisch neu erstellt werden müssen. Dieser Weg kostet viel Rechenleistung und wird bei vielen zu protokollierenden Variablen und Parametern rasch mühsam.

Wenn die Simulationsläufe fehlerfrei abgelaufen sind, können die Ergebnisse in eine Exceltabelle exportiert und damit weiterverarbeitet werden. Wird das „New Chart“-Fenster einer Simulation vor diesem Arbeitsschritt geschlossen, so muss der gesamte Prozess von Vorne gestartet werden. Weiters gehen bei einem Programmabsturz während des Protokollierens die aufgezeichneten Daten zur Gänze verloren.

AnyLogic kündigt an, dass man in späteren Versionen die Simulationsergebnisse unter einem Namen speichern und später noch einmal den gesamten Lauf Revue

passieren lassen kann. Ebenso sollen die Ergebnisse von etlichen Läufen auf verschiedene Diagramme für einen Vergleich aufgeteilt werden können.

In der hier verwendeten Version 5 stehen diese Features leider nicht bereit. Für größere Datenmengen ist es besser, sich die Ergebnisse der Simulationen und Experimente in eine Datenbank oder in eine Exceltabelle schreiben zu lassen. Dies funktioniert durch die Verwendung der **Datenbankunterstützung von AnyLogic**. Dies hat unter anderem den Vorteil, dass die Daten unproblematisch mit vielen anderen Standardprogrammen ausgetauscht werden können. Unterstützt werden viele gängige Programme und Formate, wie Access, Excel, Visio oder Textdateien.

Generell wird in AnyLogic die Java Database Connectivity (JDBC) Datenbankkonnektivität genutzt, um mit externen Daten zu arbeiten. Dennoch gestaltet sich die Handhabung etwas anders als bei „normalen“ SQL²⁰-Datenbanken und deren Abfragen. Um dieser Problematik Herr zu werden, werden zusätzlich die in *AnyLogic Class Reference* definierten Befehle angewendet.

Aus dem „Beginner Forum“ auf der AnyLogic Website lässt sich entnehmen, dass das Thema Datenbanken- oder Excelverwendung immer wieder zu Problemen und Fragen führt.

In dieser Arbeit wurde Microsoft Excel als Zielformat gewählt, um die Portabilität der Simulationen und deren Ergebnisse zu gewährleisten.

Erstellen und Verwenden einer Datenquelle

Prinzipiell wird zwischen einer „echten“ Datenbank (MSSQL, MySQL, Oracle, Access, usw.) und anderen Speichermöglichkeiten, wie zum Beispiel Excelarbeitsmappen, die ebenfalls eine tabellarische Auflistung der Datensätze ermöglichen (aber per Definition keine Datenbanken darstellen), unterschieden.

Bei beiden Datenquellentypen werden einerseits Spalten, die eine Reihe von Daten kennzeichnen, und Zeilen, in denen Informationen eines Datensatzes gespeichert werden, unterschieden.

²⁰ SQL (Structured Query Language) ist eine Sprache für Datenabfrage und Datenänderung in relationalen Datenbanken.

Um Informationen gesamthaft oder aggregiert abzurufen, müssen die Spalte und die Zeile auf irgendeine Weise selektiert werden. Dieser Vorgang wird datenbanktechnisch „Abfragen“ genannt. Diese Abfragen, auch SELECT-Statements, basieren in AnyLogic ebenfalls auf den Grundlagen von SQL, unabhängig in welcher Form die Daten vorliegen. Das Ergebnis einer Abfrage kann auch als View festgehalten werden, wodurch das SELECT-Statement als virtuelle Tabelle gespeichert wird.

Erstellen der Verbindung

Um einem Simulationsprojekt eine Datenquelle (hier Excel) zur Verfügung zu stellen, muss über das Menü „Insert → New DataSource“ eine Datenquelle hinzugefügt werden. Danach sollte der Datenquelle ein sprechender Namen geben werden, um später noch zuordnen zu können, welche Daten in welcher Quelle abgefragt oder geschrieben werden. Danach wird die Datenquelle dem Projektbaum graphisch angefügt (siehe Abbildung 28).

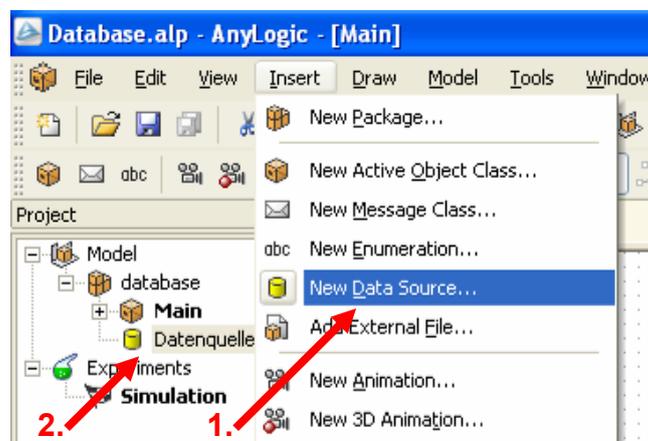


Abbildung 28: Einfügen einer neuen Datenquelle

Nachdem eine Datenquelle erstellt wurde, muss diese mit den eigentlichen Daten verknüpft werden. Dazu wird die im nächsten Schritt verwendete Excelarbeitsmappe noch aufbereitet.

Zuerst wird eine neue Arbeitsmappe geöffnet und überlegt, ob alle Ergebnisse auf dem gleichen Registerblatt zur Verfügung stehen sollen oder separiert dargestellt werden. Dazu muss in jedem Arbeitsblatt, das verwendet werden soll (am besten in die erste Zeile) in jeder benötigte Spalte eine Spaltenbezeichnung eingeben werden.

Die Spalten oder Tabellen werden danach markiert und an Hand der Excelfunktionen (siehe Abbildung 29, Punkt 2) als neue Namen definiert. Diese Namen entsprechen in einem Aufruf durch AnyLogic dem Tabellennamen (tables). Die Namen, die in der ersten Zeile Excelfunktionen (Abbildung 29, Punkt 1) eingetragen werden, definieren die Spaltennamen (columns).

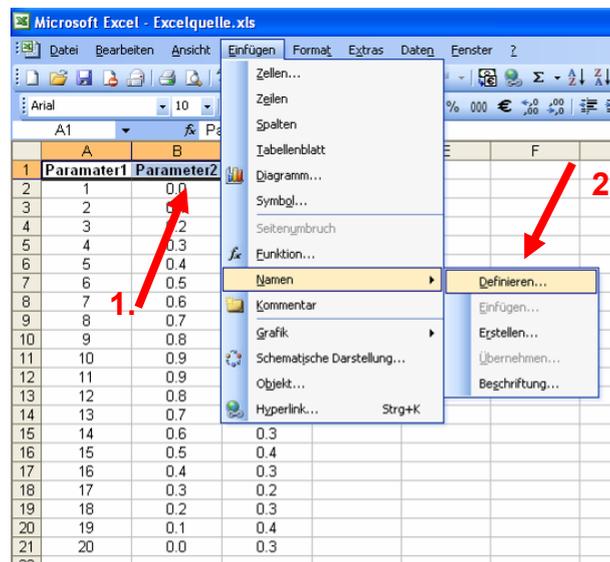


Abbildung 29: Spaltennamen in Excel definieren

Nach der Definition der Namen können, zum Beispiel, Ausgangsparameter in die Datenquelle eingetragen werden. Wichtig ist, dass Datenquellen - speziell Files - während der Verwendung nicht in anderen Applikationen aufgerufen werden. Bei einer Datenbank gibt es dieses Problem nicht, da diese speziell für die gleichzeitige Verwendung vieler Verbindungen und Transaktionen erstellt worden sind. Für kleine Projekte und Modellierungen ist Excel als Datenquelle jedoch komfortabel und vollkommend ausreichend.

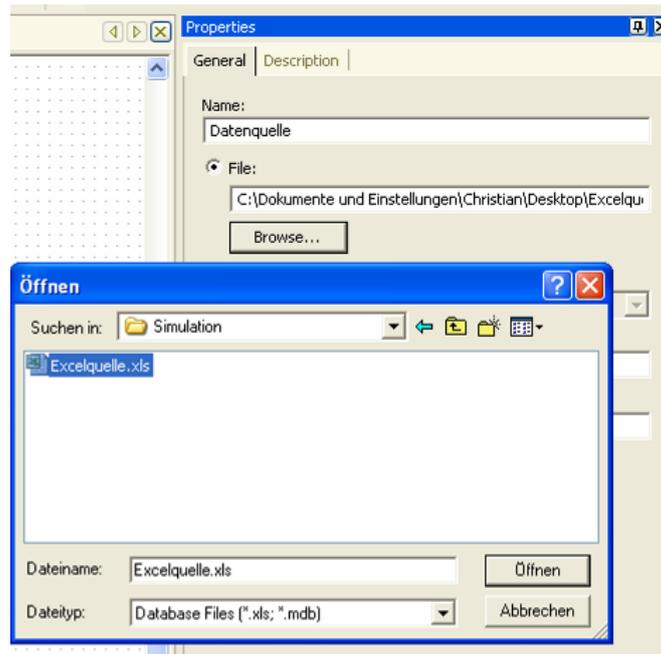


Abbildung 30: Hinzufügen einer Excelarbeitsmappe als Datenquelle

Abschließend wird die Datenquelle über deren Eigenschaften mit der aktuellen Simulation verknüpft. Dazu wird folgender Weg im Menü verwendet:

Registerkarte → General → Radialbutton File auswählen, danach mit „Browse“ den Pfad bis zum gewünschten Excelfile eingeben und zuletzt mit „Öffnen“ bestätigen.

Lesen und Verwenden der Daten

Um darzustellen, wie Daten auszulesen und in weiterer Folge als Variablen oder Parameter zu verwenden sind, wird eine kurze Einführung in grundlegende SQL-Befehle benötigt. Abfragen können je nach Verwendung auch als eine Art Filter gesehen werden, um aus der Menge an Daten gezielt einige auszuwählen und nach Wunsch zu transformieren oder direkt auszugeben.

Der Befehl, um Abfragen in einer Tabelle durchzuführen, setzt sich aus **SELECT Spalte(n) FROM Tabelle WHERE = Bedingung** zusammen, wobei die WHERE-Bedingung nicht verpflichtend angehängt werden muss. Eine Eigenheit von AnyLogic ist, dass die Zellen als String Argument übernommen werden, sodass man die ausgelesenen Ergebnisse gegebenenfalls in ein Zahlenformat umwandeln muss.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C
1	Parameter1	Parameter2	Parameter3
2	1	0.0	0.2
3	2	0.1	0.3
4	3	0.2	0.4
5	4	0.3	0.5
6	5	0.4	0.4
7	6	0.5	0.3
8	7	0.6	0.2
9	8	0.7	0.3
10	9	0.8	0.4
11	10	0.9	0.5
12	11	0.9	0.4
13	12	0.8	0.3
14	13	0.7	0.2
15	14	0.6	0.3
16	15	0.5	0.4
17	16	0.4	0.3
18	17	0.3	0.2
19	18	0.2	0.3
20	19	0.1	0.4
21	20	0.0	0.3

Abbildung 31: Als Experiment definierte Exceltabelle

Um nun spezielle Daten während der Simulation auslesen zu können, sollte eine Abfrage in AnyLogic zum Beispiel folgendermaßen aussehen (Abbildung 32):

```

Startup code
String result;
result = Datenquelle.getValue( "SELECT Parameter2 FROM Experiment WHERE Paramater1 = 5.0;" );
println( result); // Zur Ausgabe im GlobalLog-File
if ( result != null )
Wert = Double.valueOf( result ).doubleValue(); // Wandelt String in Real um.

```

Abbildung 32: Code-Beispiel für das Auslesen und Zuweisen von Exceldaten

In der ersten Zeile der Abbildung 32 wird ein String definiert, dem das Ergebnis der Abfrage zugewiesen wird. Das Abholen der Daten geschieht mit dem Befehl `Datenquelle.getValue("SQL-Abfrage")`, davor steht durch einen Punkt getrennt der Name der Datenquelle, die verwendet wird. Dies ist nötig, da in AnyLogic mehrere Datenquellen in einem Modell definiert werden können.

Die Abfrage verwendet nun die Tabelle *Experiment* (Abbildung 31) und gibt den Inhalt der Zelle *Parameter2* aus, wo der *Parameter1* einem Wert von 5.0 entspricht (ohne Anführungszeichen!).

Mit dem Befehl `println(String)` wird das Ergebnis der Abfrage in das globale Logfile

in AnyLogic eingetragen. Dies empfiehlt sich zur Fehlersuche oder zur Überprüfung der Ergebnisse.

Anhand der *if (result != null)* Funktion wird geprüft, ob der Inhalt des Strings leer ist oder nicht. Wenn er nicht leer ist, findet die Zuweisung der nächsten Zeile statt.

Dabei wird der Variablen Wert (als *real* definiert) der String, umgewandelt als double Zahl, zugewiesen. Nun können die ausgelesenen Daten im Modell als normale Variable oder Parameter verwendet werden.

Auch komplexere Abfragen können mittels der Class Reference ausgeführt werden.

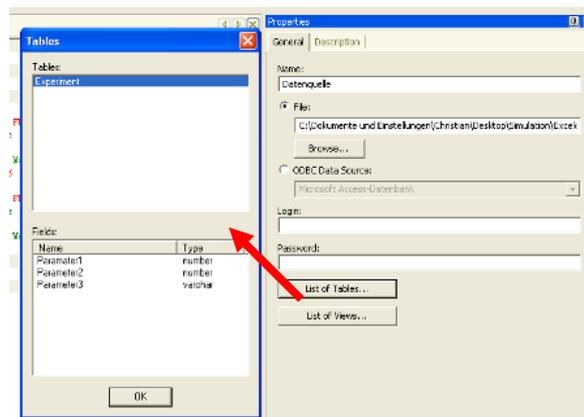


Abbildung 33: Spaltentypen

Um Variablen oder Parameter aus dem laufenden Modell in Abfragen weiterzuverwenden, muss die SQL-Abfrage unterbrochen und die AnyLogic Variable unter Anführungszeichen und eingeschlossen von Pluszeichen eingefügt werden. Beispiel:

```
result = Datenquelle.getValue( "SELECT Param2 FROM Experiment WHERE  
Param1 = "+var+"");
```

Die Argumente in den WHERE-Bedingungen müssen vom selben Datentyp sein wie die Spalte. Wichtig ist hier, dass keine Anführungszeichen gesetzt werden, wie man es aus SQL-Befehlen gewöhnt ist. Um festzustellen, welchen Typ eine Spalte hat, kann unter den Datenquelleneigenschaften die Liste der Tabellen „List of Tables“ aufgerufen werden.

Protokollieren der Experimentergebnisse

Die Analyse der Outputdaten ist einer der entscheidenden Schritte in der Modellbildung und Simulation, um an verwertbare Informationen aus dem Modell zu gelangen und um auf das reale System Rückschlüsse ziehen zu können. Daher ist es wichtig, sich über die Art und Weise der Protokollierung Gedanken zu machen, in welcher Form die Daten weiterverarbeitet oder dargestellt werden sollen. Auch hier zeigen sich die Vorteile durch die Verwendung von Excel, welches die Auswertung der Experimentdaten sowohl grafisch als auch mathematisch anspruchsvoll unterstützt.

Schreiben von Datensätzen

Um Datensätze in eine Excelarbeitsmappe zu schreiben, muss man wissen, dass AnyLogic Zahlen standardmäßig mit Punktkommata "1.0" darstellt, im deutschsprachigen Raum wird jedoch standardmäßig mit Strichkommata „1,0“ gearbeitet. Werden die Daten nicht wieder eingelesen, können mit Hilfe der Ersetzen-Funktion die Punktkommata Zahlen problemlos in Strichkommata umgewandelt werden.

Um mit SQL-Befehlen Datensätze in Excel hinzuzufügen, wird mittels INSERT- oder UPDATE- Befehlen gearbeitet. INSERT schreibt einen neuen Datensatz oder Wert unter die letzte Zeile der Tabelle, wo noch Datensätze zu finden sind oder einmal waren. Dass heißt, das Löschen von alten Datensätzen aus dem Excelfile entspricht nicht dem DELETE-Befehl aus SQL. Eine Möglichkeit, dies wieder zu ändern, ist, den Bereich der Definition in Excel auf den neuen Datenbereich zu ändern.

299						
300						
301						
302	2747.36348459051	57.711224	34.0	3148.0	670.0	
303	2793.38486858097	59.251240	37.0	3246.0	679.0	
304	2633.1306617108	55.798665	39.0	3014.0	640.0	
305	2761.2065267854	59.368636	53.0	3235.0	678.0	

Abbildung 34: Beispiel, wenn in Excel Daten gelöscht wurden, der Bereich der Namensdefinition jedoch nicht geändert wurde

Das INSERT-Statement wird in AnyLogic anhand des *modify()* –Befehls ausgeführt. Im Folgenden wird der Tabelle ein neuer Datensatz hinzugefügt:

```
Datenquelle.modify( "INSERT INTO Experiment VALUES ('21','1.0','1.0');" );
```

Die Spalten werden der Reihe nach eingefügt, d.h. zuerst *Parameter1*, *Parameter2* und zuletzt *Parameter3*. Um Variablen wieder dynamisch aus einer Simulation zurückzuschreiben, würde der Aufbau wiederum folgendermaßen aussehen:

```
Datenquelle.modify( "INSERT INTO Experiment VALUES  
('"+var1+"','"+var2+"','"+var3+"');" );
```

Ändern von Datensätzen

Durch das Updaten von Datensätzen kann nicht nur ein Wert geändert, sondern auch der Datensatz mit weiteren Attributen versehen werden.

Es sollte vermieden werden, Spalten mit „number“, „char“ oder „variable“ zu bezeichnen, da dies im Rahmen der Abfragen zu Problemen führt. Werden solche Bezeichnungen aber unbedingt benötigt, kann mit Präfixen gearbeitet werden. Zum Beispiel 'my_char', 'my_number' oder „my_variable“.

Für das Updaten wird analog zum Insert-Befehl eine Datenquelle unter der Verwendung des modify()-Befehl ausgeführt.

```
UPDATE Tabellenname SET Parameter ='Wert' WHERE Parameter=Wert;
```

Mit SET wird der neue Wert, der in die Zelle geschrieben werden soll, definiert. Mit der WHERE-Bedingung kann der Aktionsradius wieder eingeschränkt bzw. genauer definiert werden.

```
Datenquelle.modify( "UPDATE Experiment SET Parameter2 = '9' WHERE  
Parameter1=21; " );
```

Um in einer speziellen Zelle einen Wert zu ändern oder einer leeren Zelle einen neuen Wert zuzuweisen, müssen die Tabelle und die zugehörigen zu ändernden Parameter bekannt, und am besten eindeutig beschrieben sein.

Komplexere SQL-Befehle werden im Rahmen der Dissertation nicht benötigt und

werden daher auch nicht genauer erörtert.

Fehlersuche

In AnyLogic werden alle Ausgaben, die mittels *println()* ins globale Logfile geschrieben werden, in der Datei *model.log* festgehalten. Normalerweise befindet sich die Datei im „My Models“-Ordner und es wird für jeden Simulationslauf weitergeschrieben.

Generell wird für jedes Modell im jeweiligen Wurzelverzeichnis ein eigenes Logfile erstellt. Für größere Projekte sollten daher immer eigene Projektordner erstellt werden. Dies ist für die Fehlersuche unerlässlich. Wenn nur ein einfacher Bericht aus dem Simulationsmodell benötigt wird, kann auch ein eigenes Textfile generiert werden, damit die Übersicht gewahrt bleibt (mittels der Klasse *Xva.io.** und den entsprechenden Befehlen).

Das Löschen des Logfiles hat keine Auswirkung auf das Modell, es wird lediglich erneut erstellt und beschrieben. Jeder neue Eintrag beginnt folgendermaßen:

```
Started...  
AnyLogic simulation engine has started [Id: Engine.Xva,v 1.134 2004/12/03 08:49:39 basil Exp $]
```

Danach wird, sofern eine Datenquelle verknüpft wurde, der Datenbanktreiber geladen und auf das jeweilige Objekt referenziert.

```
DSN: DRIVER={Microsoft Excel Driver  
(*.xls)};DBQ=C:\Pfad_zur_Datenquelle\Excelquelle.xls;READONLY=FALSE;HDR=NO  
Con: sun.jdbc.odbc.JdbcOdbcConnection@f2225f
```

Auch zusätzliche Informationen zu Fehlern im Zusammenhang mit Datenquellen können in der *model.log*-Datei gefunden werden. Sie kennzeichnet folgender Fehlerhinweis:

```
Xva.sql.SQLException: [Microsoft][ODBC Excel Driver] ....
```

Das heißt, es gibt Fehler im Zusammenhang mit SQL und dem Excel-Treiber. Danach leistet eine detaillierte Ausgabe von möglichen Fehlerursachen ausgezeichnete Hilfestellung für das Entfernen von Programmfehlern:

“Stellen Sie sicher, dass das Objekt existiert und dass die Namens- und Pfadangaben richtig eingegeben wurden.“

3. Methodischer Ablauf

In diesem Kapitel wird die angewandte Methodik des Simulationsprojektes beginnend mit der Fragestellung, über die Modellbildung bis hin zur Interpretation der Experimente beschrieben.

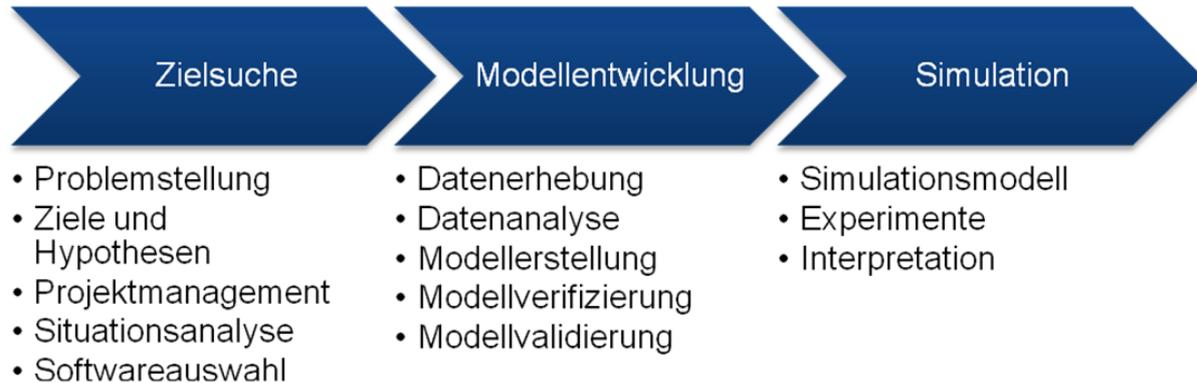


Abbildung 35: Methodischer Ablauf

Zielsuche

Im ersten Schritt, der Zielsuche, wird über eine Situationsanalyse das Umfeld des Simulationsprojektes erörtert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden als Basis für die Zielformulierung und Abgrenzung herangezogen. Weiters werden auf Grund dieser Informationen erste konzeptionelle Modelle gezeichnet und durchdacht. Darauf aufbauend wiederum ergibt sich eine skizzenhafte Versuchsplanung (Experimente), in der die zu lösenden Problemstellungen und zu untersuchenden Produktionsszenarien möglichen Lösungsansätzen gegenübergestellt werden. Nun kann mit der Evaluation nach einer Simulationssoftware begonnen werden, mit der sich die Simulation und die gewünschten Experimente umsetzen lassen.

Modellentwicklung

In der darauf folgenden Modellentwicklung werden die Abläufe der Ziel- und Systemdefinition in ein Modell überführt. Für die jeweiligen Modellierungsphasen werden abwechselnd die Schritte der Verifizierung und Validierung zur Überprüfung des Modells beziehungsweise zur Fehlerbehebung verwendet. Dies wiederholt sich solange, bis ein ausreichend gutes Abbild des Produktionsprozesses erreicht wird.

Die Richtigkeit des erarbeiteten Modells muss nochmals gesamthaft überprüft

werden, dazu finden einige Testdurchläufe statt, die mit gespeicherten Produktionsdaten abgeglichen werden.

Simulationsläufe & Experimente

Aufbauend auf dem validierten Modell kann eine variantenreiche und sinnvolle Simulation die verschiedenen Szenarien der Produktion durchspielen und so zum Beispiel helfen, Optimierungen aufzufinden und vorzunehmen.

Weiters werden die Experimente der Versuchsplanung prognosetechnisch auf einer guten Basis durchgeführt.

Im letzten Schritt, der Ergebnisanalyse, wird eine Interpretation der Simulationsläufe und der Experimente durchgeführt, um die Wertigkeit der Ergebnisse und der Zielerreichung einschätzen zu können.

3.1 Zielsuche

Im praktischen Teil dieser Arbeit wird die Konstruktion eines Simulationsmodells für einen speziellen Herstellungsprozess der Firma Octapharma Pharmazeutika Produktionsges mbH. (im Folgenden kurz Octapharma genannt). in Wien beschrieben. Die zunehmende Komplexität und Dynamik in Produktionsprozessen im Pharmabereich führt zu immer neuen Herausforderungen in der Planung und Optimierung von Produktionsmitteln und Anlagen. Dieses Modell dient für das Unternehmen vor allem als „Proof of Concept“, um die Einsetzbarkeit und den Nutzen von Simulationsmodellen in der eigenen Produktionslandschaft bestmöglich abschätzen zu können.

3.1.1. Problemstellung

Im Speziellen wird für das Produkt Octagam²¹, ein Medikament, welches wichtige menschliche Eiweißstoffe zur Abwehr von Infektionskrankheiten beinhaltet, der Teilprozess der Paste-II-Fraktionierung simuliert.

Durch den immer gültigen Bedarf an optimierten Produktionsabläufen und niedrigen Produktionskosten ist es wichtig, eine anwenderfreundliche und zukunftsorientierte Optimierung für diese heikel zu justierenden Systeme zu finden. Durch ein aussagekräftiges Modell können Optimierungspotentiale und Flaschenhälse erörtert, Planungen und Investitionen im Vorhinein besser abgeschätzt werden.

Im Produktionsbereich der Octapharma kann der effiziente Einsatz von Produktionsequipment, wie zum Beispiel Pumpen, Tanks, Filterpressen und Zentrifugen, durch die Nutzung computerbasierter Simulation unterstützt werden. Anhand dieses Simulationsprojekts wird betrachtet, inwieweit sich der Einsatz von

²¹ Octagam (flüssiges Immunglobulin i.v. zur Infusion) wird aus einem Plasmapool mit mindestens 3600 Plasmaspenden zur Virusinaktivierung hergestellt. Anwendungsgebiete: Bei wiederkehrenden bakteriellen Infekten bei multiplem Myelom, einem vom Knochenmark ausgehenden Tumor, chronisch lymphatischer Leukämie oder einer bösartigen Erkrankung der weißen Blutkörperchen, bei der Geburt übertragener HIV-Infektion mit wiederkehrenden bakteriellen Infekten, Personen, deren eigene Antwort des Abwehrsystems kontrolliert oder angepasst werden soll oder auch dem Kawasaki-Syndrom, einer Lymphknotenerkrankung mit Fieber, bei der viele Organe beteiligt sind, in Verbindung mit einer Behandlung mit Salicylaten Knochenmarksübertragungen.

Simulation für die Produktionsoptimierung mehrwertbringend im Rahmen der Herstellung der Paste-II-Fraktion verwenden lässt.

Um eine zielgerichtete Modellierung der definierten Produktionsabläufe zu gewährleisten, musste das hochkomplexe und streng vertrauliche Produktionswissen der Octapharma durch Dokumente, Expertisen und Fachwissen in das Projekt einfließen.

Dieser Informationsfluß wird seitens der Octapharma durch den für diesen Bereich zuständigen Herstellungsleiter sichergestellt.

Eine der Schwierigkeiten der Modellierung liegt in der validen Abbildung der Produktionsergebnisse, die nicht in einem transparenten statistisch-kausalen Zusammenhang zu den verwendeten Ressourcen stehen. Variierende Chargengrößen und verschieden lange Produktionszeiten für teilweise dieselben Ein- oder Ausgabemengen führen zusätzlich zu einer sehr interessanten Problemstellung:

„Inwiefern lassen sich hochkomplexe Abläufe mit teils großen Differenzen in der Produktionsdauer und –menge so abbilden, dass darauf aufbauend für das Unternehmen nützliche Informationen gewonnen werden können?“

Aus dieser Fragestellung lassen sich die im Folgenden beschriebenen Ziele und Hypothesen ableiten.

3.1.2. Ziele und Hypothesen

Für die Octapharma Wien haben sich im Wesentlichen zwei Kategorien von Zielen als relevant erwiesen.

Einerseits Ziele, die der Erweiterung des (wissenschaftlichen) Erkenntnisstandes durch die Erarbeitung eines gültigen Modells der Produktion dienen, welches das dynamische Verhalten der Prozesse realitätsnah am Computer wiedergibt. Solche Modelle können durch den zu erwartenden Wissenszuwachs als Grundlage für neue Projekte dienen. Weiters wird dadurch ein neuer, breiterer Blickwinkel für die Unternehmensplanung und -führung ermöglicht. (vgl. Hypothese 1)

Andererseits können praktische Ziele für mögliche Anwendungsszenarien getestet

bzw. Lösungen für inhärente Probleme gefunden werden. Solche Ziele sind zum Beispiel das Auffinden von möglichen Flaschenhälsen, die Planung von Anlagenaus- und -neubau, Auslastungsschätzungen anhand des bestehenden Produktionsequipments der jeweiligen Produktionsstätte, eine Chargen-Zyklus-Optimierung oder der Vergleich verschiedener Produktionsstandorte (vgl. Hypothese 2).

Die Erreichbarkeit der oben angeführten Ziele soll durch folgende Hypothesen belegt werden:

- **Hypothese 1:** Es wird erwartet, dass das Simulationsmodell eine realitätsnahe Abbildung der Produktion darstellt, an Hand derer man Produktionsabläufe in Hinblick auf Dauer, verbrauchte Ressourcen und Ausgabemenge der Paste II-Fraktion simulieren kann.
- **Hypothese 2:** Wenn Hypothese 1 eintritt, können durch Experimente am validen Simulationsmodell die Auswirkungen von Änderungen in der Produktion verwertbar vorhergesagt werden.

Zu prüfende Szenarien:

- Die Zeitersparnis einer Produktionsmengensteigerung lässt sich plausibel prognostizieren.
- Die Produktionskapazität eines bestehenden Systems anderer Chargengröße kann durch das Modell ausreichend abgeschätzt werden.

3.1.3. Projektmanagement

Das Projektmanagement stellt den organisatorischen Rahmen zur Projektdurchführung dar. Auf Grund der Größe des Projekts - ein Projektleiter mit allen Funktionen und Aufgaben – wird darauf nicht tiefer gegangen. Das Gantt-Diagramm unterstreicht den flachen Projektmanagementbedarf. Die blauen Balken markieren den geplanten Zeitbedarf einer Aufgabe, wenn sich diese überschneiden müssen mehrere Aufgaben gleichzeitig durchgeführt werden. Die Aufgabe 1 gruppiert, drei darunterliegenden Aufgaben und wird daher mit schwarzen Dreiecken gekennzeichnet.

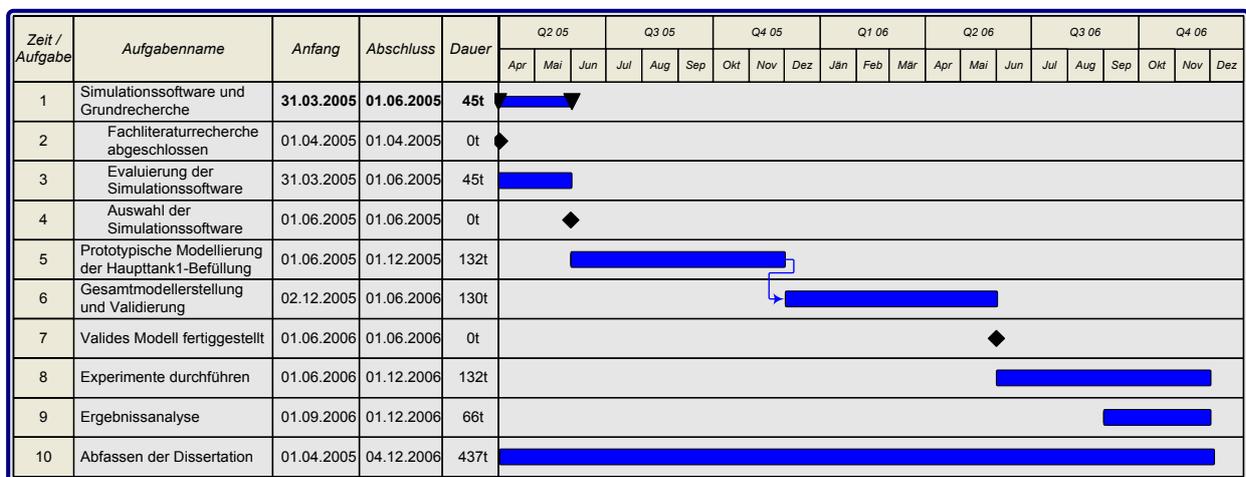


Abbildung 36: Zeitlicher Ablauf des Projektes als Balkendiagramm (Gantt)

Die schwarzen Karos stellen definierte Meilensteine dar, sogenannte Zwischenziele, die den Abschluß einer oder mehrerer wesentlicher Aufgaben kennzeichnen. Hier wurden der Abschluß der Fachliteraturrecherche, die Auswahl der Simulationssoftware und die Fertigstellung eines validen Modells als Meilensteine definiert.

3.1.4. Situationsanalyse

Im Folgenden wird das Ergebnis der Situationsanalyse anhand einer textuellen Beschreibung des grafischen Modells des Ablaufs der Paste II-Herstellung beschrieben.

Die Paste II selbst stellt ein ist ein Zwischenprodukt zur Herstellung von hochreinem,

virusinaktiviertem IgG²² aus menschlichem Blutplasma dar. Die Herstellung erfolgt nach dem Ethanolfraktionierungsverfahren von Cohn-Oncley. Bei diesem Verfahren werden Proteine entsprechend ihrer Löslichkeit gezielt ausgefällt und abgetrennt. Diese abgetrennten Proteinfractionen (z.B. Paste I+II+III und Paste II) stellen lagerfähige Zwischenprodukte dar und werden dann in nachfolgenden Herstellungsschritten weiter aufgereinigt und schließlich zum Endprodukt prozessiert. Der erste Teil zeigt den komplexen Prozess des Befüllens des Tanks 1 (T1), der zweite Teil behandelt das Filtrieren und der letzte Teil das Separieren der Lösung bis hin zum (Zwischen-)Produkt, der so genannten Fraktion II-Paste. Die Grundlage für das Erfassen des Prozesses stellt der ausführlich beschriebene Produktionsbericht mit seinen Formeln dar.

Befüllen

Der Prozessschritt „Befüllen“ behandelt die Herstellungsschritte vom Auflösen der Paste I+II+III bis zur Filtration zur Abtrennung der Fraktion I+III Paste, stets unter Rühren und bei genau definierten Temperaturen.

Im **ersten Schritt** wird anhand der Gesamtmenge der zu lösenden Fraktion I+II+III - Paste nach definierten Formeln des Produktionsberichts, die erforderliche Menge WFI errechnet. Das WFI (= water for injection) wird in einen 4000 Liter Tank mit etwa 2000 Liter pro Stunde vorgelegt und abgekühlt.

Das Dispergieren und Homogenisieren der Paste I+II+III erfolgt in zwei Teilen (**Prozessschritte Zwei und Drei**). Nach dem Zugeben der ersten Hälfte wird für 1,5 Stunden die Lösung durch Rühren homogenisiert, danach wird die zweite Hälfte hinzugefügt und wiederum für 1,5 Stunden durch Rühren homogenisiert. Die Menge der Paste kann je nach Charge bzw. Art des Plasmas variieren.

Im **vierten Prozessschritt** wird die zur Verdünnung benötigte Menge an WFI erneut berechnet und in einem zweiten Tank vorgekühlt. Danach wird die Lösung wiederum für drei Stunden homogenisiert.

²² IgG ist die gebräuchliche Abkürzung für Immunglobulin G und wird bei Octapharma unter dem Namen Octagam ® vermarktet.

Das Berechnen und Zugeben der Natriumacetatlösung wird im **fünften Schritt** durchgeführt. Die Zugabe erfolgt hierbei mit einer definierten, sehr langsamen Zugaberate.

Im **sechsten Prozessschritt** erfolgt die Zugabe einer saueren Pufferlösung und dient zur Senkung des pH Wertes, ebenfalls mit einer definierten Zugaberate. Nun wird die Gesamtlösung bei definierter Temperatur weitere 30 Minuten, und nach Temperaturwechsel weitere zwei Stunden gerührt. (**Prozessschritte 7 bis 9**)

Im nächsten **Schritt (10)** wird zur Verdünnung des Produkts die erforderliche Menge WFI berechnet und über eine definierte Zugaberate der Gesamtlösung hinzugefügt.

Befüllen										
Phasen:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Equipment				T2 (600l)	T2 (600l)	T3 (600l)			T4 (2500l)	Leitung
Temp	$x^{\circ}C+x^{\circ}$	$x^{\circ}C$					$x^{\circ}C+x^{\circ}$	$x^{\circ}C+x^{\circ}$	$x^{\circ}C+x^{\circ}$	
Resource	$x^{\circ}A = WFI$	Paste (I)+II+IIIw Teil 1	Paste (I)+II+IIIw Teil 2	$x^{\circ}A = WFI$	Natriumacetatslg	Spezialpuffer			WFI	EtOH
Aktion	Berechnen Zugeben	Rühren Zugeben	Zugeben	Berechnen Zugeben	Berechnen Rühren Zugeben	Berechnen Rühren Zugeben	Rühren	Rühren	Zugeben	Zugeben
Dauer	x min kühlen	x Stunden homogenisieren	x Stunden homogenisieren	x Stunden homogenisieren	x kg/h	x kg/h	x min	x h	$A^{\circ} = kg/h$	$A^{\circ} = kg/h$ x kg/h
Anmerkungen										

Abbildung 37: Der Ablaufprozess des Befüllens und Dispergierens

Die Ethanolzugabe des letzten **Prozessschrittes (11)** erfolgt aus einer fest installierten Leitung unter definierter Geschwindigkeit direkt in den Tank. Abschließend findet eine Kontrolle des pH-Werts statt. Während dieses Prozesses werden bereits die ersten Schritte des Filtrationsvorgangs vorbereitet.

Filtrieren

Der Prozessschritt „Filtrieren“ beschreibt die Abtrennung der Fraktion I+III Paste. Diese Paste enthält Begleitproteine (Verunreinigungen), die im weiteren Prozess unerwünscht sind. Das Produkt das sich im Tank T1 befindet wird über die Filterpresse in einen Gegentank T2 filtriert. In der Filterpresse verbleibt die Paste I+III, welche im Anschluss an die Filtration entsorgt wird. Der im Gegentank T2 befindliche Filtrationsüberstand (SN I+III) wird im Folgeschritt weiterverarbeitet.

Vor Beginn des Teilprozesses „Filtrieren“ werden die nötigen Filterrahmen, Platten und Filterschichten an der Filterpresse montiert. Deren Anzahl und Art wird nach definierten Formeln berechnet. Die Vorwasch-Nachwasch-Lösung, kurz VoWa-NaWa, wird bereits im Vorhinein durch die Zugabe von WFI, Ethanol (EtOH) und eines Salzes im Tank 5 aufbereitet, gerührt, gekühlt und eine Probe auf ihre Konsistenz gezogen.

Danach erfolgt das Vorwaschen der Filterpresse mit der VoWa-NaWa-Lösung und das anschließende Entleeren des vorgewaschenen Filters. Diese Prozedur dauert etwa zwei Stunden, danach sind die Filterschichten ausreichend vorgewaschen. Die dabei verwendete VoWa-NaWa-Lösung wird zur Redestillation des Ethanols gesammelt.



Abbildung 38: Filterpresse

Nach dem Vorwaschen der Filterpresse erfolgt die eigentliche Produktfiltration bei definierter Temperatur und definierten Filtrationsdrücken.

Das Filtrat (die nun abgetrennte SN I+III Lösung) ist die für den nächsten Schritt benötigte Ausgangsbasis.

Um möglichst verlustfrei zu arbeiten, werden Produktreste, die sich noch im Filterkuchen (Paste I+III) befinden mit der NaWa-Lösung in den Filtrationsüberstand (SN I+III) gewaschen.

Separieren

Der dritte und letzte Teilschritt behandelt die Ausfällung sämtlicher Proteine, die sich im Filtrat SN I+III befinden und deren Abtrennung durch Zentrifugation.

Der Teilschritt beginnt mit dem Messen des pH-Wertes der Produkt Lösung. Darauf basierend wird die Menge an Pufferlösung für die folgende Zugabe zur pH Stellung der Lösung berechnet und mit definierter Zugaberate dem Tank 6 zugeführt.

Nun wird die Lösung 2 Stunden gerührt und weiter abgekühlt. Danach wird erneut der pH-Wert kontrolliert und gegebenenfalls nachjustiert.

Als nächster Schritt wird die benötigte Menge eines Salzes berechnet und in kristalliner Form beigemengt. Zuletzt wird der Produktlösung Ethanol hinzugefügt.

Die zur Abtrennung der mittlerweile gefällten Proteine benötigte Zentrifuge wird rechtzeitig vorgekühlt. Bei der Zentrifugation wird der Zieloutput (Paste II) in der Zentrifugentrommel gesammelt und so von der zentrifugierten Lösung abgetrennt.

Nach der Zentrifugation wird die Fraktion II Paste aus der Zentrifuge ausgebracht und bei tiefer Temperatur bis zur weiteren Aufreinigung zwischengelagert.



Abbildung 39: Zentrifuge (Separator)

Der betrachtete Produktionsprozess entspricht der Verarbeitung einer Charge und dauert durchschnittlich zwischen 60 und 70 Stunden.

Sämtliches Produktionsequipment muss unmittelbar nach Verwendung nach validierten Verfahren gereinigt werden. Diese Reinigungsschritte sind zeitaufwendig und müssen bei der weiteren Equipmentbelegung berücksichtigt werden.

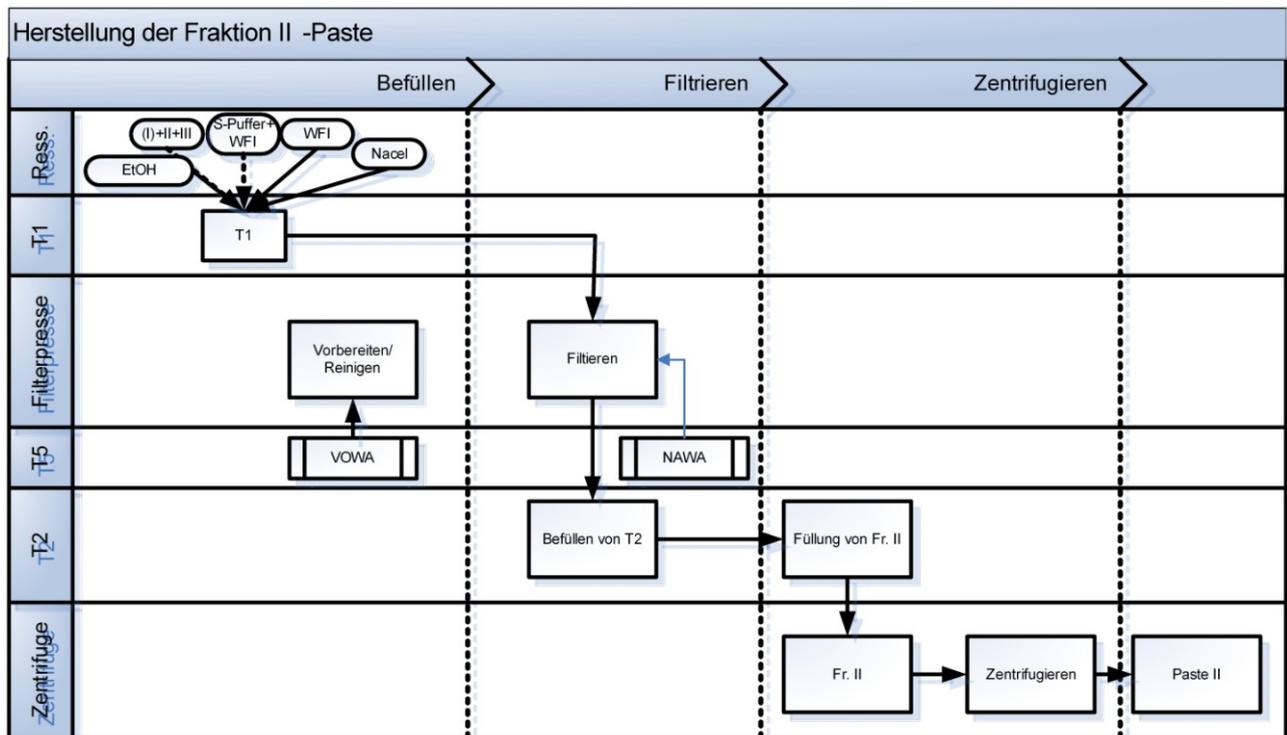


Abbildung 40: Gesamtüberblick Ablaufprozess der Paste II-Herstellung

3.1.5. Softwareauswahl

Als Simulationssoftware wurde das Programm AnyLogic (Version 5) von XJ-Technologies (www.cjtek.com) gewählt.

Einer der wesentlichen Entscheidungsfaktoren für die Wahl von AnyLogic liegt neben den projektspezifischen Anforderungen vor allem in der Möglichkeit, eine proprietäre „state of the art“ Software über die Technische Universität im Rahmen der Forschung (Fakultätslizenz) kostenlos zu verwenden.

AnyLogic zeichnet sich als Lösung durch seinen modularen Aufbau aus, der auch den Aufbau weiterer Module innerhalb einer Lösung zulässt. Das erstellte Modell lässt sich problemlos in eine portable Stand-Alone Lösung konvertieren. Die Einsatzbereiche sind sehr breit angesiedelt und erstrecken sich vom Bereich der

Logistik, der Distribution, der diskreten Fertigung und der allgemeinen Prozessfertigung, über die Infrastrukturmodellierung, die Verkehrssimulation, Personenflussmodellierung, sowie den Schienenverkehr, Agentenbasierte Modellierung, kontinuierliche Simulation, Hybride Simulation (Ereignis-diskret und kontinuierlich) und zuletzt der Netzwerksimulation.

In der nachfolgenden Tabelle werden die wesentlichsten Merkmale und Informationen über das System AnyLogic 6 (XJ Technologies) gelistet:

Einsatzszenarien	Fabrik-/Layoutplanung	X
	Anlagenplanung	X
	Kapazitätsdimensionierung	X
	Planung von Materialfluss- und Bearbeitungsprozessen	X
	Planung von Logistiknetzen	X
	Prozess- und Struktur-Analyse	X
	Simulation von Produktionsprozessen	X
	Engpassvermeidung	X
Features	Virtuelle Testumgebung	X
	Animation	X
	2D-Visualisierung	X
	3D-Visualisierung	-
	Export simulierter Szenarien	X
Schnittstellen und Integration	Datenbanken	alle relationalen Datenbanken (Oracle, MSSQL, MySQL, etc.)
	ERP-Systeme	k.A.
	PLM-Systeme	k.A.
	MES-Systeme	InFrame Syn@pse (acp-IT)
	MS-Office-Produkte	Excel, Access, Visio,...
	ActiveX	-
	XML	X
	Proprietäre Datenformate	k.A.
	Sonstige Datenformate	k.A.
Systemanforderungen	Hardware	installation requires 250MB of free disk space; 1GB of memory and modern processor for optimal performance;
	Software	Java Runtime Environment ab 1.5.0; Platforms: Microsoft Windows Vista, x86-32; Microsoft Windows XP, x86-32; Apple Mac OS X 10.4.1 or later, Universal; SuSE Open Linux 10.2 or later
Kosten und Lizenzmodelle	Einzelplatzlizenz	4800
	Mietmodell	-

	sonstige Lizenzmodelle	Fakultätslizenz, Runtime Lizenz, Studentenlizenz
Branchenschwerpunkte	Maschinen- und Anlagenbau	X
	Automotive	X
	Chemie & Pharma	X
	Luftfahrt	X
	Logistik	X
	Nahrungsmittel	X
	Konsumgüter	X
	Sonstige Branchenschwerpunkte	X

Abbildung 41: Simulationswerkzeug: AnyLogic [Quelle: <http://www.it-production.com> besucht am 20.3.2009]

3.2 Modellentwicklung

Wenn die Zielsuche und Systemdefinition abgeschlossen sind, wird im Rahmen der Modellentwicklung ein Modell des Produktionsprozesses erstellt. Begonnen wird mit einer Erhebung der Daten, die im nächsten Schritt analysiert werden.

Anhand des erworbenen Systemwissens kann nun mit der Konstruktion des Simulationsmodells begonnen werden. Für die jeweiligen Modellierungsschritte werden abwechselnd die Schritte der Verifizierung und Validierung zur Überprüfung und zur Fehlerbehebung verwendet. Dies wird iterativ durchgeführt, bis ein ausreichend gutes Modell des Produktionsprozesses entstanden ist.

Abschließend wird die Richtigkeit und Gültigkeit des erarbeiteten Modells durch die Verifizierung und Validierung gesamthaft überprüft.

3.2.1 Datenerhebung

Die Sammlung der Produktionsdaten stellt die Grundlage für den ersten formellen und konzeptionellen Entwurf dar. Zuerst wird anhand eines leeren **Produktionsberichts** die grundlegende Struktur des Modells in die drei Phasen „Dispergieren“, „Filtrieren“ und „Separieren“ vorgenommen. Danach werden mit Hilfe eines ausgefüllten Produktionsberichts erstmals Echt Daten zum zeitlichen Ablauf jedes Produktionsschrittes gesammelt.

Im darauffolgenden Schritt wird die Produktionsanlage bei Octapharma Vorort besichtigt, um das Systemverständnis zu vertiefen.



Abbildung 42: Tankbehälter bei Octapharma Wien

Die Datensammlung wird im letzten Schritt durch ein Excelfile²³ mit Aufzeichnungen von über 1500 Produktionschargen komplettiert. Darin enthalten sind sämtliche relevante Kennzahlen, die in weiterer Folge die Basis für die Datenanalyse und spätere Validierung darstellen.

3.2.2 Datenanalyse

Alle Daten, die für das Simulationsprojekt notwendig und relevant erscheinen, werden in diesem Kapitel analysiert. Die Grundlage für die Datenanalyse stellen die im Kapitel Datenerhebung beschriebenen Informationsquellen²⁴ dar, insbesondere die Excelmappe aus der Betriebsdatenerfassung mit Daten aus 1170 Produktionschargen. Durch Gespräche mit der Produktionsleitung und aus den Produktionsunterlagen wird im Vorhinein eine extreme Schwankungsbreite der identifizierten Schlüsselindikatoren, wie Input- und Outputressourcen, angenommen. Diese Schwankungsbreiten innerhalb der einzelnen Prozesse (z.B. Filtrationszeiten, Pastenausbeuten usw.) sind nahezu ausschließlich durch das variable Ausgangsmaterial (humanes Blutplasma) bedingt. Kleinere Indikatoren, die durch die große Menge an Flüssigkeit und durch die besagte Streuung nicht relevant erscheinen, werden, um die Komplexität handhabbar zu halten, später durch ihren Mittelwert als feste Zahlen im Modell integriert. Diese Parameter wären nur dann interessant, wenn der physikalische Effekt selbst untersucht werden würde.

²³ Das Excelfile bzw. die darin enthaltenen Daten unterliegen dem Secrecy Agreement zwischen der Octapharma und Mag. Christian Piffer.

²⁴ Wie bei allen Datensammlungen können auch hier Datenqualitätseinschränkungen vorliegen, die eventuell zu einer Ungenauigkeit des Modells oder seiner Vorhersagekraft führen können.

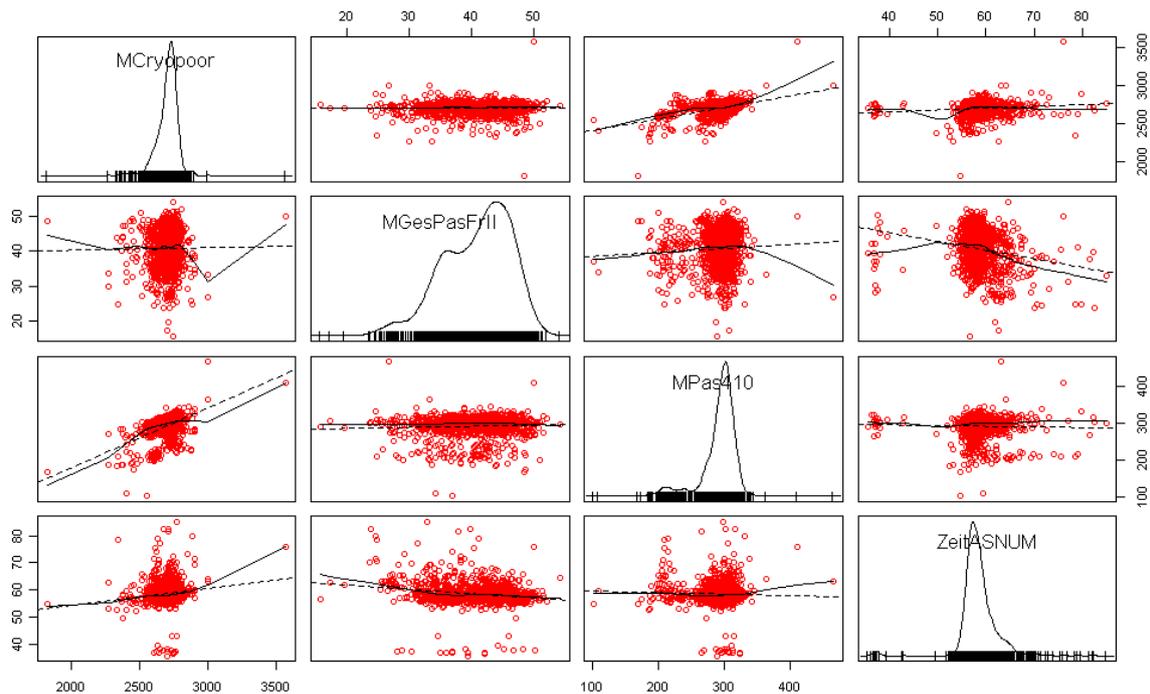


Abbildung 43: Scatterplot-Matrix der Produktionsdauer, Menge an II-Paste, Plasma und Cryopoor

Zur groben Untersuchung der funktionalen Form möglicher Zusammenhänge werden nichtparametrische Analyseverfahren verwendet. In der Scatterplot-Matrix werden zweidimensionale Scatterplots zwischen allen identifizierten Schlüsselvariablen der Produktion gezeichnet (Abbildung 43). Der Scatterplot-Matrix liegen lediglich einige allgemeine wahrnehmungstheoretische Annahmen zugrunde, die aber trotzdem einen aufschlußreichen ersten Blick auf die Beziehungen zwischen allen beteiligten Parametern erlaubt.

In der Diagonale werden die Dichten der jeweiligen Ressource beschrieben, während in den restlichen Grafiken Streudiagramme mit Glättungskurven (ohne Strichlierung) und Kleinst-Quadrat-Linie (mit Strichlierung) dargestellt werden

Zur Tiefe der hier im Einzelnen durchgeführten Datenanalyse sei hier angemerkt, dass der Schwerpunkt der Arbeit auf die Modellbildung und Simulation gesetzt wird. Daher wird die Fülle an statistischen Möglichkeiten nicht vollständig ausgereizt. Dieser Fakt stellt jedoch keine Einschränkung des Modells oder seiner Gültigkeit dar, da dies im ausreichenden Maße, also dem Zweck entsprechend, im Verifizierungs- und Validierungsprozess sichergestellt wird.

3.2.2.1 Produktionsdauer

An Hand der Produktionsdauer der einzelnen Produktionschargen kann für das Simulationsmodell ein zeitlicher Rahmen festgelegt werden.

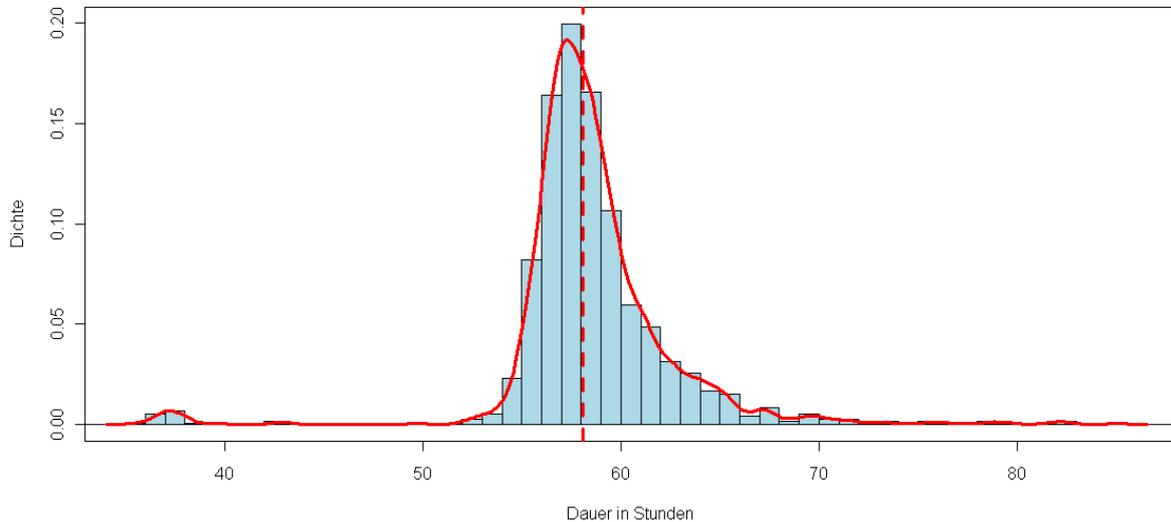


Abbildung 44: Histogramm der Produktionsdauer mit Median

Die Produktionsdauer erstreckt sich von 36 bis 86 Stunden, wobei der Herstellungsleiter den Bereich zwischen 60 und 70 als produktionstypisch beschreibt. Die Abbildung 45 zeigt, dass für die erfaßten Daten das Hauptintervall (oberes und unteres Quartil) zwischen 55 und 65 Stunden liegt.

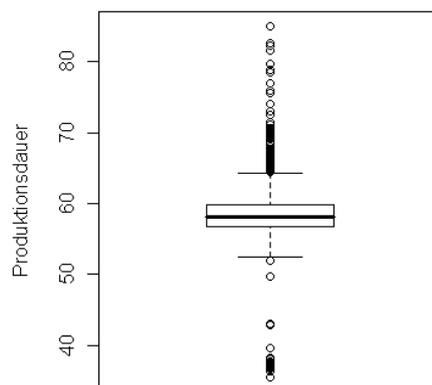


Abbildung 45: Boxplot der Produktionsdauer

Die extreme Spanne der Dauer, bis zu 50 Stunden Unterschied, ergibt sich aus diversen Testläufen, die nicht in die Modellierung des normalen Produktionsprozesses einfließen.

3.2.2.2 Tanks

Sowohl die Tankvolumina, als auch deren spezielle Ausstattung (z.B.: heizbar, kühlbar, mit Waage, etc.) wurden während einer Betriebsbegehung in der unter Abbildung 46 dargestellten Exceltabelle erfasst.

Anhand der Aufgabenstellung lassen sich für das Simulationsmodell, bis auf die Tankgröße (Volumen in Liter) und die Ausgabegeschwindigkeit des Tanksinhalts (Liter pro Minute), keine weiteren Eigenschaften als modellrelevant definieren.

Tankequipment		Wien																										
Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
Bezeichnung																												
Volumen																												
Kühlbar																												
Heizbar																												
EtOH-Zugabe																												
WFI-Zugabe																												
Rührwerk																												
CIP																												
SIP																												
Mobil																												
Wiegezellen																												
Temp. Von °C																												
Temp. Bis °C																												

Abbildung 46: Erhebungstabelle Tankequipment

3.2.2.3 Filterpresse

Als zeitkritischer Wert wird der Durchsatz der Filterpresse angenommen. Dieser richtet sich nach verschiedenen Kriterien, wie zum Beispiel der Filterfläche oder der Konsistenz des Proteinniederschlags. Weiters wird dieser Wert aber auch dadurch beeinflusst, ob ein manueller Filterwechsel durchgeführt werden muss oder nicht.

Aus der Analyse des Produktionsdaten ergibt sich folgende Merkmalsübersicht in Kilogramm pro Stunde pro normierter Filterfläche:

Mittelwert	38,33
Standardabweichung	13,55
Minimum	11,30
Maximum	100,21

Abbildung 47: Merkmale Filterpressendurchsatz in KG

Die graphische Darstellung in Abbildung 48 zeigt die Meßwerte als Häufigkeitsverteilung mit einer polynomischen Trendlinie.

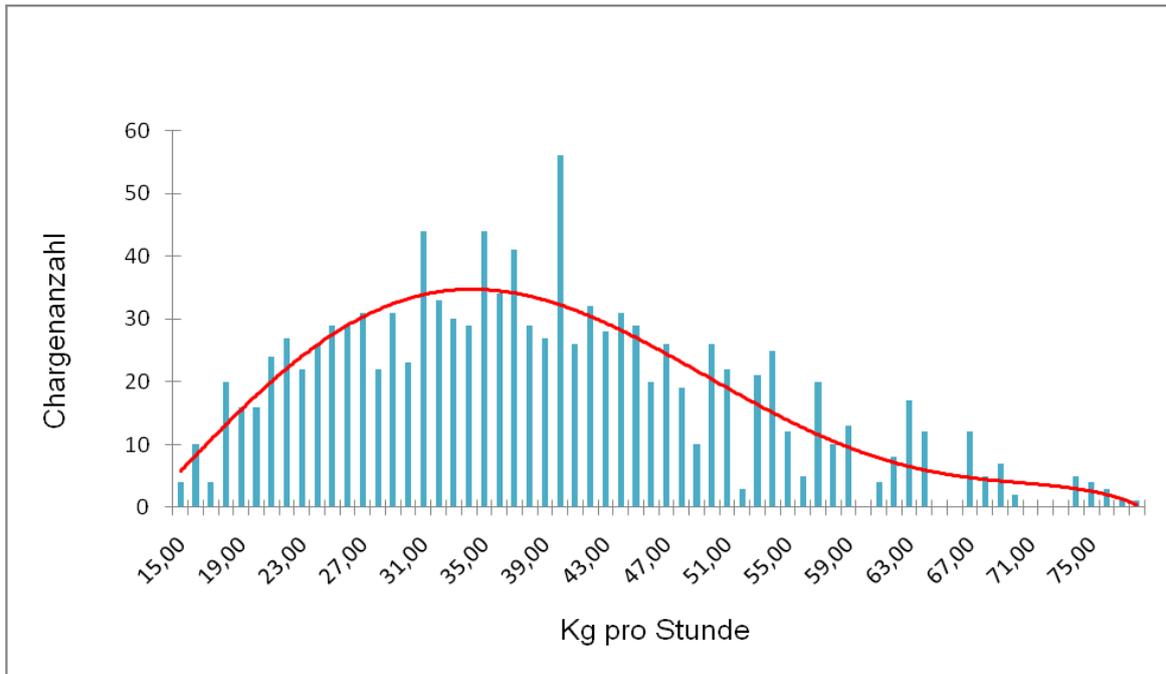


Abbildung 48: Histogramm des Filterpressendurchsatz pro Rahmen

3.2.2.4 Cryopoor Plasma

Das Cryopoor Plasma (im Weiteren nur Cryopoor genannt) wird in einem vorgelagerten Produktionsschritt erstellt. Die Ausgangsmenge des verarbeiteten Cryopoors beeinflusst den gesamten Produktionsprozess maßgeblich, da es die Ausgangsbasis für etliche Formeln zur Berechnung unterschiedlicher weiterzuverarbeitenden Ressourcenmengen im Produktionsbericht darstellt.

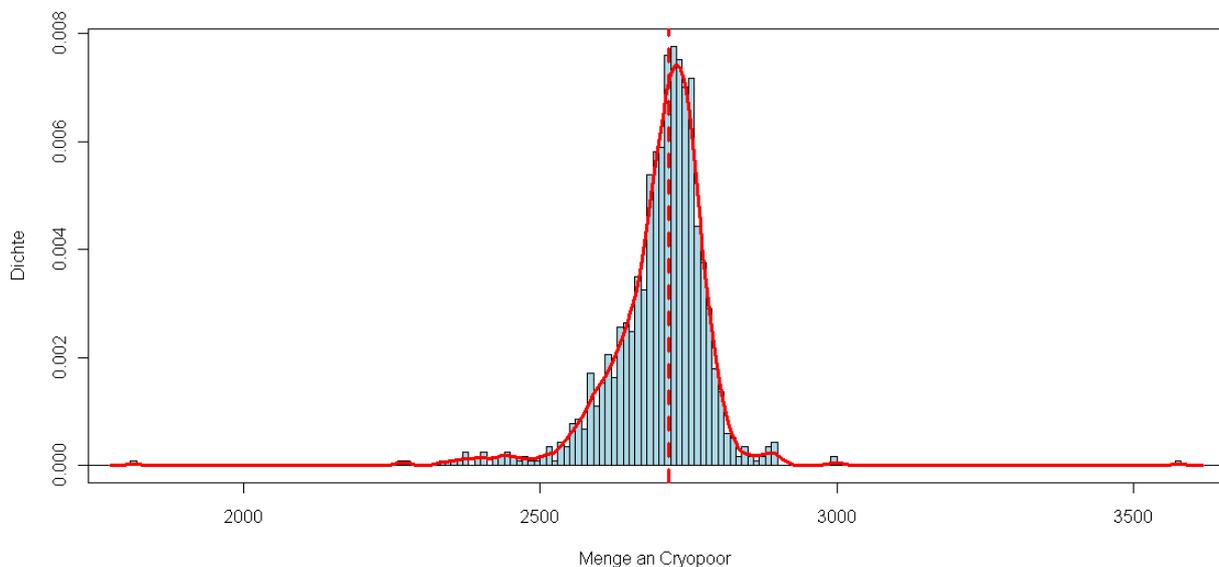


Abbildung 49: Histogramm der verwendeten Crypoormengen mit Median

Der Wertebereich der Cryopormengen läßt sich in einem Histogramm gut darstellen und analysieren. Die Richtzahl des Herstellungsleiters ist 2700 Liter pro Charge und als strichlierte Linie in Abbildung 49 dargestellt.

Im Boxplot sieht man die Wertespanne von 1800 bis 3000 Liter Cryopoor für den Herstellungsprozess.

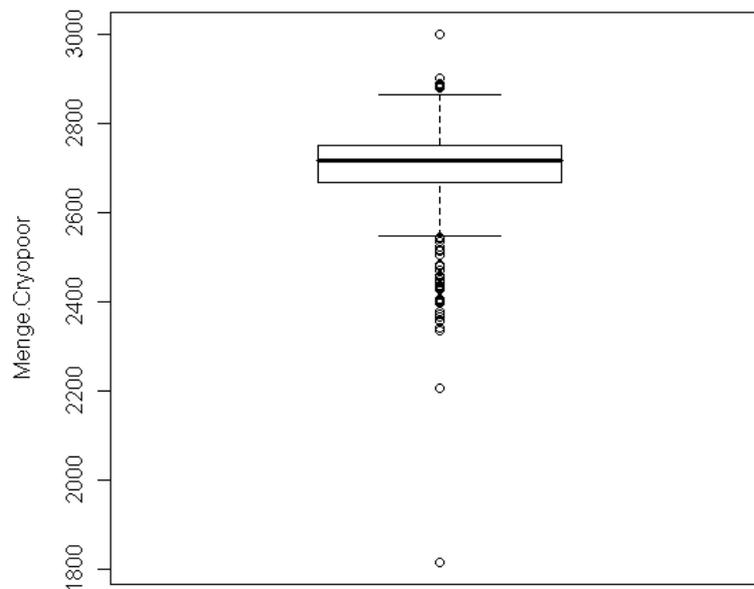


Abbildung 50: Boxplot Ausgangsmenge Cryopoor

Aus der Analyse der Meßwerte der Betriebsdatenerfassung ergeben sich weiters folgende Kennzahlen (ein extremer Ausreißer mit 1800 Liter wird entfernt, da dieser explizit als Sondercharge definiert ist):

Anzahl Chargen	1162
Mittelwert	2706,65
Standardabweichung	122,34
Minimum	2290,00
Maximum	3056,00

Abbildung 51: Merkmalsübersicht Cryopoor

Als modellrelevantes Intervall für eine Produktionscharge wird die Spanne von 2200 bis 3000 Liter angenommen.

Der Quantil-Vergleichsplot zum Testen der Normalverteilungen zeigt, dass die Cryopoorwerte nicht einer Normalverteilung entsprechen. Andererseits müssten alle Punkte innerhalb der strichlierten Linien liegen (Abbildung 52).

Zur Untermauerung der Quantilprüfung wird hier noch der Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung durchgeführt.

Wenn der p-Wert des Tests größer als 5% ist, dann kann die Annahme der Normalverteilung nicht verworfen werden. In diesem Fall beträgt der p-Wert 0,0000000001197, was signifikant kleiner als 0,05 ist. Daher wird die Annahme der Normalverteilung verworfen. (Es wird eine 5% Signifikanz als akzeptabel angenommen. $W = 0,9676$)

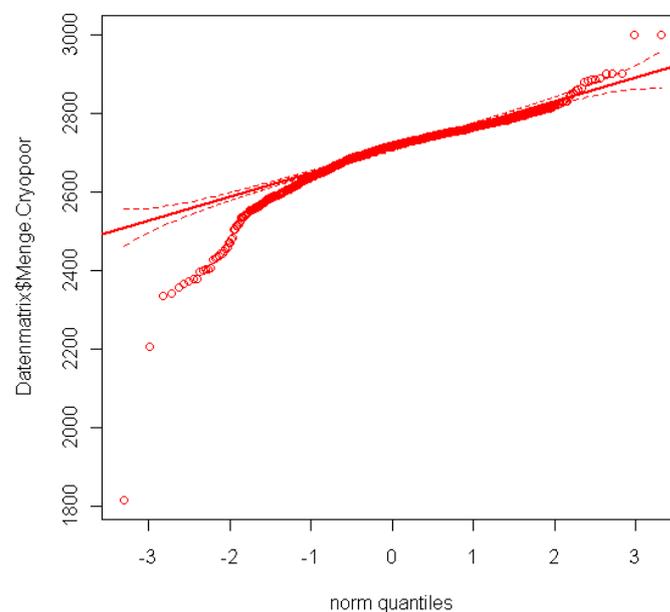


Abbildung 52: Quantil-Vergleichsplot Cryopoor

Im Folgenden wird eine Korrelations- und Regressionsanalyse durchgeführt. Diese dienen dazu, die Abhängigkeiten zwischen den Variablen zu diskutieren. Die Korrelationsanalyse prüft, ob ein statistischer Zusammenhang existiert und wie stark dieser ist (Signifikanztest). Als Maß für den Zusammenhang dient der Korrelationskoeffizient ρ , der durch r geschätzt wird.

Werte des Korrelationskoeffizienten r	Interpretation
$0,0 < r < 0,2$	sehr geringe Korrelation
$0,2 < r < 0,5$	geringe Korrelation
$0,5 < r < 0,7$	mittlere Korrelation
$0,7 < r < 0,9$	hohe Korrelation
$0,9 < r < 1,0$	sehr hohe Korrelation

Abbildung 53: Wertebereiche der Korrelationskoeffizienten und verbale Interpretation, [Bühl, A. und Zöfel, B., 2002, S. 243]

Anhand der Regressionsanalyse wird weiters versucht, die Zusammenhänge zwischen der Ausgangsmenge an Cryopoor und der sich daraus ergebenden Menge an Paste I+II+III als Funktion zu beschreiben.

```

Call:
lm(formula = MPas410 ~ MCryopoor, data = Datenmatrix)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-165.815  -6.997   5.624  14.632  126.288

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.434e+02  2.238e+01  -6.407 2.15e-10 ***
MCryopoor    1.611e-01  8.277e-03  19.461 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 24.6 on 1170 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2445, Adjusted R-squared:  0.2439

```

Abbildung 54: Regressions-Statistik Paste I+II+III zu Cryopoor

Die geschätzte Regressionsgerade ist durch $y = -143,4 + 0,1611 \cdot x$ darstellbar. Die geschätzte Standardabweichung der Residuen ist $\sigma = 24,6$. Abbildung 55 zeigt die lineare Trendlinie in Schwarz, sowie eine Schätzlinie in Rot für eine Eingabemenge von 301 kg Paste I+II+III.

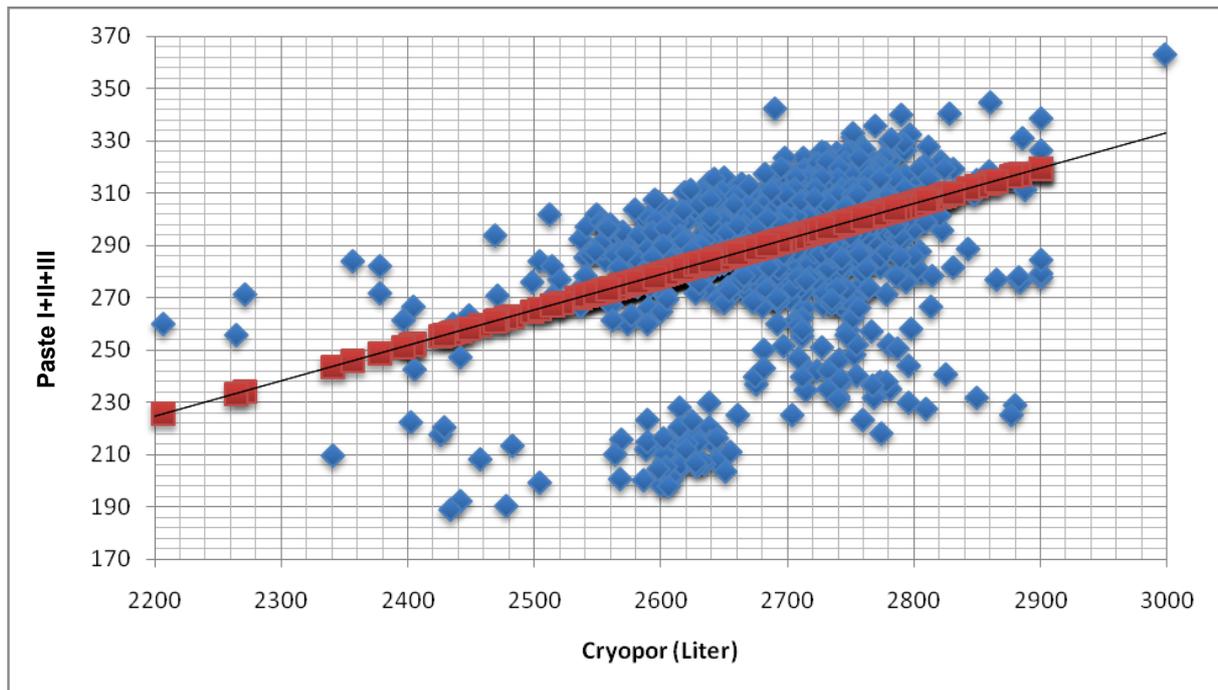


Abbildung 55: Regressionsanalyse Paste I+II+III zur Menge an Cryopor

Folgende Übersicht zeigt die Ergebniswerte, die mit dem Softwarepaket R berechnet wurden.²⁵ Der Test auf Signifikanz der Korrelation, zweiseitig nach Pearsons Produkt-Moment, ergibt:

```

Pearson's product-moment correlation

data: Datenmatrix$MCryopor and Datenmatrix$MPas410
t = 19.4611, df = 1170, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.4499946 0.5365816
sample estimates:
      cor
0.494514

```

Aus den Daten läßt sich der Korrelationskoeffizient von $r = 0,4945$ ablesen, die Korrelation kann daher als gering ($0,2 < r \leq 0,5$) bezeichnet werden. Die Zugabe Ressourcen werden in einem definierten Verhältnis zugefügt, aber nicht proportional, da die Regressionsgerade sonst durch den Ursprung gehen müßte.

²⁵ R ist eine freie Software-Umgebung für statistische Berechnungen und Grafiken. <http://www.r-project.org/>

Der Wert des Bestimmtheitsmaßes (multiple R-squared) liegt nahe bei null, deswegen ist die Vorhersagegenauigkeit der Funktion

$$y = -143,4 + 0,1611 \cdot x$$

eher als schlecht zu bezeichnen. Nur ein Viertel der Gesamtvarianz der abhängigen Variablen werden durch die Gleichung erklärt

$$R^2 = 0,2445$$

Die letzte Spalte der Abbildung 54 enthält p -Werte für t -Tests, die prüfen, ob der entsprechende Koeffizient signifikant von Null verschieden ist. Da für beide Variablen hohe Signifikanz gegeben ist (Signifikanzniveau 0,1%), muss die Nullhypothese, dass kein linearer Zusammenhang besteht, verworfen werden.

Die Paste I+II+III wird aus Cryopoor Plasma hergestellt. Der Ausgangspunkt mit -143,4 KG Paste I+II+III bei 0 Liter Cryopoor beschreibt den produktionsbedingten Verlust der von den Chargengrößen unabhängig ist. Beispiele sind Rückstände in Produktionsanlagen oder in Verbindungsschläuchen.

Es liegt ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Cryopoor und Paste I+II+III vor, der sich aus zwei unterschiedlichen Populationen des humanen Plasmas ergibt. Informationen darüber sind im Datenbestand leider nicht verfügbar.

3.2.2.5 Fraktion I+II+III-Paste

Die chemische Grundlage für den gesamten Produktionsschritt stellt die zu fraktionierende Paste 410 – die tiefgekühlte Paste I+II+III – dar. Diese wird in allen weiteren Schritten verarbeitet. Anhand der Häufigkeiten der Zugabemengen zeigt sich im Histogramm, dass sich die Hauptgruppen zwischen 260 kg und 340 kg bewegen.

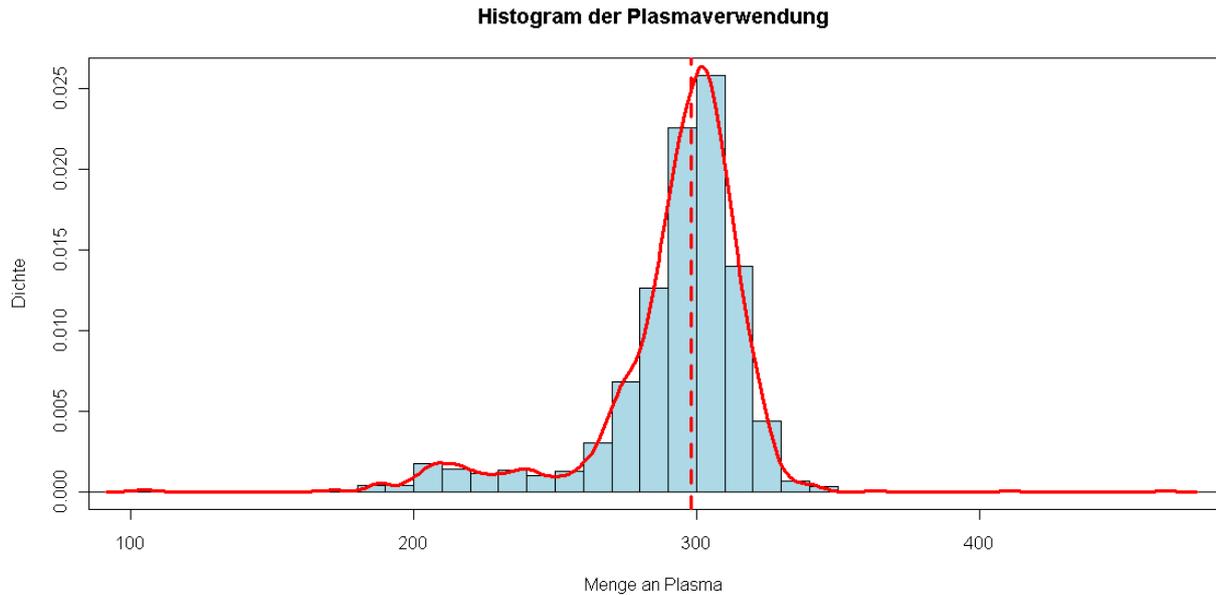


Abbildung 56: Histogramm der Paste 410-Verwendung mit Median

Anhand des Boxplot sieht man, dass die Streuung der Daten in der Box im Kern eher gering ist (entspricht den mittleren 50 % der Daten), aber vor allem nach unten einige Ausreißer vorhanden sind.

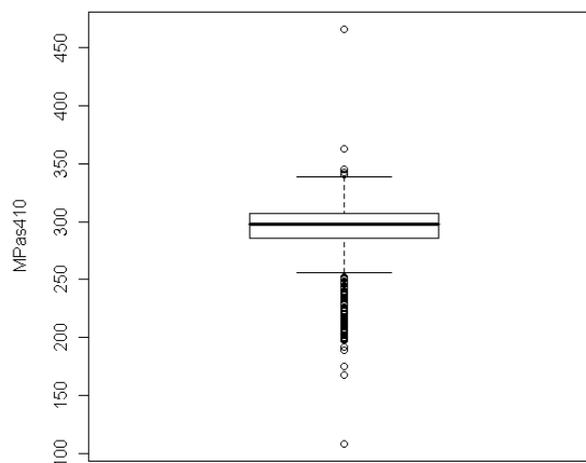


Abbildung 57: Boxplot der (I+II+III+W)-Paste

Die Daten aus Abbildung 58 beschreiben die Funktion der geschätzten Regressionsgerade als $y = 37,376 + 0,012 \cdot x$. Die geschätzte Standardabweichung ist $\sigma = 5,556$.

```

Call:
lm(formula = MGePasFrII ~ MPas410, data = Datenmatrix)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-24.965  -4.011   1.011   4.258  13.341

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 37.375830   1.683260  22.204  <2e-16 ***
MPas410      0.011607   0.005739   2.023  0.0434 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.556 on 1170 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.003484, Adjusted R-squared:  0.002632
F-statistic: 4.091 on 1 and 1170 DF,  p-value: 0.04335

```

Abbildung 58: Regressionswerte zw. Paste I+II+III und Paste II-Fraktion

Aus der Regressionsanalyse geht hervor, dass hier ein signifikanter Zusammenhang (5% Signifikanzniveau) zwischen der Paste I+II+III und der Menge des Ergebnisses, der so genannten Paste II-Fraktion, besteht. Da der p-Wert $< 0,05$ ist, wird H_0 verworfen, das heißt r weicht signifikant von null ab.

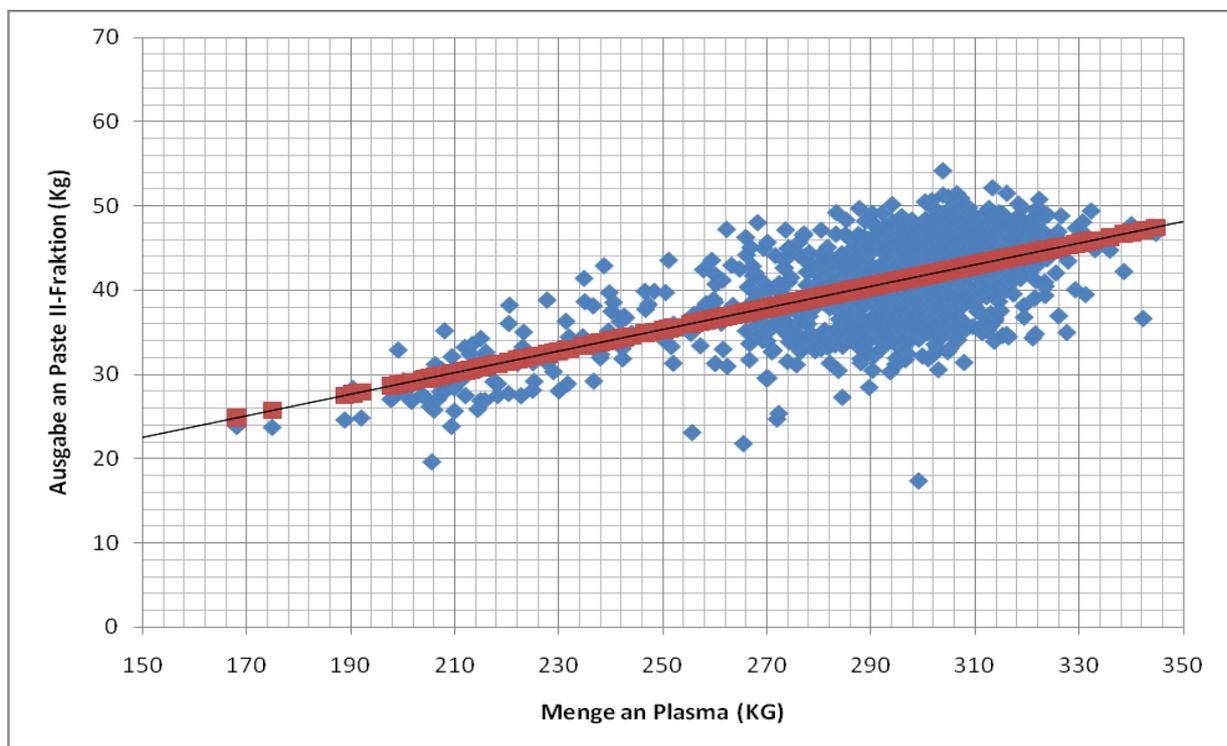


Abbildung 59: Regressionsanalyse Paste I+II+III und Paste II-Fraktion

Die Höhe der Korrelation weist auf einen sehr geringen Zusammenhang zwischen Paste I+II+III und Paste II-Fraktion hin.

$$r = 0,059$$

Das Bestimmtheitsmaß R^2 hat den Wert 0,003484 und liegt nahe null, die Vorhersagequalität der Funktion $y = 37,376 + 0,012 \cdot x$ ist daher schlecht.

Der Test der Signifikanz der Korrelation (zweiseitig nach Pearsons Produkt-Moment) ergibt folgende Übersicht:

```
Pearson's product-moment correlation

data:  Datenmatrix$MGesPasFrII and Datenmatrix$MPas410
t = 2.0225, df = 1170, p-value = 0.04335
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.001769576 0.115895608
sample estimates:
      cor
0.05902546
```

Aus der Regressionsgleichung lässt sich auf einem 5%igen Signifikanzniveau ableiten, dass eine Erhöhung der Menge von Paste I+II+III um eine Einheit mit einer vermehrten Ausbeute von 0,011607 Einheiten an Fraktion II Paste einhergeht.

Der Zusammenhang kann Zufall sein oder durch nur dem Unternehmen bekannte Erklärungsfaktoren beschrieben werden.

3.2.2.6 Paste-II-Fraktion

Der Median im Histogramm über die Produktionschargen zur Veranschaulichung der Mengenverteilung liegt bei knapp 42 kg.

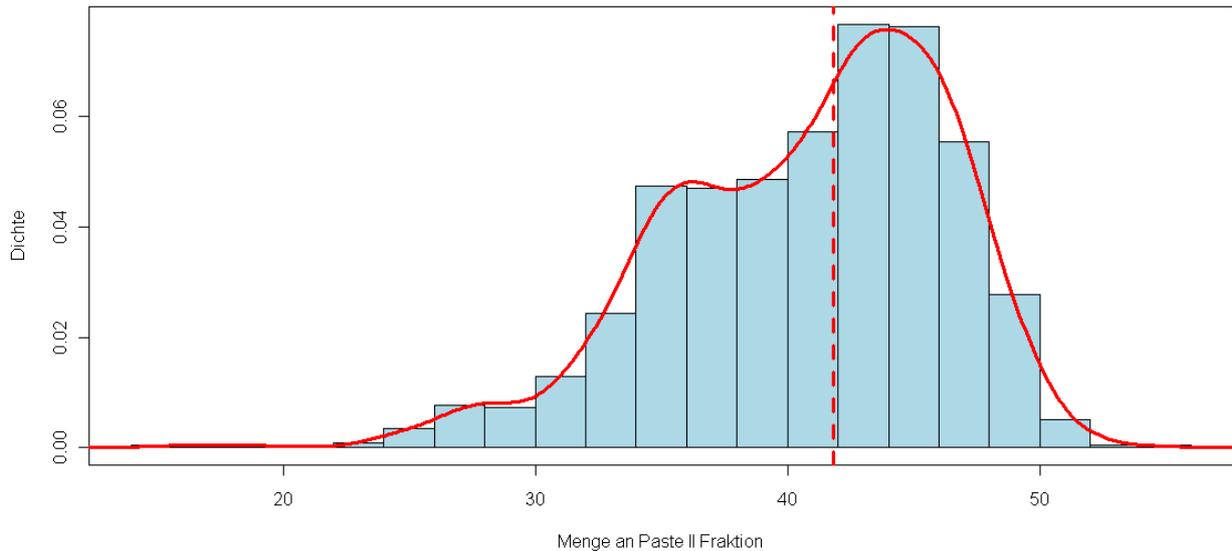


Abbildung 60: Histogramm der Paste II-Fraktion mit Median

Anhand der Boxplot-Abbildung lassen sich die relevanten Ausgabemengen im Intervall von 26 bis 53 kg eingrenzen.

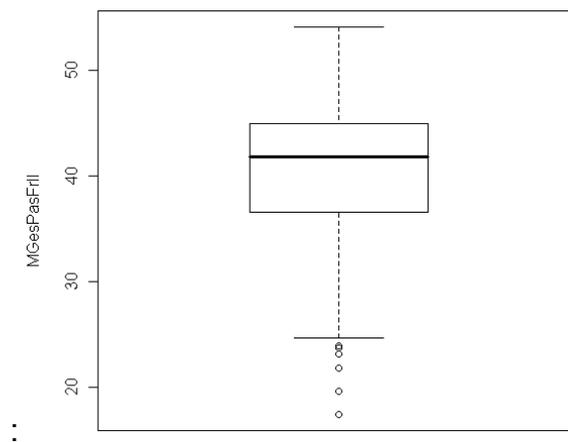


Abbildung 61: Boxplot der Paste II-Fraktion

Die geschätzte Regressionsgerade kann für Cryopoor zu Paste II-Fraktion mit der Funktion $y = 38,56 + 0,0008156 \cdot x$ dargestellt werden, wobei der Parameter a hochsignifikant von Null verschieden ist.

Die geschätzte Standardabweichung ist $\sigma = 5,565$.

Bestimmtheitsmaß R^2 hat den Wert $0,0001621$, was nahe null liegt, die Prognosefähigkeit der Funktion ist daher sehr schlecht.

```

Call:
lm(formula = MGesPasFrII ~ MCryopoor, data = Datenmatrix)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-25.039  -4.003   1.046   4.247  13.373

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 3.856e+01  5.063e+00   7.616 5.37e-14 ***
MCryopoor   8.156e-04  1.873e-03   0.436  0.663
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.565 on 1170 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.0001621, Adjusted R-squared: -0.0006925
F-statistic: 0.1897 on 1 and 1170 DF,  p-value: 0.6633

```

Abbildung 62: Regressionswerte zw. Cryopoor und Paste II-Fraktion

Die Korrelation zwischen der Ausgabemenge Paste II-Fraktion und dem Cryopoor ist zwar vorhanden, aber sehr gering ($0,0 < |r| < 0,2$).

$$r = 0,01273$$

Ergebnis des Tests der Signifikanz der Korrelation (zweiseitig nach Pearsons Produkt-Moment):

```

Pearson's product-moment correlation

data:  Datenmatrix$MCryopoor and Datenmatrix$MGesPasFrII
t = 0.4355, df = 1170, p-value = 0.6633
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.04456264  0.06994259
sample estimates:
      cor
0.01273171

```

Die Korrelations- und Regressionsanalyse ergibt keine essentiellen Resultate. Die Steigung der geschätzten Regressionsgeraden ist sehr gering. Dass für mehr Ergebnis tendenziell mehr Cryopoor verwendet werden muss ist unspektakulär.

3.2.2.7 pH-Wert

In der Produktionskette werden pH-Wertproben aus den Tanks gezogen und danach in den Produktionsbericht eingetragen. Dieser Vorgang, der auch unter „pH-Wert stellen“ bekannt ist, dauert in etwa 7 Minuten für die diversen Tanks.

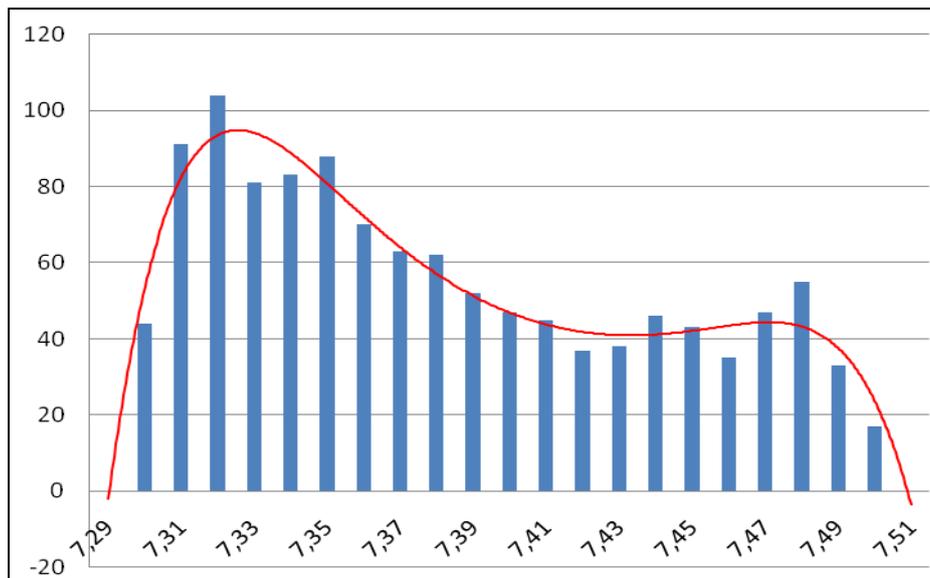


Abbildung 63: Histogramm der pH-Werteinstellungsdauer in Minuten

3.2.2.8 Ethanol, Natrium, WFI, und andere

Die übrigen Ressourcen, wie zum Beispiel Ethanol, Natrium, „Water for Injection“ (WFI), werden immer nach den im Produktionsbericht definierten Formeln berechnet und zugegeben, daher ist keine statistische Analyse notwendig.

3.2.3 Modellentwicklung

Für die Modellentwicklung werden einerseits das konzeptionelle Modell und die in der Datenerhebung festgeschriebenen Abläufe benötigt, andererseits müssen diverse nicht kalkulierbare Parameter aus der Datenanalyse übernommen werden. Diese Übernahme der Parameter wird im Folgenden als Operationalisierung bezeichnet.

3.2.3.1 Operationalisierung der Daten und Abläufe

Durch die Operationalisierung werden die in der Analyse untersuchten Daten in einen skalierbaren Bereich oder in eindeutige Kennzahlen überführt. Dadurch werden dem bis dato theoretischen Konstrukt empirische Werte und Wertebereiche zugeordnet, die im Modell als Indikatoren für die Wirklichkeit stehen. Weiters wird für die Simulationsläufe und für die Experimente sichergestellt, dass Sie unter denselben Voraussetzungen wiederholt werden können.

Der wesentliche Teil des Produktionsablaufs wird im Produktionsbericht durch vorgegebenen Formeln und Werte definiert beziehungsweise berechnet. Diese Formeln und Werte dürfen aus Geheimhaltungsgründen hier nicht näher erläutert werden. Aus diesem Grund sind im Folgenden nur der Filterdurchsatz, die Menge an Cryopoor, die Menge an I+II+III-Paste, der Pastenfaktor und die pH-Wert Probe operationalisiert angeführt.

Der **Filterpressendurchsatz** pro Rahmen wird im Simulationsmodell anhand des Mittelwerts mit 38,33 Liter pro Stunde defaultmäßig definiert.

Die als Berechnungskennzahl notwendige **Menge an Cryopoor** wird standardmäßig für Einzelläufe mit 2750 kg angenommen, wobei dieser Wert variiert werden kann.

Für Serienläufe von Produktionschargensimulationen werden die Daten aus der Analyse in folgende Dreiecksverteilung übernommen: 2575, 2750, 2850 kg pro Charge.

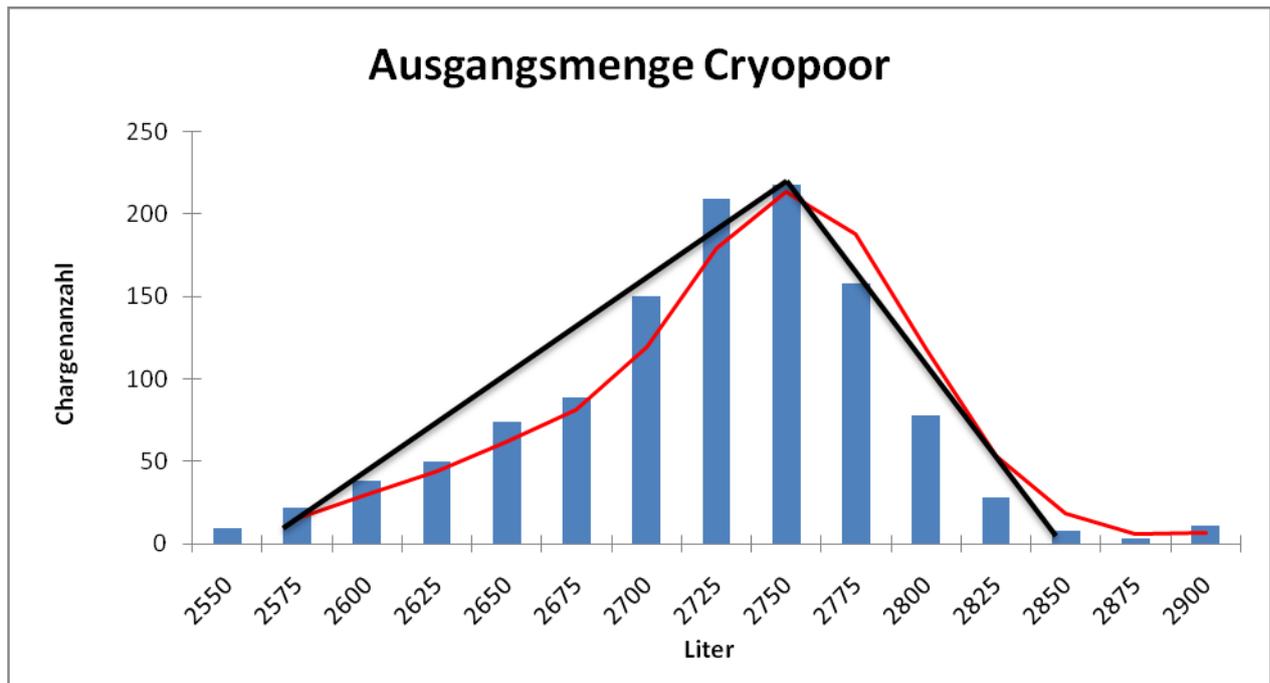


Abbildung 64: Dreiecksverteilung Cryopoor

Die Menge der **I+II+III-Paste** berechnet sich aus der Menge an Cryopoor multipliziert mit dem unten angeführten Pastenfaktor. Dieser Pastenfaktor beeinflusst die Menge an möglichem Output der Paste und basiert auf historischen Daten des Herstellungsprozesses.

Der **Pastenfaktor** ist eine interne Kennzahl, welche die qualitätsbedingten Abweichungen des Blutplasmas in Prozent beschreibt. Er wird durch eine Dreiecksverteilung in das Modell übernommen (0,08925; 0,105; 0,12075).

Die Entnahme der ersten **pH-Wert Probe** wird ebenfalls in einer Dreiecksverteilung übernommen (6,5; 8,0; 10,0 Minuten), die zweite Entnahme der Probe wird mit einem festen Wert von 10 Minuten definiert, da diese etwas aufwändiger ist. Im Verhältnis zur Gesamtdauer spielt dieser Wert eine untergeordnete Rolle.

3.2.3.2 Umsetzung in AnyLogic

Nachdem alle Abläufe, Formeln, Parameter und Variablen analysiert und definiert sind, kann mit der Umsetzung des Simulationsmodells in AnyLogic begonnen werden. Die Vorgehensweise bei der Umsetzung wird nach dem in der Projektgliederung festgelegten Ablauf durchgeführt. Im Folgenden werden die einzelnen Elemente und Module des vollständig umgesetzten Simulationsmodells beschrieben.

Für die generelle Verwendung und Funktionsweise von AnyLogic wird hier auf die Userdokumentationen des Programms selbst verwiesen.

Der Faktor Zeit wird in diesem Simulationsmodell mit einer Zeiteinheit des Systems (Systemtimer) gleich einer Minute definiert. Daraus ergibt sich eine minutengenaue Berechnung sämtlicher Abläufe. Der prozesstechnische Ablauf ist fest über die verbundenen Connectoren vorgegeben und kann pro Simulationslauf (bzw. simulierter Produktionscharge) nur einmal stattfinden.

Um den strukturellen Aufbau des Simulationsmodells in AnyLogic ausreichend nachvollziehen zu können, werden die drei Objekte Tank, Filterpresse und Separator detailliert beschrieben. Die übrigen Parameter, Variablen und Objekte werden inhaltlich kurz umrissen, um das im Folgenden beschriebene Gesamtmodell leichter verstehen zu können.

Die Tanks

Die in der Produktion verwendete Tankanlage besteht aus Tanks unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Eigenschaften. So muss hier ein Objekt erstellt werden, das alle möglichen Tankvarianten abbilden kann.

Für das „Tank“ Objekt kann man ein beliebiges Volumen definieren. Im Modell wird das Volumen in einem Tank in Liter gemessen. Der Parameter „offen“ steuert das Entleeren eines Tanks gleich einer Ventilfunktion. Die Abflussgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Parameter „AusgabeGeschw“, der in Liter pro Zeiteinheit angegeben wird. Die Parameter „kuehlen“, „CIP“, „SIP“, „heizbar“, „temp_von“, „tewmp_bis“ und „Wiegezellen“ definieren Eigenschaften, welche die Tanks an speziellen Positionen in der Produktionslandschaft aufweisen müssen. Diese dienen im Modell zur Systemlandschaftsbeschreibung, werden aber, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, im Modell nicht als relevante Faktoren eingesetzt.

Parameters:	
Name	Type
Volumen	integer
offen	boolean
kuehlen	boolean
CIP	boolean
SIP	boolean
heizbar	boolean
Wiegezellen	boolean
temp_von	real
temp_bis	real
onEnter	code (dynamic)
onExit	code (dynamic)
AusgabeGeschw	real
Zeit	code (dynamic)

Abbildung 65: Die Parameterliste für das Tankobjekt

In den Feldern für „onEnter“ und „onExit“ können Aktionen über Programmcodes definiert werden, die jeweils beim Ein- oder Austritt einer Nachricht durchlaufen werden.

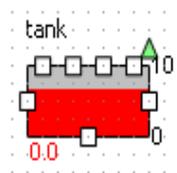


Abbildung 66: Tankobjekt

Der letzte Parameter „Zeit“ ist mit Programmcode belegt, der eine Zeitnehmung ermöglicht, damit die genauen Belegungszeiten der Anlage protokolliert werden können.

Die Visualisierung des Tankobjekts im Simulationsmodell zeigt in der Strukturansicht den Füllstand des Tanks proportional zum Volumen im laufenden Modell an. An der rechten Seite des Tanks ist der maximale Tankinhalt ablesbar. Die roten Zahlen (vgl. Abb. 70 unten) beschreiben den aktuellen Befüllungsstand in Liter.

Die Ports an der linken und rechten Außenseite stellen Schnittstellen für die jeweiligen logischen Abläufe des Prozesses dar. So dient zum Beispiel der linke Port als Start- und der rechte Port als Stopindikator für das Entleeren des Tanks.

Das unten angeführte Strukturdiagramm zeigt den Aufbau des Tankobjekts mit der Verwendung der Ports, Variablen und des Statecharts „entleeren“.

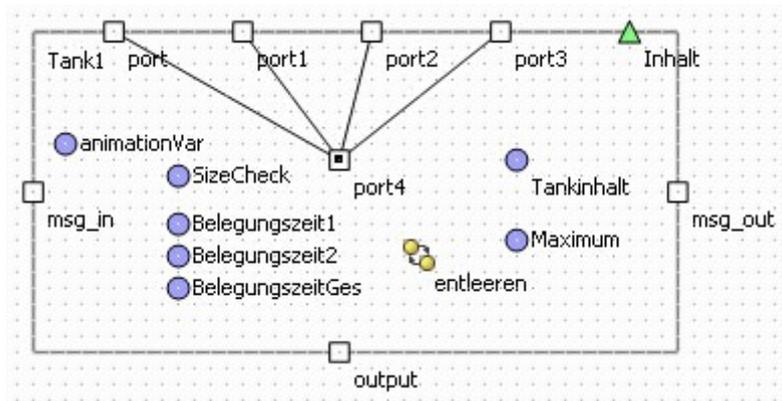


Abbildung 67: Struktur Diagram

Das Statechart wird über den Port „msg_in“ getriggert, also anlassbezogen ausgelöst. Danach wird pro Zeiteinheit eine definierte Menge in Litern über den Port „output“ ausgegeben, bis der Tank leer ist.

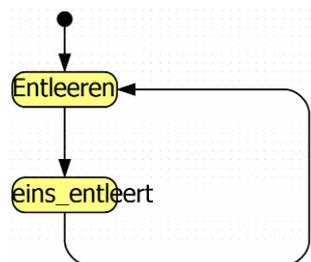


Abbildung 68: Statechart des Tankobjekts

Die Variable „animationVar“ gibt einen booleschen Wert zurück, je nachdem, ob die Animation gerade dieses Objekt betrifft – „X“ oder „-“. Die „Belegungszeit1“, die „Belegungszeit2“ und die „BelegungszeitGes“ dienen der Berechnung der Tankbelegungszeiten. Die Information über die einfließende Menge an Flüssigkeit wird über den Port „port4“ pro Liter gezählt und zur Variable „Tankinhalt“ addiert.



Abbildung 69: Animation des Tankobjekts

Die Variable „SizeCheck“ löst gegebenenfalls in der Animation die Darstellung des Textes „Tank zu klein!“ aus. Wenn ein Tank zu klein ist, wird die Simulation nicht abgebrochen, sondern das benötigte Tankvolumen durch den Text „Mindestgröße:“ und dahinter die Angabe des Volumens angezeigt. Die Abbildung 69 zeigt die grafische Darstellung der Tanks und die Visualisierungsmöglichkeiten bei Tankvolumenüberschreitungen in Rot.

Die Filterpresse

Die Filterpresse wird im Simulationsmodell durch das Objekt „Filterpresse“ implementiert. Sie stellt das nach dem Befüllungsprozess erste angesteuerte Objekt dar.

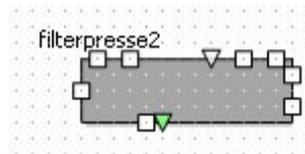


Abbildung 70: Darstellung des Filterpresseobjekts

Das Objekt kann mit zwei Arten von Filtertypen arbeiten, die jeweils als Variablen im Objekt „Model“ definiert sind und im Objekt Filterpresse dem Parameter „Filtertyp“ zugewiesen werden.

Class name:	Filterpresse
Base class:	
Parameters:	
Name	Type
Status	String
Durchsatz	real
NTCMENGE	real
Filterrate	real
OnExitZufluss2	code (dynamic)
Rahmenkapazitaet	real
Filtertyp	real
Zeit	code (dynamic)

Abbildung 71: Parameter der Filterpresse

Im Parameter „Status“ wird angegeben, welches Statechart gerade aktiv ist, zum Beispiel VOWA für Vorwaschen oder NAWA für Nachwaschen der Filterpresse mit speziellen Lösungen. Der „Durchsatz“-Parameter stellt die Filterleistung im Modell

pro Minute dar. „OnExit2“ dient als Auslöser für Programmcode, wenn das gefilterte Material in den Maischetank fließt. Der Parameter „Rahmenkapazität“ stellt das Fassungsvermögen pro in den Filter eingesetzte Rahmen dar. Der letzte Parameter „Zeit“ dient der Messung der Belegungszeit des Objekts.

Den Filtrationsvorgang kann man in drei wesentliche Teilprozesse einteilen: das Vorwaschen der Filterpresse mit der so genannten „VoWa“-Lösung, den Filtrationsvorgang und das Nachwaschen des Filterkuchens mit der Nachwaschlösung (NaWa).

- **Vorwaschen**

Das Statechart „vowa“ stellt den Ablauf des Vorwaschens der Filterpresse dar. Über die erste „Transition“, dem Pfeil zwischen den States „vorwaschen“ und „state“, wird der Chart Timer „vowa“  „vowaschen“ gestartet. Dieser berechnet die Dauer des Vorgangs und steuert die Ausgabe der berechneten Menge an Vorwaschlösung am Port „Output2“.

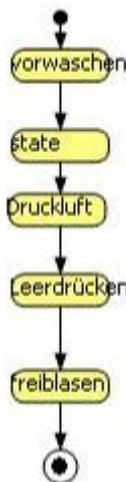


Abbildung 72: Statechart Filterpresse – Vorwaschen

Danach werden die benötigten Zeitspannen für das Reinigen der Filteranlage mit Druckluft (über Timeouts in den States) gesteuert und der Parameter „Status“ von „Vorwaschen“ auf „Filtern“ gesetzt.

- **Filtern**

Ab nun wartet die Filterpresse auf das Eintreffen der Lösung. Die Lösung wird nun in Form von einzelnen Nachrichten (Messages) verarbeitet (Trigger mit Status „Filtern“), wobei jede Nachricht genau einem Liter der Lösung entspricht.

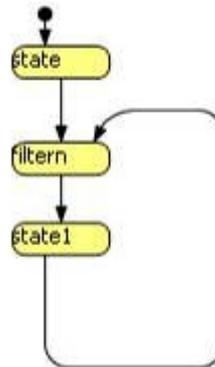


Abbildung 73: Statechart Filterpresse – Filtern

Überschreitet der Filterinhalt (Variable Filterinhalt) die maximal filterbare Menge (Filtermax), muss der Filter „Zwischengeräumt“²⁶ werden. Das System gibt die Nachricht "Filter leeren notwendig!" aus, damit der Engpass im Modell erkannt werden kann. Ein Zähler (Variable Anz_räumen) speichert die Anzahl der Zwischenräumungen des Filters.

Kommt keine Lösung mehr in die Filterpresse, wird der Status auf Nachwaschen „nawa“ gesetzt und somit der Reinigungsprozess gestartet.

- **Nachwaschen**

Für das Nachwaschen wird die restliche Lösung der VoWa-NaWa aus dem Tank T5 durch die Filterpresse geschickt. Danach wird 30 Minuten lang (=Timeout 30) die Filterpresse mit Pressluft getrocknet (=freigeblasen), 30 Minuten leergedrückt und wieder 15 Minuten freigeblasen. Danach werden die Rahmen getauscht und die Filterpresse ist wieder einsatzbereit.

Im Strukturdiagramm (Abbildung 75) der Filterpresse werden links und rechts an der Objektumrandung die Ports Input und Output mit onEnter() bzw. onSend()-Methoden

²⁶ Das Zwischenräumen stellt den Prozess des Entleerens der Filterpresse bzw. das Reinigen der Filter dar.

ausgestattet, um Aktionen zu setzen, wenn die Paste-I+II+III verarbeitet wird. Der Port „output2“ leitet die herausgefilterte Masse in den Maischetank. Die Inputvariable „cryo“ teilt dem Objekt mit, wieviel Cryopoor die Ausgangsbasis für die zu gewinnende Menge an Paste II darstellt, um die richtige Menge an VoWa- und NaWa-Lösung zu berechnen.

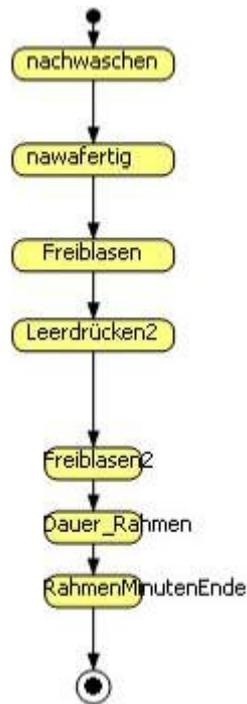


Abbildung 74: Statechart Filterpresse – Nachwaschen

Die Outputvariable „out“ protokolliert die ausgeschiedene Menge des Filtrats in Liter und der Port „output2“ leitet die ausgefilterte Flüssigkeit in den Maischetank.

Das Separatorobjekt bietet drei Ports, um das Reinigen der Zentrifuge, auch Cippen genannt, zu regeln. Diese Ports sind an der Oberseite angebracht. „Cip_in“ stellt den Zufluss von 20 Litern an WFI sicher und reinigt das Gerät vor dem Separieren. Der prozesstechnische Ablauf wird im Timer „cip_timer“ geregelt. Der Port „cip_in2“ startet den Reinigungsprozess nach dem Separieren mit 100 Litern Alkohol durch eine Startnachricht des Ports „cip_start“. Das WFI und der Alkohol werden nach dem Reinigungsvorgang über den Port „cip_out“ an der Unterseite in den Maischetank geleitet.

Auf der linken Seite des Objekts werden über den „input“-Port der Zufluss und das Separieren der Lösung gestartet. Durch die erste ankommende Nachricht wird durch triggern des Statecharts „sepa“ und dem Timer „sepatimer“ das Separieren mit dem definierten Durchsatz zyklisch wiederholt. Das geschieht solange, bis entweder der Separatorinhalt größer als der maximale Separatorinhalt ist und der Separator geleert werden muss, oder die gesamte Lösung verarbeitet wurde. Der „msg_in“-Port wird in diesem Objekt nicht aktiv verwendet.

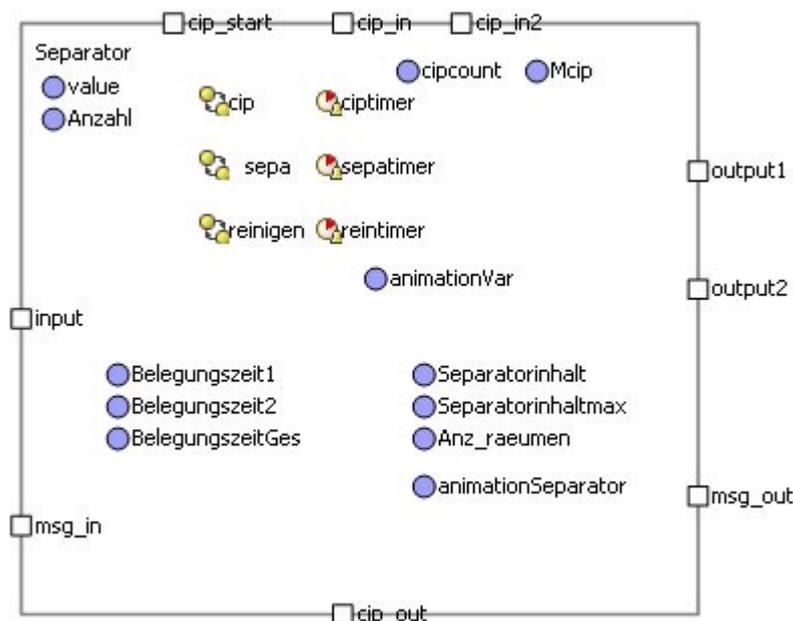


Abbildung 78: Strukturdiagramm des Separators

Auf der rechten Seite des Separatorobjekts wird die Ausgabe der getrennten Lösung über die Ports „output1“ für die Paste II und „output2“ für die SN II –Lösung geregelt.

Die im Objekt verwendeten Variablen der Belegungszeit (Belegungszeit1,

Belegungszeit2, BelegungszeitGes) berechnen und speichern die Gesamtdauer der Verwendung von Beginn der Reinigung mit Wasser, über das Separieren, bis hin zum abschließenden Reinigen mit Alkohol anhand der getTime()-Funktion (=Auslesen der Systemzeit).

Die Steuerung der Reinigungslösung wird anhand der Variablen „Cip-Count“ und „MCip“ sichergestellt. Dabei speichert „Cip-Count“ die Gesamtmenge der jeweiligen Reinigungslösung und „MCip2“ zählt die bereits geschleuderte Reinigungsmenge. Entsprechen die Werte der beiden Variablen einander, wird das Reinigen eingestellt.

Der Separatorinhalt beschreibt in der gleichnamigen Variablen die im Separator enthaltene Menge der Lösung. Der „Separatorinhaltmax“ definiert hingegen den maximalen Wert in Kilogramm, nach dem der Separator geleert werden muss, um weiter separieren zu können. Analog dazu wird in der Variable „Anz_raeumen“ mitgeschrieben, wie oft der Separator händisch geleert werden muss.

„Anzahl“ beschreibt für das Separatorobjekt die gesamte Menge der bis zum jeweiligen Zeitpunkt verarbeiteten Lösung in Liter, als Vergleichsparameter zu der noch zu separierenden Gesamtmenge („IMenge“).

Parameters:	
Name	Type
Durchsatz	real
IMenge	real
Filterrate	real
Status	String
onExit	code (dynamic)
Zeit	code (dynamic)
MaxInhalt	real

Abbildung 79: Parameter im Separatorobjekt

Der Parameter „Durchsatz“ wird mit der Variablen „Separatorgeschwindigkeit“ des Main-Objekts gleichgesetzt, um diesen einfacher wieder zu finden und einzustellen.

Um auch in der Animation über den aktuellen Status des Separators informiert zu werden, wird ein Parameter „Status“ eingeführt, der anzeigt, ob das Objekt frei ist, gereinigt wird oder bereits gereinigt wurde.

Durch „OnExit“ wird, wie bei allen anderen Objekten, ein beliebiger Programmcode, der als Parameterwert in das Objekt eingetragen wird, ausgeführt.

Der Parameter „Zeit“ protokolliert für spätere Analysen die Dauer der Belegungszeiten (in Minuten) in eine definierte Exceldatei.

Ressourcen & Aktivitäten

Zu Beginn jeder neuen Produktionscharge wird als erster Schritt das WFI in einen Tank vorgelegt und gekühlt. In der Simulation geschieht dies durch Aufrufen des Objekts **WFI_Vorlegen**.

An der Oberseite des Objekts befindet sich die Inputvariable „Outputmenge“, diese beschreibt die Menge an WFI, die in den Tank geleitet werden soll. Das Statechart „kuehlen“ wird gestartet, sobald der Timer „WFI-Vorlegen“, das Vorlegen des WFI, abgeschlossen hat.

Die beiden Variablen „x“ und „Ausgabe“ dienen zur Steuerung der exakten Ausgabemenge. Die Ausgabe erfolgt über den Port „port“ an der Unterseite des Objekts. Nach erfolgreichem Befüllen und Kühlen wird eine Nachricht über den „msg_out“-Port an das nächste Objekt der Prozesskette gesendet, um die nächste Aktivität auszulösen. Für die Animationsdarstellung wird ein einfacher Indikatorbalken mit grauem Hintergrund erstellt, der zur jeweiligen Systemzeit die gesamt verbrauchte WFI-Menge anzeigt.

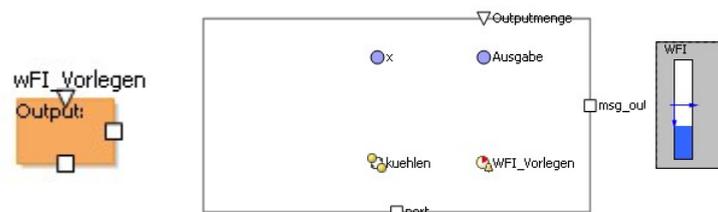


Abbildung 80: Objekt WFI-Vorlegen und Animationsdarstellung

Im prozesstechnischen Ablauf folgt darauf das Objekt „**Plasma**“. Dort wird das gekühlte WFI mit der noch tiefgekühlten Paste I+II+III dispergiert²⁷. Dieser Prozess wird über den „msg_in“-Port ausgelöst, wodurch auch die Animationsvariable

²⁷ Dispergieren oder auch Homogenisieren ist die optimale Durchmischung der jeweiligen Ressourcen.

(animation_anzeige) den booleschen Wert „wahr“ annimmt und eine Grafik der gefrorenen Paste I+II+III im Animationsmodus mit einem Richtungspfeil angezeigt wird.

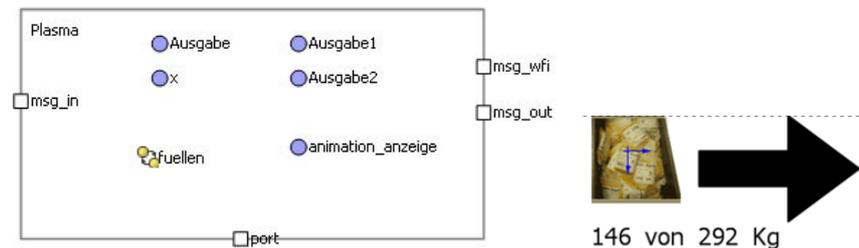


Abbildung 81: Das Objekt Plasma und die Animationsdarstellung

Weiters beschreibt das Statechart „fuellen“ den kompletten Ablauf dieses Prozessschrittes. Zwischen den beiden Zugaben der Paste I+II+III vergehen jeweils etwa 90 Minuten durch Dispergieren. Die Variablen „x“ und „Ausgabe“ dienen zur Steuerung der richtigen Ausgabemengen an Gebinden zur Ausbringung..

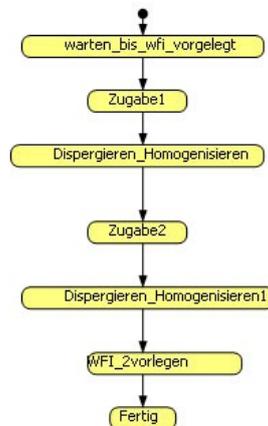


Abbildung 82: Statechart „fuellen“ der Paste I+II+III

Die Gesamtmenge der zu lösenden Paste I+II+III wird im Modell durch den Parameter „Outputmenge“ bestimmt. Die Paste I+II+III wird über den Port („port“) an der Unterseite, mit der im Parameter „Durchsatz“ bestimmten Geschwindigkeit, dem verknüpften Tank hinzugefügt. Kurz vor Ende des Dispergierens wird in einem weiteren Tank das Vorlegen einer Menge an WFI über den „msg_wfi“-Port gestartet. Abschließend wird durch eine Nachricht über den „msg_out“-Port an das nächste Objekt der nächste Prozessschritt ausgelöst.

Das Objekt **WF12** wird, wie oben erwähnt, noch während des Dispergiervorgangs gestartet, um einen verzögerungsfreien Übergang der einzelnen Prozessschritte zu gewährleisten. Der Empfang der Nachricht im Port „msg_in“ löst den Ablauf im Statechart aus. Für das Vorlegen des WFI wird wie in den vorhergehenden Schritten, der Timer genützt. Um das Vorlegen der Natriumacetats zeitgerecht umsetzen zu können, wird in diesem Objekt auch die Dauer des Homogenisierens abgewartet.

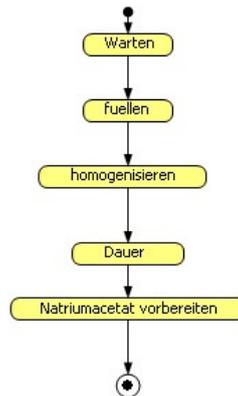


Abbildung 83: Statechart WF12

Sobald die verbleibende Zeit des Homogenisierens der Gesamtlösung der Dauer des Vorlegens entspricht, wird über den Port „msg_acetat2“ eine Nachricht an das Objekt Natriumacetat gesendet, um diesen Prozessschritt anzustoßen.

Das Objekt **Natriumacetat** legt in den Tank T2 das Natriumacetat (NA) vor und fügt es dann temperiert der Gesamtlösung in T1 hinzu. Das Objekt startet seine Aktivität mit dem Empfang einer Nachricht auf dem Port „msg_in“. Zuerst wird durch den Erhalt der Parameter „OnEnter“ der Output des Tanks T2 geschlossen, damit das NA nicht direkt in den nächsten Tank läuft. Weiters wird ein Event zum Starten des im Statechart „fuellen“ definierten Ablaufs gefeuert. Der Timer steuert die Ausgabemenge des Natriumacetats über den Port an der Unterseite des Objekts.

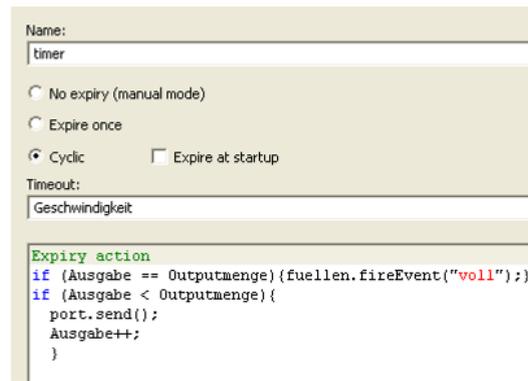


Abbildung 84: Timer des Natriumacetat Objekts

Die Menge der auszugebenden Lösung wird durch die Inputvariable „Outputmenge“ für das Objekt auf der Modellebene berechnet. Der Wert dieser Variable wird mit der Variable „Ausgabe“ verglichen, bis die Werte einander gleichen. Danach wird die Gesamtmenge mit der im Parameter „Geschwindigkeit“ definierten Durchsatz ausgegeben.

Dieser Vorgang wird durch einen grauen Indikatorbalken animiert. Der maximale Wert der Skala wird durch die Variable „Outputmenge“, und der Inhalt über die Variable „Ausgabe“ übernommen.

Nach dem das gesamte NA eingebracht wurde, wird durch den Parameter „OnExit“ der Output des Tanks T2 wieder geöffnet und die Ausgabe beginnt. Die Variable x protokolliert in diesem Objekt an diversen Stellen den zeitlichen Ablauf. Abschließend wird wieder eine Nachricht vom Port „msg_out“ an das nächste verbundene Objekt gesendet.

Das Objekt **sPuffer** oder auch **Spezialpuffer** wird nach einer berechneten zeitlichen Verzögerung aktiviert. Der Spezialpuffer wird in den Tank T3 zur Zwischenlagerung gefüllt. Es werden keine anderen Objekte durch eine Nachricht aktiv angesteuert.

Das Objekt selbst ist analog zu den nachfolgenden Objekten **WFI**, **ETOH**, **NaHCO₃**, **vorwaschen**, **ALCWFI**, **NaCl** und **ETOH₂** aufgebaut, daher wird die Umsetzung dieser Objekte hier allgemein erläutert.

An der Oberseite wird durch die Inputvariable „Outputmenge“ ein Wert, der auf der Modellebene berechnet wird, über eine Variable in das jeweilige Objekt geleitet. Dieser bestimmt die auszugebende Menge der jeweiligen Lösung oder Ressource. Auf der linken Seite wird über den „msg_in“-Port die Aktivität des Objektes durch

Auslösen des Statechart-Ablaufs gestartet. Alle oben genannten Objekte verfügen über den dynamischen Parameter „OnEnter“, der bei Eintreffen einer Nachricht den im Parameterfeld eingetragenen Code ausführt. Meist handelt es sich hier um die Logfile-Protokollierung oder Zeitmessung.

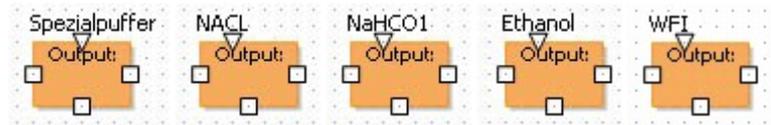


Abbildung 85: Ausgabeobjekte nach einem Schema

Der „msg_out“-Port schickt, wie bei den vorherigen Objekten, eine Nachricht zu den jeweiligen verknüpften Ports. Auch hier gibt es die Möglichkeit, durch den Parameter „OnExit“ Code auszuführen. An der Unterseite wird der Port für den Output verwendet. Dieser wird mit den jeweiligen Tanks oder Equipment verbunden. Auch hier kann der dynamische Code durch den Parameter „OnOutput“ verwendet werden, meist für die Berechnung der Gesamtmenge einer Ressource, wie zum Beispiel WFI in der Variablen „MWfiGes“.

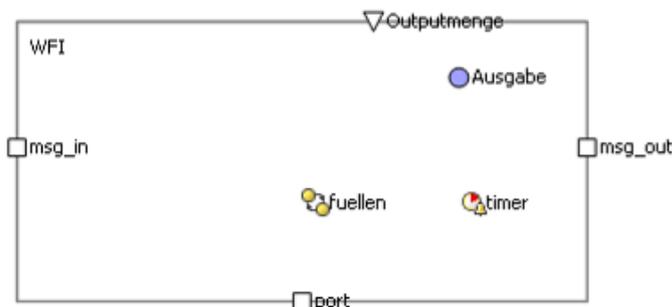


Abbildung 86: Aufbau der Ausgabeobjekte

Im Objekt steuert das Statechart in Verbindung mit dem Timer die Ausgabe der jeweiligen Ressourcen oder Flüssigkeiten. Der Timer arbeitet zyklisch mit dem im Parameter Geschwindigkeit festgesetzten Durchsatz die jeweilige Zugabe über den Befehl „port.send()“ ab.

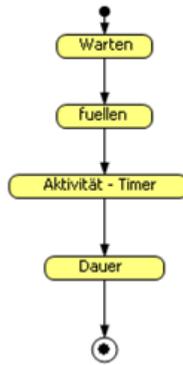


Abbildung 87: Statechart der Ausgabeobjekte

Entspricht der Wert der ausgegebenen Menge dem Wert der Inputvariablen, wird wiederum ein Stoppevent ausgelöst. Im letzten Schritt wird eine Nachricht über den Befehl „msg_out.send()“ gesendet, der den nächsten Prozessschritt aktiviert.

Die Animation wird, wie bei den anderen Zugaben, über einen Indikatorbalken mit der jeweiligen Outputmenge als Skalenmaximum abgebildet. Die noch auszugebende Ressourcmenge wird durch den blauen Balken dargestellt. Dieser wird mit der ausgegeben Menge immer kleiner.

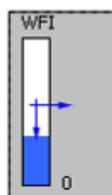


Abbildung 88: Indikatorbalken am Beispiel WFI

Das Berechnen und Einsetzen der Rahmen, das Erzeugen und Vorlegen der VoWa/NaWa-Lösung in den Tank T5, sowie deren pH-Wertmessungen wird im Folgenden durch das Objekt „**FP_Vorbereitung**“ gesteuert.

Durch das Eintreffen einer Nachricht im Port „Input_msg“ wird das Statechart „Vorbereiten“ angestoßen und der definierte Ablauf abgearbeitet (Abbildung 90).

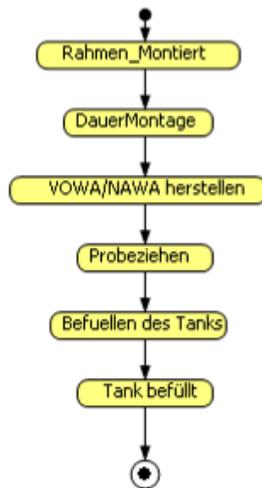


Abbildung 89: Statechart Filterpresse Vorbereitung

Der Timer „probe“ wird nach dem State „Probeziehen“ gestartet. Analog dazu wird der „timer“ zum Befüllen des Tanks T5 mit der jeweiligen Ausgangsgeschwindigkeit, die im Parameter „AusgabeGeschw“ definiert ist, gestartet. Damit beginnt die Befüllung über den Port „Output_VONAWA“ in den Tank T5.

Die Berechnung dieser VoWa/NaWa-Lösung benötigt einerseits die Ausgangsmenge an Cryopoor (über die Inputvariable „cryo“), andererseits Formeln aus dem Herstellungsbericht. Diese Formeln werden in den Variablen WFI, NaCl, EtOH und G umgesetzt.

Abhängig von der Rahmenanzahl kann die Dauer des Beladens der Filterschichten zwischen den Zwischenräumen der Filterpresse unterschiedlich lange dauern, sowie eine abweichende Menge an VoWa/NaWa (mehr oder weniger) benötigen. Die VoWa und die NaWa wird hier mit unterschiedlichen Mengen berechnet und dann für den Abgleich der auszugebenden Menge addiert und mit der Variable Ausgabe verglichen.

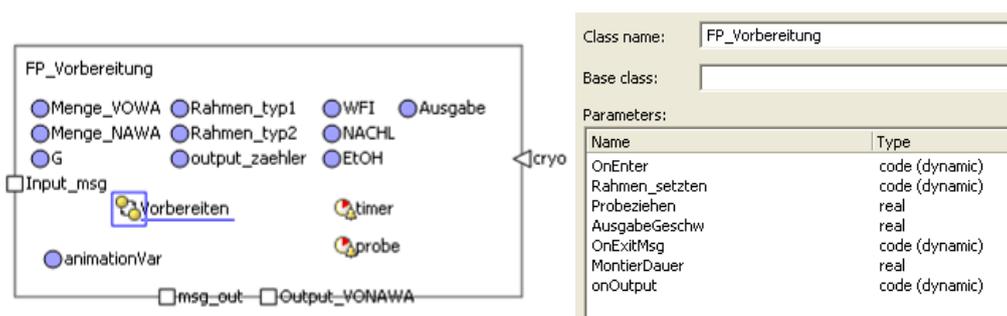


Abbildung 90: Objekt FP-Vorbereitung und Parameterliste

Die Animation wird ebenfalls im Statechart durch Setzen eines booleschen Wertes der Variable „animationVar“ gestartet und beendet. In der Animationssicht wird der Text „Rahmen montieren“ auf der Filterpresse als Beschreibung angezeigt.

Die Parameter OnEnter, Rahmen_setzen, OnExitMsg und onOutput werden auch hier hauptsächlich zur Protokollierung im Logfile mit Code befüllt. „Probeziehen“ und „MontierDauer“ beschreibt jeweils die Dauer, die eine Person zum Messen des pH-Wertes oder Montieren der Rahmen benötigt.

Das „**Zeiger**“-Objekt misst die Anzahl der eintreffenden Nachrichten und stellt sie sowohl in der Strukturansicht als auch in der Animationsansicht als Rechteck mit der Zahl in der Mitte dar.

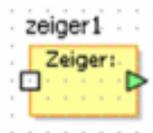


Abbildung 91: Zeigerobjekt

Die Outputvariable ermöglicht gegebenenfalls noch einmal das Weiterleiten des Wertes an ein anderes Objekt, eine Variable oder eine Berechnung.



Abbildung 92: Animation PH-Kontrolle

Zur zeitlichen Verzögerung und Darstellung verschiedenster kleiner Prozesse (*Kühlen, Zuflussregler, ph-kontrolle, rühren*) und Hilfsbrücken (*verzögern, WFI-Timer*) wird das sehr einfach gehaltene Objekt „Auslöser“ erstellt. Es bietet einen Port für den Nachrichteingang, der eine zeitliche Verzögerung auslöst, welche im Parameter

Dauer definiert werden kann, und einen Nachrichtenausgang, der wie der Eingang mit OnEnter bzw. OnExit mit Codefragmenten verfeinert werden kann.

Die Umsetzung der **pH-Kontrolle** stellt einen verzögerten Auslöser dar, der als Animation einen Mitarbeiter bei der pH-Wertmessung zeigt.

Das letzte Objekt „**regler**“ wird speziell für die zweimalige Befüllung des Tanks T2 erstellt. Es zählt die Anzahl der ankommenden Nachrichten in der Variable „Var“ bis der Wert auf zwei steht, erst dann wird die Nachricht weitergeleitet.

Parameter & Variablen

In der obersten Objektklasse, dem sogenannten „Model“, werden zwei statische Parameter definiert: die Menge an zu verarbeitenden Cryopoor und der Pastenfaktor, welcher den Anteil der zu lösenden Paste I+II+III aus der gegebenen Menge an Cryopoor berechnet.



Name	Type
Cryopoor	real (global)
PastenFaktor	real

Abbildung 93: Parameter der Objektklasse "Model"

Die Variablen hingegen werden teilweise auf derselben Ebene verwendet oder in die jeweiligen Objekte als Parameter oder wiederum als Variablen übernommen. Im Folgenden sind alle diese Variablen mit einer kurzen Beschreibung aufgelistet:

Variablenbezeichnung	Beschreibung
A	Ausgangsmenge an Cryopoor, die für die Berechnung etlicher Formeln benötigt wird
Rate	Passt sich an das jeweilige Fraktionsverfahren an, definiert, entweder x für das II+III+W oder y für I+II+III+W
Paste123	Berechnet die Ergiebigkeit des Plasmas
verzVar, Timer_verz	Berechnen die Dauer von Verzögerungen
wfiM, Wfi_menge, Wfi_menge2	Speichert oder berechnet die Menge an Water for Industrie
NA	Beinhaltet die Formel zur Berechnung der Menge an Natriumacetat
SP, auxSP	Beinhalten die Formel zur Berechnung der Menge an Spezialpuffer
CD	Beinhaltet die Formel zur Berechnung der Menge an WFI
Eaux, E2, Eau2	Beinhalten die Formel zur Berechnung der Menge an Ethanol
MWfiGes	Zählt die Gesamtmenge des verbrauchten WFI im Model
AlcGes	Zählt die Gesamtmenge des verbrauchten Alkohol
Systemzeit, Gesamtzeit, GesamtzeitMinuten	Messen die Systemzeit, wandeln diese in Minuten um und summieren die Gesamtzeit
NTC1, I	Zeigt den Stand des Tankinhalts der verknüpften Tanks
Filtergeschwindigkeit	Definiert die Geschwindigkeit für die Filterpresse
Filtertyp1, Filtertyp2	Berechnet die Rahmenanzahl für den jeweiligen Filtertyp und wird in der Filterpresse verwendet
aux_Cryo	Übernimmt den Wert des Cryopoor-Parameters in eine Variable
alcWfiM	Bestimmt die Menge der Alkohol-WFI-Mischung
N, Naux	Beinhalten die Formel zur Berechnung der Menge an NaHCO ₃
Mnacl, MNaclaux	Beinhalten die Formel zur Berechnung der Menge an NaCl
EndeOSR	Beendet das Experiment durch Annahme des Wertes 1 (=Model stop condition)
Paste2	Zählt die fraktionierte Menge an Paste-II
Separatorgeschwindigkeit	Definiert die Geschwindigkeit des Separators

3.2.4 Modellverifizierung

In der Modellverifizierung wird die korrekte Abbildung des konzeptuellen Modells auf das Computermodell behandelt. Es wird fortwährend geprüft, ob das Programm eine korrekte Implementierung des konzeptuellen Modells darstellt. Die Verifikation ist ein begleitender Prozess der Modellentwicklung und wird schon mit den ersten Abläufen im Modell begonnen.

Neben der formalen Programmverifizierung wird auch sichergestellt, dass das Computermodell den systematischen Anforderungen genügt (Debugging).

Die Testtechnik kann in die drei Bereiche Softwareentwicklung, Statistik und logische Konsistenz gegliedert werden:

Im Rahmen der Softwareentwicklung werden die Datenanbindungen und Datenausgaben, sowie die zur Interaktion (Messages und Protokollierung) benötigten CodeSnippets getestet.

Die temporären Ausgabewerte der einzelnen Schritte, Module und Teilprozesse werden statistisch überprüft. Das heißt, es wird geklärt, ob die Werte in den definierten Intervallen liegen und ob diese auch begründbar sind.

Der dritte Teil der Modellverifikation ist die Prüfung der ablauflogischen Konsistenz. Dazu wurden anhand der Prozessanimation der Strukturansicht unlogische Aktionen aufgespürt und die korrekte Funktion aller Objekte sichergestellt. Ergänzt wird dieser Schritt mit einer Abnahme des Herstellungsleiters für das gesamte Modell in der Animationsansicht (face validity).

Im Folgenden sind alle Teilprozesse (Verifikationsprozesse 1 bis 3, Abbildung 94), Objekte und Module für das gesamte Simulationsmodell dargestellt:

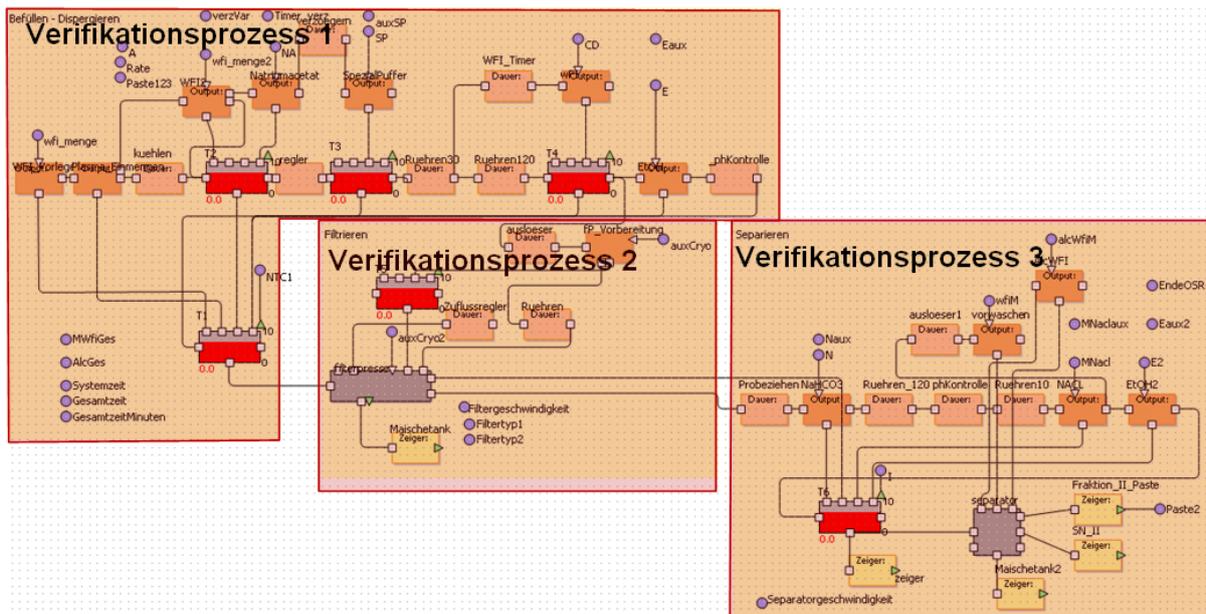


Abbildung 94: Verifikation des Modells

Als Abgleichsmöglichkeit wird von vornherein das Logfile benutzt und mit verifikationsrelevanten Daten befüllt, zum Beispiel mit der genauen Dauer, dem Beginn und dem Ende eines Prozesses, sowie mit der Information über die aktuelle Aktivität.

```

*****
* Befuellen - NTC1 *
*****
Eingefüllt: 464.01 WFI
Kühlen auf 1*+-1*
Gekühlt - Dauer: 80.0
*****
Ersten 11 Kisten á 1 Minute
90 Minuten homogenisieren
Zweiten 11 Kisten á 1 Minute
90 Minuten homogenisieren
** WFI-> T2 vorlegen
Paste eingebracht - Dauer: 282.0
*****
** WFI-> NTC eingebracht:284.0
** Start Homogenisieren 180min
Belegungszeit root.T2: 25.0
NaAC -> T2 vorlegen: 364.0
NaAC -> T2 vorgelegt: 371.0
START VER2371.0
Homogenisieren 180min fertig: 464.0
*****
NaAC entleeren von T1 beginnt:464.0
-----960.0
Belegungszeit root.T2: 593.0
NaAC in NTC eingebracht: 964.0
S-Puffer -> NTC einbringen: 964.0
S-Puffer vorgelegt: 964.0
*****
S-Puffer -> NTC eingebracht: 1202.0

```

Abbildung 95: Logfile-Protokollierung

Die Ausgabe in das Logfile wird im Modell in den Statecharts oder den OnEnter- und OnExit-Parametern durch den Befehl *traceln()* durchgeführt.

3.2.5 Modellvalidierung

Die Validierung des Modells ist die Bestimmung der Gültigkeit des Modells und verläuft, wie die Verifizierung, parallel zum Modellentwicklungsprozess. Es soll also geprüft werden, ob das Modell eine angemessene Repräsentation der Wirklichkeit darstellt und stellvertretend für das reale System den Zweck für Experimente erfüllen kann.

Die Gültigkeit eines Modells läßt sich nur in Anbetracht der vorgegebenen Zielsetzungen und der Problemstellung sinnvoll nachweisen.

Die Modellvalidierung wird in drei Stufen durchgeführt:

I.) Validierung des konzeptuellen Modells:

Es wird dem Herstellungsleiter zur Überprüfung der Gültigkeit der Beschreibung, der wesentlichen Systemkomponenten, deren Attribute und Beziehungen, der Simulationsablauf und Modellaufbau präsentiert. Er gibt im günstigen Fall seine Zustimmung zum konzeptuellen Modell. (Plausibilität durch Expertenbewertung)

II.) Modellverifikation:

Die wiederholte Prüfung der Richtigkeit der Werte und Formeln wird für das Gesamtmodell durchgeführt und mit den Produktionsdaten abgeglichen. (Vergleiche Abbildung 95: Logfile-Protokollierung)

III.) Operationale Modellvalidierung:

Anhand der operationalen Modellvalidierung wird das dynamische Modellverhalten kontrolliert und final angepaßt.

Zuerst wird ein **Outputvergleich** der empirischen Daten des Systems mit den generierten Modellausgaben in drei Szenarien durchgeführt:

- **Validierung anhand einer fixierten Chargengröße**
- **Validierung anhand eines Chargenintervalls**
- **Validierung über die Cryopormengen und die Paste I+II+III**

Danach werden anhand einer **Sensitivitätsanalyse** die Robustheit und die Grenzen des Modells bezüglich der Veränderungen der Eingabewerte (im Speziellen von Cryopoor und der Paste I+II+III) ausgelotet. Zum Beispiel, wird pro Simulationslauf die Menge an Cryopoor beginnend von 1500Kg in 1 Kg-Schritten solange erhöht bis mindestens ein Modellparameter einen unplausiblen Wert oder das Modell eine Fehlermeldung ausgibt. Dadurch wird geprüft, in welchem Bereich das Modell gültig und bis wohin das Modell lauffähig ist.

Begeleitet wird die gesamte Modellvalidierung durch eine **Kalibrierung**, welche die Anpassung des Modells an das reale System durch Änderungen von Parametern durchführt. Fehler, die während der Überprüfung entdeckt werden, führen dazu, dass bestimmte Schritte der Modellentwicklung neu durchgeführt oder angepaßt werden müssen.

Vorbereitend für den Outputvergleich werden für jeden Lauf sowohl die Belegzeiten der Tanks, der Filterpresse und des Separators, sowie auch die Simulationsergebnisse für die Dauer, die erzeugte Menge an Paste II, die gesamte Menge an WFI und Alkohol in ein Excelfile geschrieben.

	A	B	C	D	E
1	<i>MCryopoor</i>	<i>Dauer</i>	<i>Paste_II</i>	<i>WFI_Gesamt</i>	<i>ALC_Gesamt</i>
2	2747,36	57,71	34	3148	670
3	2793,38	59,25	37	3246	679
4	2633,13	55,80	39	3014	640
5	2761,21	59,37	53	3235	678
6	2785,05	58,96	57	3229	682

Abbildung 96: Excelfile-Protokollierung

Diese künstlich erzeugten Werte werden mit den Erfahrungswerten der Experten (Herstellungsleiter) und den protokollierten Produktionszahlen der BDE (Betriebsdatenerfassung) in den im Folgenden beschriebenen Szenarien verglichen.

a.) Validierung anhand einer konstanten Chargengröße

Als Ausgangsbasis für die erste Teilvalidierung wird die „Standardchargengröße“²⁸ von 2700 Liter Cryopoor für 300 Simulationsläufe fixiert. Die Vergleichsangaben des

²⁸ Obwohl die BDE sehr unterschiedliche Werte ausgibt, sind laut Herstellungsleiter etwa 2700 Liter Cryopoor die standardmäßig verwendete Chargengröße.

Herstellungsleiters lauten:

Für eine Produktionscharge von 2700 Liter Cryopoor benötigt die Anlage etwa 60 Stunden und erzeugt 40-50 Kilogramm an Paste-II-Fraktion.

In Abbildung 98 lässt sich erkennen, dass leichte Differenzen vorliegen. Im Durchschnitt liegt jedoch nur eine Abweichung von etwa -17 Minuten zwischen den Produktionsdaten (Rot) und den Simulationsergebnissen (Blau) vor. Die Simulationsläufe ergeben eine durchschnittliche Dauer von 57 Stunden und 18 Minuten für ein Outputergebnis von durchschnittlich 45,45 kg.

Zur Bestimmung der Validität wird weiters für die Vergleichswerte der BDE ein Intervall von 2670 bis 2730 Liter Cryopoor gewählt. Das Intervall ist nötig, da zu wenig Produktionschargen mit (annähernd) 2700 Liter protokolliert sind.

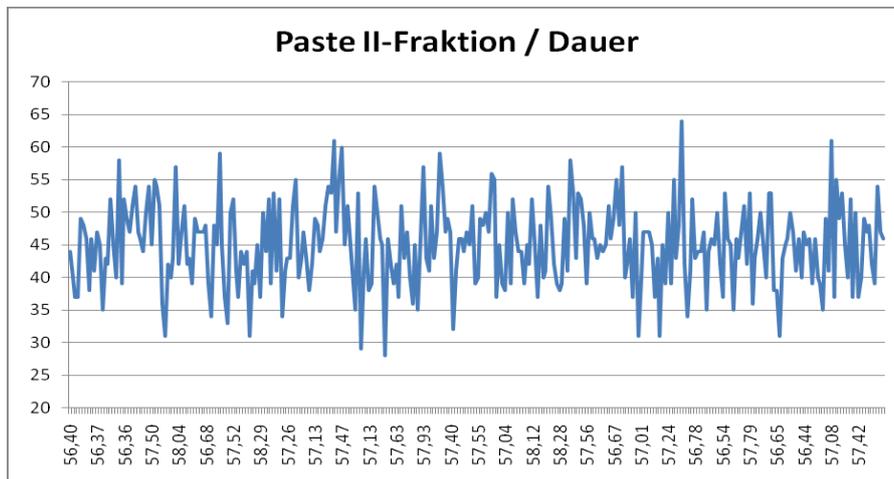


Abbildung 97: Dauer der Paste-II-Fraktion Herstellung bei 2700Kg Cryopoor in 300 Simulationsläufen

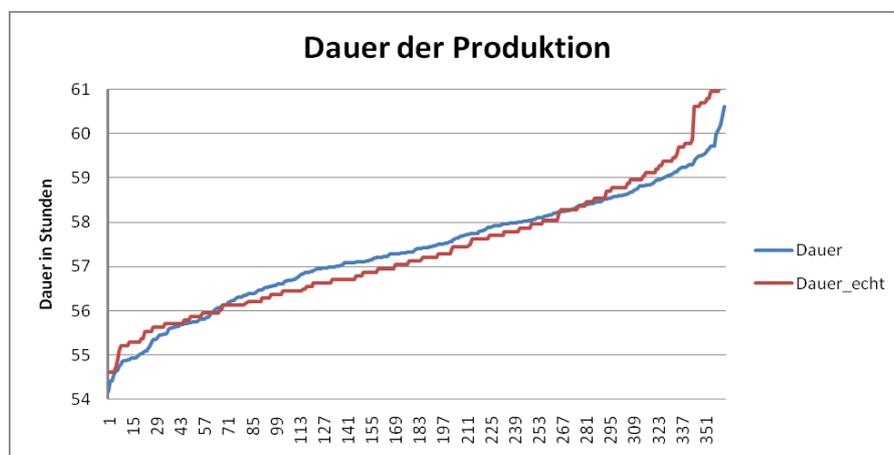


Abbildung 98: Modellvalidierung Produktionsdauer (nach aufsteigender Cryopormenge)

Die Auswertung der BDE ergibt eine durchschnittliche Produktionsdauer von 57 Stunden und 44 Minuten mit 41,54 kg an Paste II als Output.

	Simulation ²⁹	Herstellingleiter	BDE ³⁰
Cryopoor	2700	2700	2704,84
Dauer	57:18 Stunden	60 Stunden	57:44 Stunden
Paste II	45,45 Kg	40-50 Kg	41,54 Kg

Abbildung 99: Ergebnisübersicht Validierung

b.) Validierung anhand einer Chargenserie

Im zweiten Schritt werden die Produktionsdaten den Simulationsergebnissen aus dem Chargenintervall von jeweils 2200 bis 2900 Liter gegenübergestellt. Somit kann die Modellvalidität für diese Bandbreite der realen Chargengrößen geprüft werden. Weiters lassen sich durch den Grad der Übereinstimmung Bereiche der Simulation als mehr oder weniger glaubwürdiger oder plausibel klassifizieren.

Abbildung 100 zeigt die Dynamik der Paste-II-Fraktion ausgabemenge im Verhältnis zu den Cryopoorwerten, welche in Kilogrammschritten bis 2900 erhöht werden.

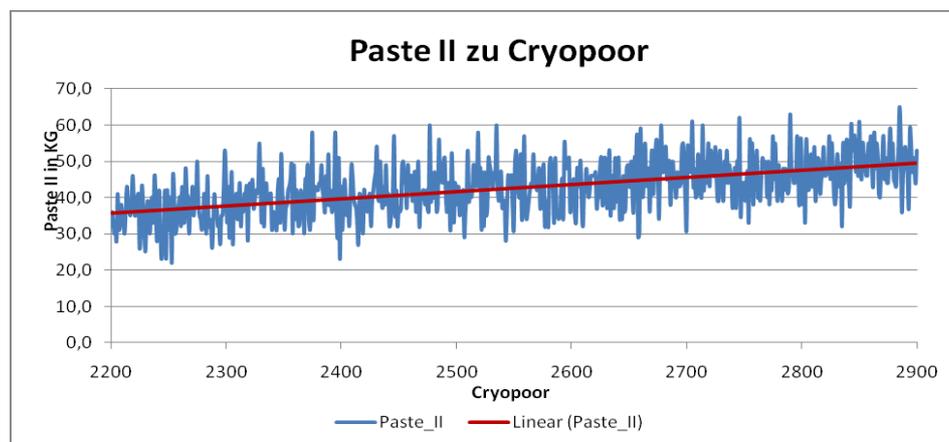


Abbildung 100: Simulation Paste-II-Fraktion / Cryopoor mit linearer Trendline

In der nächsten Abbildung werden die Echtdaten der Paste II-Fraktion und Cryopoor in Blau mit den Simulationsdaten in Rot übereinander abgebildet, um den

²⁹ Die angegebenen Durchschnittszahlen basieren auf 300 Simulationsläufen mit der Startmenge 2700 Liter Cryopoor

³⁰ Durchschnitt aus dem Chargengrößenintervall [2670;2730]

Deckungsgrad der Simulation zu visualisieren.

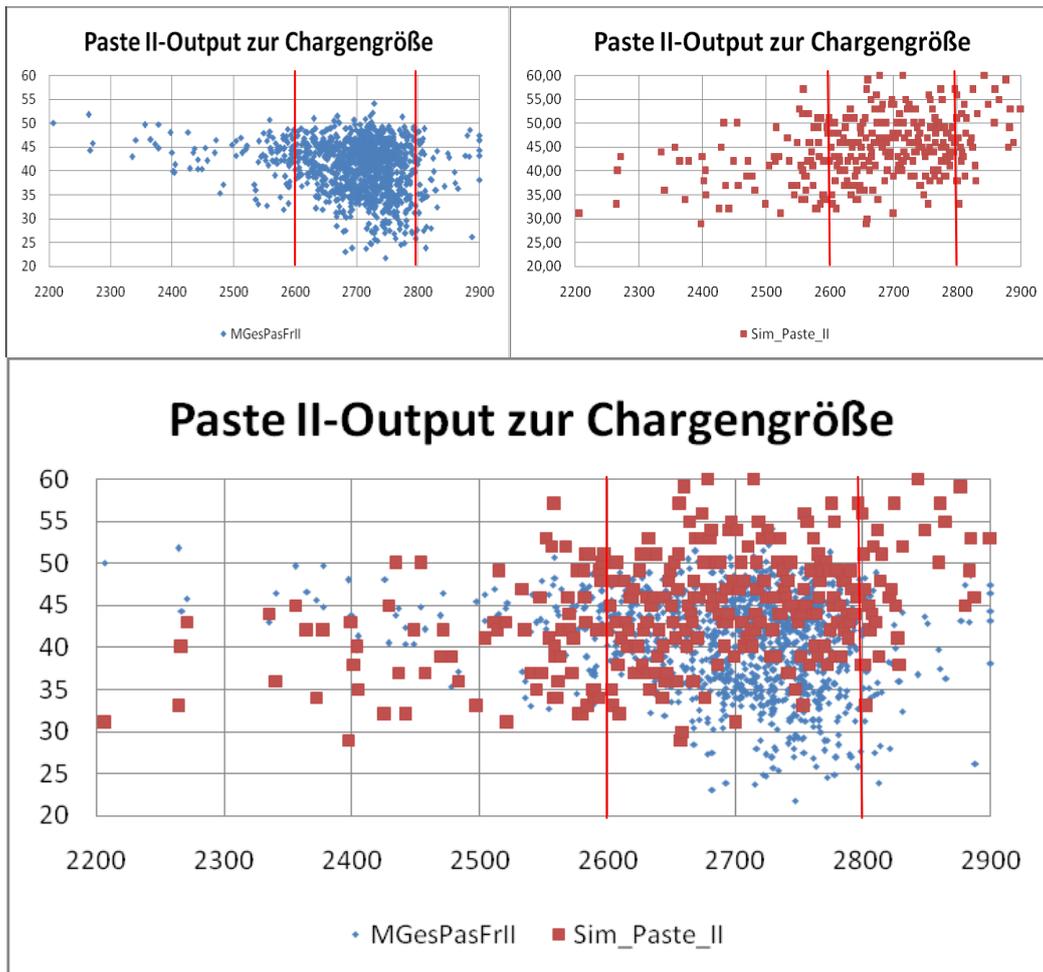


Abbildung 101: Streuung der Echt- und Simulationsdaten von Cryopoor zu Paste II in kg

Dabei erkennt man, dass die Simulationsdaten eher linear nach oben steigen, während die Produktionsdaten eher einen leichten Bauch nach unten bilden. Gut zu erkennen ist jedoch, dass sich im Bereich von 2600 bis 2800 Litern die Daten deutlich überschneiden bzw. überlappen. Die Abweichungen nach oben und nach unten können im oben angeführten Intervall vernachlässigt werden.

Da in dieser Simulation jede Chargengröße nur einmal ausgeführt wird, tritt der lineare Charakter des Zeitablaufs stärker in den Vordergrund und entspricht durchaus dem realen System.

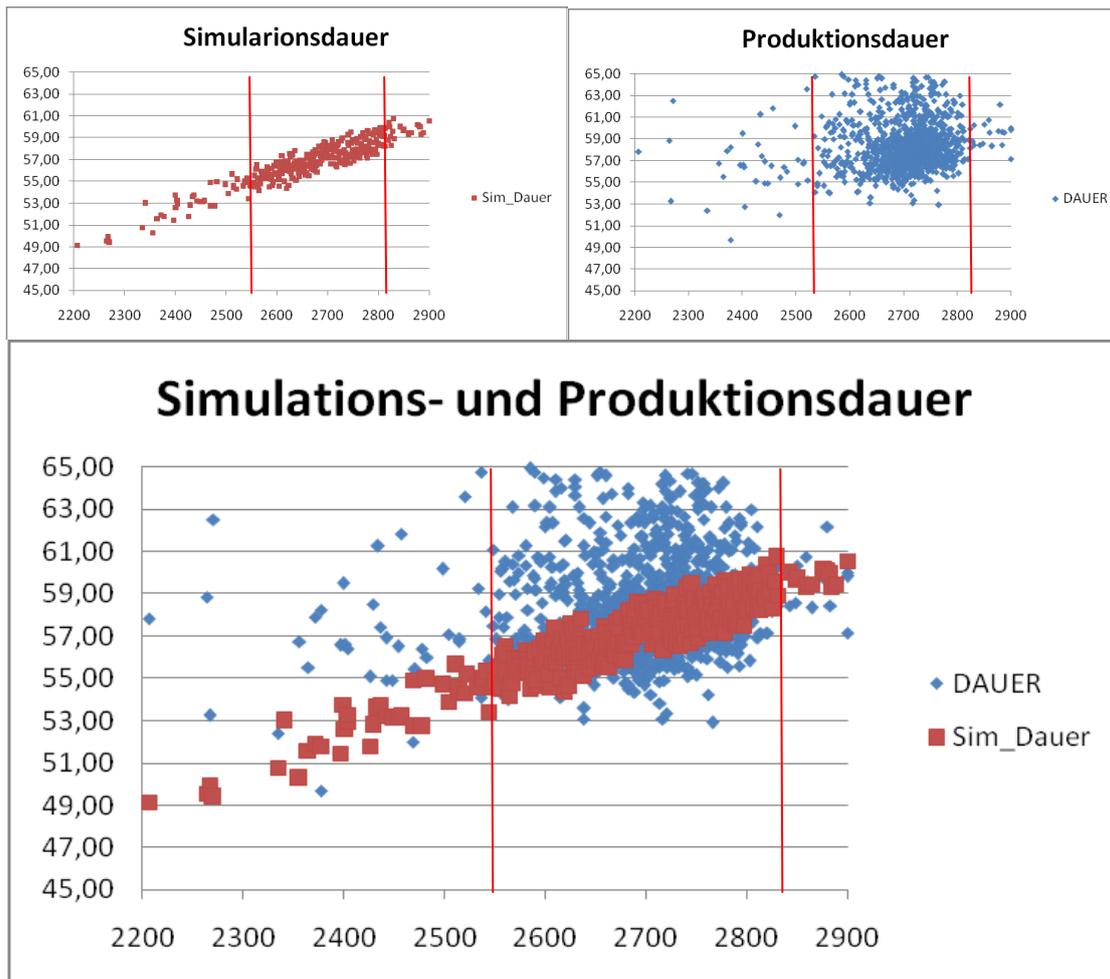


Abbildung 102: Streuung der Produktionsdauer in Stunden für die Chargenspanne 2200-2900

Es kann hier sehr gut gesehen werden, dass das Zentrum der Produktivdaten schwerpunktmäßig mit den Simulationsdaten übereinstimmt und somit im Bereich der roten Linien als valide angenommen werden kann.

Um die Validierung des Simulationsmodells im Kern zu bestätigen, wird im Folgenden aus den Erkenntnissen über die Sensitivität des Modells der Bereich von 2500 bis 2850 kg nochmals getestet.

c.) Validierung im sensitivierten Chargenbereich

Im letzten Validierungsschritt wird anhand der Informationen aus dem Histogramm eine Dreiecksverteilung für die Ausgangsmengen an Cryopoor erstellt. Wie man in der Abbildung 103 erkennen kann, entsprechen die Simulationsergebnisse den Erwartungen an ein valides Modell mit großer Schwankungsbreite.

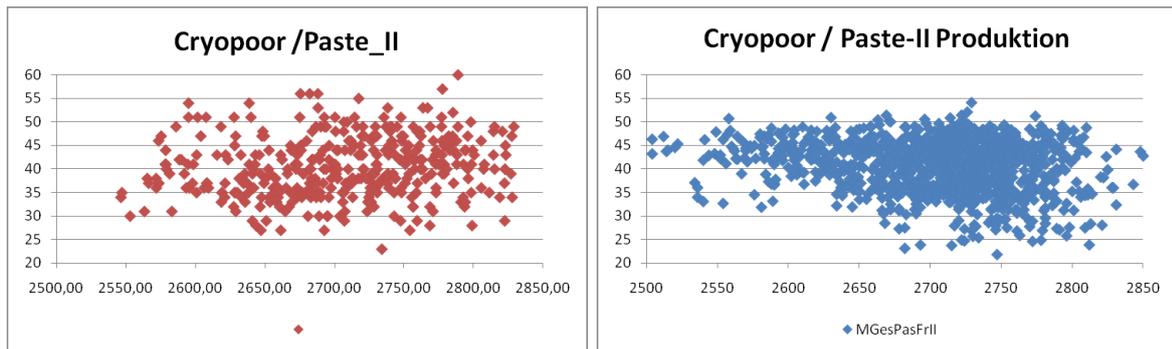


Abbildung 103: Cryopoor zu Paste-II-Fraktion anhand 400 Simulationsläufe

Das Simulationsmodell beschreibt einen direkteren und auch steileren Zusammenhang zwischen der Dauer einer Produktion und der verwendeten Menge an Cryopoor. Andererseits ist aber die gesamte Modellbreite zur Gänze im realen Produktionsbereich enthalten.

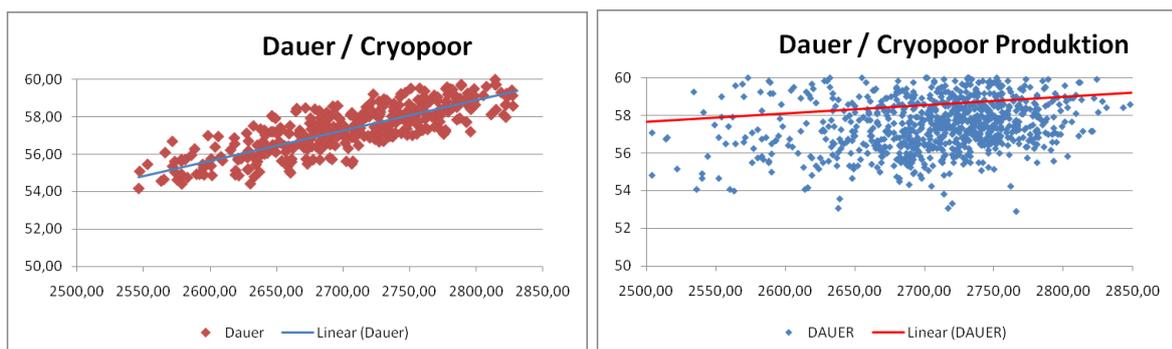


Abbildung 104: Dauer zu Cryopoor anhand 400 Simulationsläufe

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass kein Simulationslauf auf einzelner Ebene unplausible Ergebnisdaten liefert und somit das Modell als valide bezeichnet werden kann. Sollte später dem nicht abgedeckten Bereich der Schwankungsbreite der Produktionsdauer von Anforderungsseite her Bedeutung zu kommen, muss hier sicherlich großes Augenmerk darauf gelegt werden, die Streuung zu reproduzieren.

Nun kann das validierte Simulationsmodell für Experimente rund um die Herstellung der Fraktion II-Paste verwendet werden.

3.3 Simulation

Mit der (kontinuierlichen) Durchführung der Simulation wird sichergestellt, dass das Simulationsmodell zweckgemäß seine Aufgabe erfüllt (Verifikation). Im zweiten Schritt wird geprüft, ob das Modell das Echtsystem in punkto zeitlicher Ablauf und Schwankungsbreiten der Produktionsmenge vergleichbar darstellen kann (Validierung). Durch die Sicherstellung der Validität und Reliabilität des Simulationsmodells als Erhebungsinstruments wird die Modellentwicklung final abgeschlossen und die Grundlage für die Durchführung von gültigen Simulationsläufen und Experimenten gelegt.

3.3.1 Simulationsmodell

Das Modell kann durch die verschiedenen Startparameter (Werte, Verteilungen) und Startscenarien (Anzahl der Wiederholungen, Wiederholung mit der gleichen Verteilung, etc.) problemlos ausgeführt werden. Diese Parameter werden einerseits in der Strukturansicht des Modells selbst (Modelländerung) festgelegt und andererseits in den standardmäßig zur Verfügung stehenden Experimenten.

In der unten angeführten Abbildung sieht man die Parameter für einen Simulationslauf mit 2700 kg Cryopoor und einer zufälligen Pastenfaktorverteilung, bezogen auf die Objektklasse Main.

Name:	<input type="text" value="Simulation"/>	Main active object class (root):	<input type="text" value="Main"/>
Random number generation:			
<input checked="" type="radio"/> Random seed (unique simulation runs)			
<input type="radio"/> Fixed seed (reproducible simulation runs) Seed value: <input type="text" value="1"/>			
Cryopoor	<input type="text" value="2700"/>		
Pastenfaktor	<input type="text" value="DistrTriangular.sample(0.08925,0.105,0.12075)"/>		
	<input type="button" value="Paste from clipboard"/>		

Abbildung 105: Simulationsstartparameter

Für die Verifizierung und Validierung werden unterschiedliche Experimente durchgeführt, teils mit multiplen Modellläufen und der Variation eines oder mehrerer Parameter (siehe die zwei Beispiele in Abbildung 106 und Abbildung 107).

Name: Main active object class (root):

Random number generation:
 Random seed (unique simulation runs)
 Fixed seed (reproducible simulation runs) Seed value:

Parameters: Varied in range Freeform Number of runs

Parameter	Type	Value		
		Min	Max	Step
Cryopoor	Range	2200	3200	1
PastenFaktor	Fixed	DistrTriangular.sample(0.08925,0.105,0.12075)		

Abbildung 106: Parametervariation im Gesamtmodell

Name: Main active object class (root):

Random number generation:
 Random seed (unique simulation runs)
 Fixed seed (reproducible simulation runs) Seed value:

Parameters: Varied in range Freeform Number of runs

Parameter	Expression
Cryopoor*	DistrTriangular.sample(2540.0, 2730.0, 2850.0)
PastenFaktor	DistrTriangular.sample(0.08925,0.105,0.12075)

Abbildung 107: Multiple Parametervariation im Gesamtmodell

Strukturansicht

Im Prozessmodell stellen die Tanks, die Zuflüsse und Zugaben, sowie die beiden Verarbeitungseinheiten, die Filterpresse und der Separator, die wesentlichen Elemente des Simulationsmodells dar. Deshalb wird die Strukturansicht einem Prozessmodell ähnelnd aufgebaut. Ausgangspunkt ist das am weitesten links positionierte Objekt (WFI-Vorlegen). Von dort aus läuft der Prozess bis zum letzten Objekt derselben Ebene nach rechts, wo die Ebene gewechselt wird. Tanks werden immer von darüber liegenden Objekten befüllt, deren Verknüpfungen an den oberen Ports anschließen. Andere Verzweigungen nach oben oder unten sind meist Auslöser für Aktionen oder Warteschleifen. Die violetten Punkte sind die Steuervariablen für die Hauptklasse des Modells.

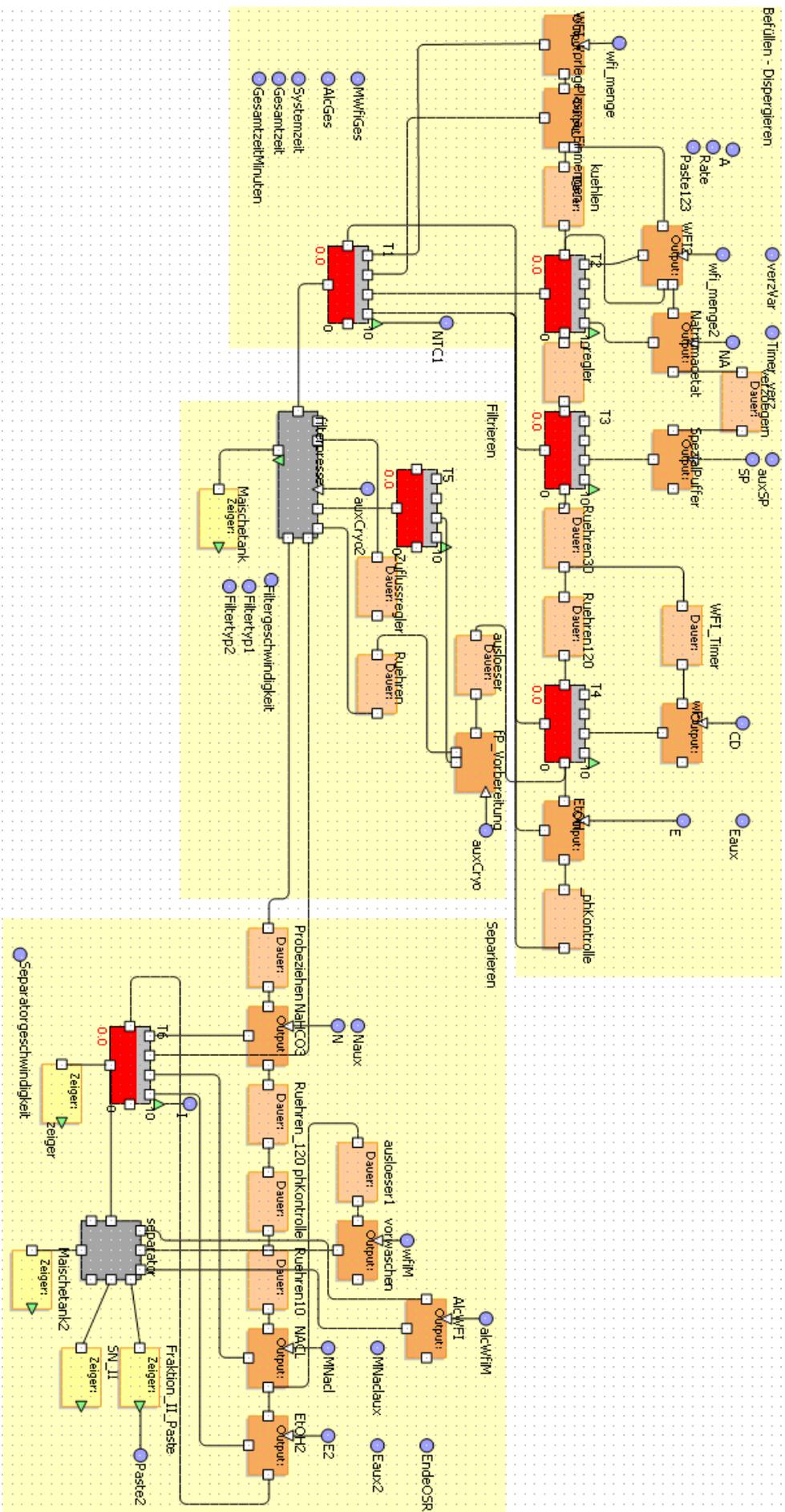


Abbildung 108: Strukturansicht der Simulation

Animationsansicht

In der Animationsansicht wird die Komplexität der Strukturansicht noch einmal reduziert, um die schnelle Erfassung der Vorgänge und relevanten Elemente des Produktionsablaufs optimal abzubilden.

Weiters läßt sich die Ausgangsmenge an Cryopoor über einen Schieberegler und das Produktionsverfahren, welches die Änderung einiger Parameter mit sich bringt, durch eine einfache Auswahl des Produktionsverfahrens (Fraktion II+III+W oder Fraktion I+II+III+W), einstellen.

Diese Parameter müssen jedoch vor dem Start der Animation eingestellt werden.

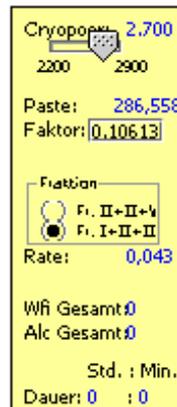
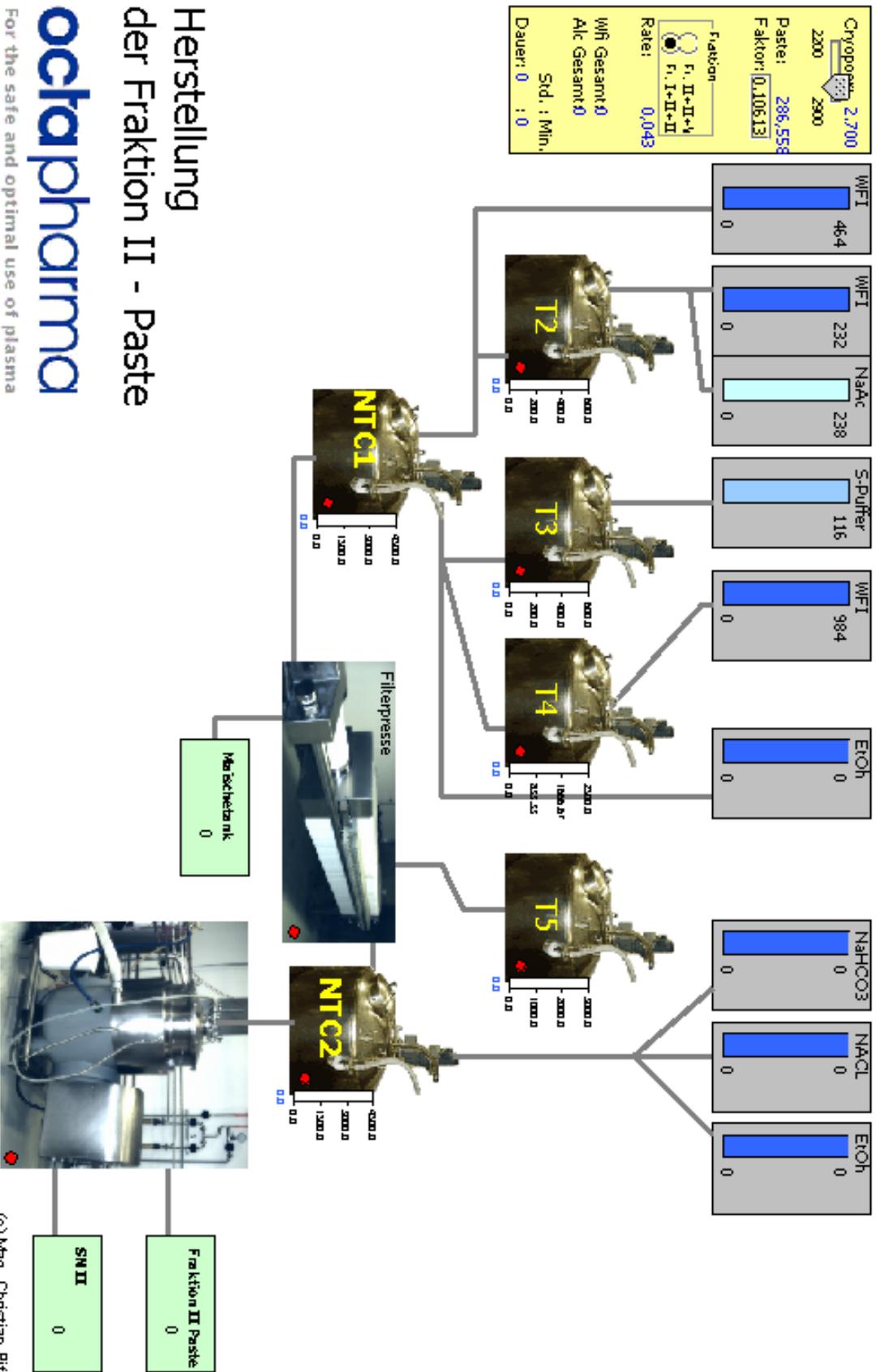


Abbildung 109: Parameteränderungen in der Animationsansicht



Herstellung der Fraktion II - Paste

For the safe and optimal use of plasma



Abbildung 110: Animationsansicht der Simulation

3.3.2 Experimente

Die hier beschriebenen Experimente stehen auf Grund der in den vorangegangenen Schritten durchgeführten Validierung auf einer guten prognosetechnischen Basis. Weiters werden nur die Modellparameter verändert und nie das Modell adaptiert, um eine möglichst große Vergleichbarkeit der Testergebnisse zu erreichen.

3.3.2.1 Kapazitätsschätzung einer neuen Anlage

Das erste Simulationsexperiment wird als Kontroll- und Planungsinstrument für eine neue Produktionsstätte der Octapharma Wien verwendet. Durch eine simulierte Stichprobe von rund 60 Testläufen wird die maximal mögliche Produktionschargengröße für diese Anlage mit 1450 Liter Ausgangsmenge an Cryopoor prädiktiv errechnet. Das Ergebnis wird mit den Schätzwerten des Herstellungsleiters verglichen, um das reale System plausibel interpretieren bzw. daraus Rückschlüsse auf potentielle Flaschenhälse oder Abweichungen zu bestehenden Jahreskapazitäten anderer Anlagen ziehen zu können.

Für die Anpassung der Simulation an das Experiment gilt es die ausgewählte Standardmenge an Cryopoor (2700 Liter) auf 1450 Liter herabzusetzen. Der Ablauf ist laut Produktionshandbuch identisch zu den Produktionsprozessen der Octapharma Wien. Weiters wird in AnyLogic die Systemeinstellung des Durchführungsmodus von Simulation auf Experiment gestellt, um ausreichend viele Testläufe hintereinander durchführen zu können. Die Ergebnisdaten der experimentellen Läufe werden standardmäßig in einem Excelfile protokolliert und ausgewertet.

Die Ergebnisdaten werden mit den IST-Zahlen der Produktionsstätte verglichen und um die qualitative Expertenmeinung des Herstellungsleiters ergänzt. (Die Echtdateien dürfen hier aus unternehmensinternen Gründen nicht veröffentlicht werden.)

Die realen Werte des Produktionsoutputs und der Produktionsdauer gestalten sich im Vergleich zum Ursprungssystem als einerseits zu gering und andererseits als zu lang. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Einschätzung des Herstellungsleiters und läßt auf ungehobenes Effizienzpotential schließen.

In weiterer Folge könnte anhand von weiteren Experimenten und detaillierten Datenvergleichen die Optimierungsmöglichkeiten der neuen Produktionsstätte

präzise herausgefiltert werden. Jedoch würde allein dieses Thema bereits eine eigne Arbeit füllen und wird daher in dieser Dissertation nicht weiter verfolgt.

3.3.2.2 Kapazitätsverdopplung

Das zweite Simulationsexperiment wird wiederum als unterstützendes Planungsinstrument bzw. als Input für die Experten für eine Produktionsstättenenerweiterung verwendet. Der Schwerpunkt liegt auf den benötigten Tankvolumina und den möglichen Einsparungen an der Ressource Produktionszeit bzw. gesamten Tankbelegungsdauer.

Zur Durchführung des Experiments zur Chargenverdopplung der Herstellung der Fraktion II Paste wird der Startwert des Simulationsmodells auf 5400 Liter Cryopoor verdoppelt. Weiters wird das Ursprungsmodell um die Möglichkeit einer Befüllung über den maximal zulässigen Fassungsvermögen (Tankvolumen) und einer Protokollierung des neuen Wertes erweitert. Das heißt, wenn ein Tank zu klein ist, wird die Simulation nicht mit einem Fehler beendet, sondern es wird automatisch eine entsprechende Tankgröße angenommen und mitgeschrieben.

Die sich daraus ergebenden Daten werden wiederum für die Analyse in ein Excelsheet geschrieben. Als näherungsweise Vergleichsparameter für die Belegzeiten werden die Durchschnittswerte eines Produktionslaufs mit 2700 Liter Cryopoor verdoppelt und den Ergebnisdaten des Experiments gegenübergestellt (Abb. 116).

Die Tankvolumina der Behelfstanks H1 bis H4 sind auch bei einer Chargengrößenverdoppelung problemlos weiterhin einsetzbar. Die beiden Haupttanks T1 und T2 hingegen müssen durch einen größeren T1 (mindestens 5500 Liter) bzw. einen erheblich größeren T2 (mindestens 8200 Liter) ersetzt werden. Die Mindestvolumina sind in Abbildung 111 in Rot dargestellt.

	Chargengröße 2700						Chargengröße 5400					
Bezeichnung	T1	H1	H2	H3	H4	T2	T1	H1	H2	H3	H4	T2
Max. Vol. d. Lsg.	2195	238	119	979	1433	3613	5488	477	241	1957	2867	8156

Abbildung 111: Tankvolumina bei einer Ausgangsmenge von 5400 Liter Cryopoor

Die Produktionszeitenanalyse deutet auf einen effektiven Zeitgewinn von rund 7

Stunden hin, wenn man 2 Chargenzeiten für 2700 Liter mit einer experimentellen Chargenzeit für 5400 Liter vergleicht. Die Jahresproduktion an Paste-II-Fraktion sollte sich durch diese Maßnahme um knapp 5% erhöhen lassen.

	Chargengröße 2700	Chargengröße 5400	Differenz
Dauer 2700	~ 57 Std.	-	-
Dauer 5400	~ 114 Std. (Σ 2 Chargen)	~107 Std. 15 Min	~6 Std. 50 Min.

Abbildung 112: Produktionszeiten im Vergleich

3.3.3 Interpretation

Die Interpretation behandelt zuerst die Ergebnisse der Simulation in Bezug auf die definierte zentrale Fragestellung. Im zweiten Schritt wird die Analyse der prognostischen und dynamischen Gültigkeit des Modells anhand der aufgestellten Hypothesen analysiert.

Allgemeine Modellanalyse

Der Kern der Fragestellung, inwiefern sich Produktionsabläufe in einem Simulationsmodell abbilden lassen, um daraus nützliche Informationen für das untersuchte Unternehmen zu gewinnen, läßt sich analog zur Fragestellung ganzheitlich herleiten.

Das validierte Simulationsmodell beschreibt einen eindeutigen Gültigkeitsbereich der untersuchten Abläufe und gibt diesen mit wirklichkeitsgetreuen Schwankungen wieder. Dadurch ist für das Unternehmen gewährleistet, dass das Modell als Ausbildungsunterstützung für in der Produktion tätige Mitarbeiter oder als Managementmodell mit Visualisierung eingesetzt werden kann. Das Wissen ist weiters nachhaltig digital erfasst worden und kann leicht reproduziert werden.

Der große Unterschied zu klassischen Analysewerkzeugen, wie Prozess- und Ablaufdiagramme in bekannter Visio- oder Powerpointmanier, läßt sich leicht anhand des Computermodells zeigen. Änderungen verbleiben nicht als spekulative Blueprints, sondern geben durch den Einfluss der hinterlegten Formeln, Funktionen und statistisch belegte Zahlen (Erfahrungswerte) eine Prognose ab, die sich in variantenreichen Planspielen kalibrieren lässt.

Diese Planspiele und Szenarien ermöglichen durch die intensive Auseinandersetzung mit der Produktionskette neue Perspektiven und Ziele für das Unternehmen, die sich wiederum mit Hilfe des Modells kosten- und nutzeneffizient diskutieren und priorisieren lassen.

Dass heißt, eine generelle Verwendungsmöglichkeit in der Produktion der Pharmaindustrie mit einem Mehrwert für das Unternehmen ist in jedem Fall gegeben, womit das übergeordnete Ziel, die praktische Relevanz von Simulationssystemen in der Pharmaproduktion als bewiesen abgeschlossen werden kann.

Abschließend gilt es jedoch auch die Kosten eines größeren Projektes kritisch zu

hinterfragen, da alleine die aktuellen Lizenzkosten von AnyLogic in einer kommerziellen Lizenz das in diesem Projekt vorhandene Budget aufbrauchen würde. Dazu kommt noch, dass die eigentlichen Kosten für internes und externes Personal mit entsprechendem Know-How bzw. Know-How-Aufbau erfahrungsgemäß noch erheblich größer ausfallen würden.

Prognostische und dynamische Gültigkeit

Hier wird der Nachweis der Prognosefähigkeit und der dynamischen Gültigkeit des Modells anhand der analog zu den Hypothesen aufgesetzten Experimente, quasi anhand des Praxiseinsatzes, diskutiert.

In der Hypothese 1 wird erwartet, dass das Simulationsmodell eine realitätsnahe Abbildung der Produktion darstellt, an Hand derer man Produktionsabläufe in Hinblick auf Dauer, Ressourcenverbrauch und Ausgabemenge der Paste II-Fraktion simulieren kann.

Durch die Abnahme des Simulationsmodells in der Phase der Verifizierung und der Validierung durch Experten des Unternehmens, sowie den durchgängigen Vergleich der Betriebsdaten mit den Modellparametern kann die Hypothese 1 analog zur zentralen Fragestellung angenommen werden. Es ist zu beachten, dass das ursprüngliche Modell mit einer Begrenzung der Gültigkeit validiert wurde und diese für die erste Hypothese nicht über oder unterschritten wurde.

Im Rahmen der zweiten Hypothese hängt die Ergebnistreue viel stärker von den ihr zu Grunde gelegten Informationen ab. Weiters ist natürlich der Spielraum der aus den Experimenten gewonnenen Ergebnisinterpretationen um ein vielfaches breiter und umso wichtiger ist nun die unternehmensseitige Professionisteneinschätzung der Simulationsergebnisse geworden.

Durch die Erarbeitung des validen Modells und der Annahme der Hypothese 1 wird die Basis gelegt, explorativ Änderungen in der Produktionslandschaft durchzuführen. Die Hypothese 2 testet die Auswirkungen von Änderungen in der Produktion und die Verwertbarkeit der Vorhersage, einerseits anhand der Zeitersparnis durch eine Verdopplung der Chargengröße und andererseits anhand einer Kapazitätsschätzung einer neuen Produktionsanlage.

Anhand der Experimentsergebnisse läßt eine Verdopplung der Kapazitäten auf einen effektiven Zeitgewinn von rund 7 Stunden schließen. Die Jahresproduktion an Paste-

II-Fraktion sollte sich also durch diese Maßnahme um knapp 5% erhöhen lassen. Diese Prognose erscheint allen Beteiligten ein plausibler Schätzwert zu sein und entspricht einer Umsatzsteigerung von mehreren 100.000 Euro.

Zu widerlegen oder zu bestätigen wird dieser jedoch nur durch eine reale Umsetzung dieser Maßnahme seitens der Octapharma sein.

Etwas transparenter ist die Lage zur Einschätzung einer Anlage mit einer Ausgangskapazität von 1450 kg Cryopoor, da sich hier die Produktionsabteilung bereits im Vorfeld mit diesem Thema beschäftigt hat. Das Ergebnis wurde im Kapitel Experimente schon kurz angerissen. Die realen Werte des Produktionsoutputs und der Produktionsdauer lagen zu niedrig bzw. waren zu lange. Dieses Ergebnis deutet auf einen ineffizienten Produktionsablauf hin und lässt auf ungehobenes Effizienzpotential schließen. Unterstrichen wird dieses Ergebnis auch durch den zuständigen Herstellungsleiter, der hier ebenfalls Optimierungspotential sieht.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass trotz der Unter- und Überschreitung der validierten Systemgrenzen für diese beiden Experimente eine sehr gute Prognosefähigkeit vorliegt und das gesamte Projekt in jeder Stufe auch vom zuständigen Herstellungsleiter als Erfolg angesehen wurde.

4. Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Die Aktualität des Themas Simulation ist nach wie vor gegeben. Gerade in Zeiten wirtschaftlicher Krisen gilt es Ursachen-Wirkungsprinzipien auszuloten und möglichst gute Prognosen über Veränderungsmöglichkeiten und Optimierungsmaßnahmen für Unternehmen zu erstellen.

Das zentrale Forschungsziel dieser Arbeit ist, einen komplexen Produktionsprozess eines Pharmaunternehmens zur Herstellung der „Fraktion II Paste“ als Simulationsmodell abzubilden und anhand der Ergebnisse auf die Anwendbarkeit und den Nutzen für das Unternehmen aus pragmatischer Sicht zu schließen.

Nach der Aufarbeitung der wesentlichen wissenschaftlichen Grundlagen im Simulationsbereich wird die Herstellung der Fraktion II-Paste simuliert. Die Fraktion II-Paste stellt ein aufwendig bereinigtes Proteinzwischenprodukt dar, welches aus menschlichem Blutplasma gewonnen wird und für andere Produkte der Octapharma als Grundlage dient.

Um den angestrebten Nutzen und den zeitlichen Rahmen für das Unternehmen abschätzbar zu machen, wird der Ablauf der Simulationsstudie nach den Grundsätzen des Projektmanagements aufgebaut. Diese werden in der Arbeit aber nicht näher behandelt.

Im ersten Schritt wird über eine Situationsanalyse das Umfeld des Simulationsprojektes erörtert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis für die Zielformulierung, den konzeptionellen Modellentwurf und die Planung der Experimente. Als Simulationssoftware wurde AnyLogic in der Version 5 ausgewählt, da sich damit die Simulation und die gewünschten Experimente optimal umsetzen lassen.

In der darauf folgenden Modellentwicklung werden iterativ die Schritte der Verifizierung und Validierung zur Überprüfung des Simulationsmodells, beziehungsweise zur Fehlerbehebung verwendet. Nach einer abschließenden Gesamtmodellvalidierung ist die Richtigkeit und Gültigkeit für das erstellte Simulationsmodell sichergestellt.

Aufbauend auf dem validierten Modell kann eine variantenreiche Simulation die verschiedenen Szenarien der Produktion durchspielen und hilft so, Optimierungen

aufzufinden.

Anhand des Simulationsmodells des Produktionsprozesses werden durch Experimente planerische und optimierungsrelevante Fragen beantwortet. Durch die Verifizierung und Validierung können gute Prognosen über das Ergebnis unterschiedlicher Produktionsvarianten gefunden werden.

Im letzten Schritt, der Interpretation, wird eine allgemeine Modellanalyse anhand des Simulationsmodells im definierten Gültigkeitsbereich durchgeführt und anhand der Experimente die prognostische und dynamische Gültigkeit diskutiert. Die allgemeine Modellanalyse zeigt, dass die Verwendungsmöglichkeit in der Produktion der Pharmaindustrie in jedem Fall einen Mehrwert für das Unternehmen darstellt, da einerseits das bestehende Wissen nachhaltig festgehalten wird und andererseits neue Perspektiven durch Planspiele gewonnen werden. Die Analyse der beiden Experimente zeigt, dass die prognostische und dynamische Gültigkeit des Modells gegeben ist. Die Ergebnisse zeigen einerseits, dass die Zeitersparnis durch eine Chargengrößenverdopplung der Paste-II-Fraktion zu einer Jahresproduktionssteigerung um knapp 5% führt, und andererseits, dass noch Effizienzpotential in der verglichenen Anlage vorhanden ist.

Schlußfolgernd kann gesagt werden, dass auch bei den hier gezeigten Ergebnissen für den Produktionsprozess das Modell nicht mit dem realen System verwechselt oder gar als gleichwertig angesehen werden darf. Ein Modell bleibt immer nur ein Modell. Weiters hat sich gezeigt, dass neben theoretischem Wissen, praktische Erfahrungen mit interdisziplinären oder ganzheitlichen Methodenkonzeptionen, wie der Umsetzung eines Simulationsprojektes, als der Ausgangspunkt von Innovation in der Produktionsoptimierung und der Unternehmenssteuerung in Unternehmen gesehen werden kann.

Es kann also gesagt werden, dass Simulation seine absolute Berechtigung hat und von Unternehmen als wichtige und zukunftssträchtige Disziplin zum eigenen Vorteil und Nutzen gesehen werden kann.

5. Ausblick

“Innovations cause use to break the rules of our ancestors”

Die Brauchbarkeit für die Produktion in Pharmaunternehmen ist als Ergebnis dieser Arbeit festgehalten und ausreichend analysiert worden. Wesentlich für eine effektive und langfristige Anwendung der Simulation bei Octapharma wäre die Etablierung einer eigenen Rolle, die sich um Simulation diverser Produktionsanlagen und -prozesse kümmert. Sinnvoll wäre ein Inhouse-Consultant, der Lösungsansätze und Optimierungsvorschläge mit den Produktionsverantwortlichen diskutiert und somit das Simulationsmodell in eine fachliche Feedbackschleife einbindet und qualitativ wachsen lässt. Daraus würde sich, stetig steigend, ein beachtlicher Mehrwert für das Unternehmen ableiten lassen.

Durch die im Rahmen des Projektes gezeigten Möglichkeiten der Simulation wurden neue Ziele und Vorstellungen des Unternehmens geweckt. Diese konnten im Rahmen des Projektes nicht mehr umgesetzt werden, belegen aber die Faszination und das Potential, welche durch Simulationsprojekte in Unternehmen erzeugt werden können und bestätigen weiters den Bedarf an neuen, innovativen Lösungswegen.

In Zukunft werden die Möglichkeiten und Werkzeuge der Simulation hoffentlich ebenso zum Selbstverständnis von Wirtschaftsinformatikern gehören, wie heute Prozess- oder Ablaufdiagramme nach unterschiedlichsten Modellierungssprachen.

Literaturliste

- Arnold D., Isermann H., Kuhn A., Tempelmeier H., Furmans K., 2008, Handbuch Logistik.
- Banks Jerry, 1998, Handbook of Simulation - Principles, Methology, Advances, Applications, and Practise
- Biethahn J., Hummeltenberg W., Schmidt B., Stdhly P., Witte T., 1999, Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe
- Bossel H., 1992, Modellbildung und Simulation – Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme
- Bossel H., 2004, Systeme, Dynamik, Simulation – Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme
- Chung C. A., 2004, Simulation Modeling Handbook – A Practical Approach
- Dangelmaier W., 2001, Fertigungsplanung (2. Auflage)
- Degen H., Lorscheid P., 2002, Methoden der Statistik im wirtschaftswissenschaftlichen Grundstudium.
- Diederichs H., 2005, Komplexitätsreduktion in der Software Entwicklung
- Engelhardt-Nowitzki C., Nowitzki O., Krenn B., 2007, Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation - State-of-the-Art und innovative Konzepte
- Forrester J. W., 1972, Grundzüge einer Systemtheorie
- Fox J., 2003, Effect Displays in R for Generalised Linear Models - Journal of Statistical Software, 2003, Vol. 8, No. 15
- Golomb S. W., 1970, Mathematical Models - Uses and Limitations
- Kahlert J., 2004, Simulation technischer Systeme
- Krallmann H., Schönherr M., Trier M., 2007, Systemanalyse im Unternehmen
- Kuhn A. und Wenzel S., 1997, Fortschritte in der Simulationstechnik – 11.Symposium
- Lehn J., Wegmann H., 2006, Einführung in die Statistik
- Mattern F., 1995, Modellbildung und Simulation (Paper)
- Mellouli T., Suhl L., 2006, Optimierungssysteme

Niemeyer G., 1977, Kybernetische System- und Modelltheorie, System Dynamics

Page B., 1991, Diskrete Simulation - Eine Einführung mit Modula

Polasek W., 1997, Schließende Statistik: Einführung in die Schätz- und Testtheorie für Wirtschaftswissenschaftler

Pruscha H., 2006, Statistisches Methodenbuch

Raj Xin, 1991, Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques For Experimental Design

Sachs, L. und Jürgen Hedderich (2009): Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R

Shannon R. E., 1998, Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference - Introduction to the art and science of Simulation

Snedecor, George W. Statistical Methods, 1989, Statistical Methods

Stachowiak H., 1973, Allgemeine Modelltheorie

Ullrich C., 2005, Erwerb von Problemlösungsfähigkeit durch Lernumgebung

Verzeichnis der Webressourcen

<http://www.it-production.com>, besucht, am 20.3.2009

<http://de.wikipedia.org/wiki/Freiheitsgrad> besucht am 11.02.06

<http://www.wisg.cs.uni-magdeburg.de/sim/WJ.html>, besucht am 03. Oktober 2006

<http://www.SourceForge.net>, besucht am 02.10.08

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundlegende Systembegriffe, [Bossel, 1989, S. 11]	16
Abbildung 2: Allgemeine Modelltheorie [Stachowiak, 1973]	17
Abbildung 3: Modellierung / Simulation [Biethahn 99, S.51]	20
Abbildung 4: Klassifikation nach Abbildungsmedium [Page 91, S.5]	20
Abbildung 5: Klassifikation nach Art der Zustandsübergänge [Page 91, S.6].....	21
Abbildung 6: Klassifikation nach Verwendungszweck [Page 91, S.7].....	22
Abbildung 7: Modellklassifikation nach Eigenschaften, Darstellung und Verwendungszweck.....	22
Abbildung 8: Positionierung der Simulation im Problemlösungsprozess [C. Engelhardt-Nowitzki, O. Nowitzki, B. Krenn, 07, S. 190]	25
Abbildung 9: Unterschiede im Verhalten einer zeitabhängigen Variablen in Abhängigkeit von der Simulationsmethode [D. Arnold, A. Kuhn, K. Furmans, H. Isermann, H.Tempelmeier, 08,S.79].....	26
Abbildung 10: Modellbildungsüberblick [Banks 98, S.34]	27
Abbildung 11: Simulationskreislauf [Jörg Kahlert 04, Simulation technischer Systeme, S.19]	28
Abbildung 12: Simulation als Problemlösungsverfahren [Quelle: Vorlesung „Simulation“, Prof. Breitenecker, TU-Wien, 2005].....	29
Abbildung 13: Schritte in einer Simulationsstudie [vgl. Banks 98, S16]	33
Abbildung 14: Modellentwurfsablauf [Page 01, S.13f]	35
Abbildung 15: Beispiel Boxplot [eigene Grafik].....	38
Abbildung 16: Simulationsmodellentwicklung [nach Banks 98, S.56]	41
Abbildung 17: Beispiel-Histogramm.....	59
Abbildung 18: Dreiecksverteilung aus Histogramm erstellen.....	60
Abbildung 19: Stark vereinfachtes Ablaufschema	61
Abbildung 20: Übersicht kommerzieller Simulationssoftware [Quelle: http://www.it-	

production.com/ besucht am 20.3.2009].....	62
Abbildung 21: AnyLogic Enterprise Library (Version 5.2)	64
Abbildung 22: Selbstdefinierte Elemente mit Library Elementen verknüpft.....	65
Abbildung 23: Auswahl des zu startenden Experiments	65
Abbildung 24: Karteikartenreiter Code eines Ports	65
Abbildung 25: Datenquelle für das Modell hinzufügen.....	67
Abbildung 26: Objekt Klasse "Model"	67
Abbildung 27: New Chart Symbol	69
Abbildung 28: Einfügen einer neuen Datenquelle.....	71
Abbildung 29: Spaltennamen in Excel definieren	72
Abbildung 30: Hinzufügen einer Excelarbeitsmappe als Datenquelle.....	73
Abbildung 31: Als Experiment definierte Exceltabelle.....	74
Abbildung 32: Code-Beispiel für das Auslesen und Zuweisen von Exceldaten	74
Abbildung 33: Spaltentypen.....	75
Abbildung 34: Beispiel, wenn in Excel Daten gelöscht wurden, der Bereich der Namensdefinition jedoch nicht geändert wurde	76
Abbildung 35: Methodischer Ablauf	80
Abbildung 36: Zeitlicher Ablauf des Projektes als Balkendiagramm (Gantt).....	85
Abbildung 37: Der Ablaufprozess des Befüllens und Dispergierens.....	88
Abbildung 38: Filterpresse	89
Abbildung 39: Zentrifuge (Separator)	90
Abbildung 40: Gesamtüberblick Ablaufprozess der Paste II-Herstellung.....	91
Abbildung 41: Simulationswerkzeug: AnyLogic [Quelle: http://www.it-production.com besucht am 20.3.2009]	93
Abbildung 42: Tankbehälter bei Octapharma Wien	94
Abbildung 43: Scatterplot-Matrix der Produktionsdauer, Menge an II-Paste, Plasma und Cryopoor.....	96

Abbildung 44: Histogramm der Produktionsdauer mit Median.....	97
Abbildung 45: Boxplot der Produktionsdauer.....	97
Abbildung 46: Erhebungstabelle Tankequipment	98
Abbildung 47: Merkmale Filterpressendurchsatz in KG	98
Abbildung 48: Histogramm des Filterpressendurchsatz pro Rahmen	99
Abbildung 49: Histogramm der verwendeten Cryopormengen mit Median	99
Abbildung 50: Boxplot Ausgangsmenge Cryopoor	100
Abbildung 51: Merkmalsübersicht Cryopoor	100
Abbildung 52: Quantil-Vergleichsplot Cryopoor	101
Abbildung 53: Wertebereiche der Korrelationskoeffizienten und verbale Interpretation, [Bühl, A. und Zöfel, B., 2002, S. 243]	102
Abbildung 54: Regressions-Statistik Paste I+II+III zu Cryopoor	102
Abbildung 55: Regressionsanalyse Paste I+II+III zur Menge an Cryopoor.....	103
Abbildung 56: Histogramm der Paste 410-Verwendung mit Median	105
Abbildung 57: Boxplot der (I+)II+III+W-Paste	105
Abbildung 58: Regressionswerte zw. Paste I+II+III und Paste II-Fraktion	106
Abbildung 59: Regressionsanalyse Paste I+II+III und Paste II-Fraktion	106
Abbildung 60: Histogramm der Paste II-Fraktion mit Median.....	108
Abbildung 61: Boxplot der Paste II-Fraktion	108
Abbildung 62: Regressionswerte zw. Cryopoor und Paste II-Fraktion.....	109
Abbildung 63: Histogramm der pH-Werteinstellungsdauer in Minuten	110
Abbildung 64: Dreiecksverteilung Cryopoor.....	112
Abbildung 65: Die Parameterliste für das Tankobjekt.....	114
Abbildung 66: Tankobjekt	114
Abbildung 67: Struktur Diagram.....	115
Abbildung 68: Statechart des Tankobjekts	115
Abbildung 70: Animation des Tankobjekts.....	115

Abbildung 70: Darstellung des Filterpresseobjekts	116
Abbildung 71: Parameter der Filterpresse	116
Abbildung 72: Statechart Filterpresse – Vorwaschen	117
Abbildung 73: Statechart Filterpresse – Filtern.....	118
Abbildung 74: Statechart Filterpresse – Nachwaschen	119
Abbildung 75: Strukturdiagramm der Filterpresse	120
Abbildung 76: Filterpresse – Animation	120
Abbildung 78: Darstellung des Separatorobjekts	120
Abbildung 79: Strukturdiagramm des Separators	121
Abbildung 80: Parameter im Separatorobjekt.....	122
Abbildung 81: Objekt WFI-Vorlegen und Animationsdarstellung	123
Abbildung 82: Das Objekt Plasma und die Animationsdarstellung	124
Abbildung 83: Statechart „fuellen“ der Paste I+II+III	124
Abbildung 84: Statechart WFI2.....	125
Abbildung 85: Timer des Natriumacetat Objekts	126
Abbildung 86: Ausgabeobjekte nach einem Schema	127
Abbildung 87: Aufbau der Ausgabeobjekte.....	127
Abbildung 88: Statechart der Ausgabeobjekte.....	128
Abbildung 89: Indikatorbalken am Beispiel WFI	128
Abbildung 90: Statechart Filterpresse Vorbereitung	129
Abbildung 91: Objekt FP-Vorbereitung und Parameterliste	129
Abbildung 92: Zeigerobjekt.....	130
Abbildung 93: Animation PH-Kontrolle	130
Abbildung 94: Parameter der Objektklasse "Model"	131
Abbildung 95: Verifikation des Modells	134
Abbildung 96: Logfile-Protokollierung	134

Abbildung 97: Excelfile-Protokollierung	136
Abbildung 98: Dauer der Paste-II-Fraktion Herstellung bei 2700Kg Cryopoor in 300 Simulationsläufen	137
Abbildung 99: Modellvalidierung Produktionsdauer (nach aufsteigender Cryopoormenge).....	137
Abbildung 100: Ergebnisübersicht Validierung	138
Abbildung 101: Simulation Paste-II-Fraktion / Cryopoor mit linearer Trendline	138
Abbildung 102: Streuung der Echt- und Simulationsdaten von Cryopoor zu Paste II in kg.....	139
Abbildung 103: Streuung der Produktionsdauer in Stunden für die Chargenspanne 2200-2900	140
Abbildung 104: Cryopoor zu Paste-II-Fraktion anhand 400 Simulationsläufe.....	141
Abbildung 105: Dauer zu Cryopoor anhand 400 Simulationsläufe	141
Abbildung 106: Simulationsstartparameter	142
Abbildung 107: Parametervariation im Gesamtmodell.....	143
Abbildung 108: Multiple Parametervariation im Gesamtmodell	143
Abbildung 109: Strukturansicht der Simulation	144
Abbildung 110: Parameteränderungen in der Animationsansicht.....	145
Abbildung 111: Animationsansicht der Simulation.....	146
Abbildung 112: Tankvolumina bei einer Ausgangsmenge von 5400 Liter Cryopoor.....	148
Abbildung 113: Produktionszeiten im Vergleich.....	149
Abbildung 114: Signifikanztabelle für Korrelationskoeffizienten [Quelle: Sachs, L. und J. Hedderich, S.634, 09]	163

Anhang: Signifikanztabelle und Korrelation

- Wird verwendet, um eine Mindestschwelle für den Korrelationskoeffizienten zu einem bestimmten Signifikanzniveau und der Grad der Freiheit zu bestimmen.
- Die 90%, 95%, 98% und 99% (zweiseitiger Test) Signifikanzniveaus des Korrelationskoeffizienten sind in der nachstehenden Tabelle aufgeführt (unter der Annahme normalverteilter Datensätze).
- Die Freiheitsgrade (df) = n - 2 für eine Stichprobe der Größe n.

FG	Zweiseitiger Test			Einseitiger Test		
	5 % #	1 %	0,1 %	5 %	1 %	0,1 %
1	0,9969	A*	B*	0,9877	0,9995	C*
2	0,9500	0,9900	0,9990	0,9000	0,9800	0,9980
3	0,8783	0,9587	0,9911	0,805	0,934	0,986
4	0,811	0,917	0,974	0,729	0,882	0,963
5	0,754	0,875	0,951	0,669	0,833	0,935
6	0,707	0,834	0,925	0,621	0,789	0,905
7	0,666	0,798	0,898	0,582	0,750	0,875
8	0,632	0,765	0,872	0,549	0,715	0,847
9	0,602	0,735	0,847	0,521	0,685	0,820
10	0,576	0,708	0,823	0,497	0,658	0,795
11	0,553	0,684	0,801	0,476	0,634	0,772
12	0,532	0,661	0,780	0,457	0,612	0,750
13	0,514	0,641	0,760	0,441	0,592	0,730
14	0,497	0,623	0,742	0,426	0,574	0,711
15	0,482	0,606	0,725	0,412	0,558	0,694
16	0,468	0,590	0,708	0,400	0,543	0,678
17	0,456	0,575	0,693	0,389	0,529	0,662
18	0,444	0,561	0,679	0,378	0,516	0,648
19	0,433	0,549	0,665	0,369	0,503	0,635
20	0,423	0,537	0,652	0,360	0,492	0,622
21	0,413	0,526	0,640	0,352	0,482	0,610
22	0,404	0,515	0,629	0,344	0,472	0,599
23	0,396	0,505	0,618	0,337	0,462	0,588
24	0,388	0,496	0,607	0,330	0,453	0,578
25	0,381	0,487	0,597	0,323	0,445	0,568
26	0,374	0,478	0,588	0,317	0,437	0,559
27	0,367	0,470	0,579	0,311	0,430	0,550
28	0,361	0,463	0,570	0,306	0,423	0,541
29	0,355	0,456	0,562	0,301	0,416	0,533
30	0,349	0,449	0,554	0,296	0,409	0,526
35	0,325	0,418	0,519	0,275	0,381	0,492
40	0,304	0,393	0,490	0,257	0,358	0,463
50	0,273	0,354	0,443	0,231	0,322	0,419
60	0,250	0,325	0,408	0,211	0,295	0,385
70	0,232	0,302	0,380	0,195	0,274	0,358
80	0,217	0,283	0,357	0,183	0,257	0,336
90	0,205	0,267	0,338	0,173	0,242	0,318
100	0,195	0,254	0,321	0,164	0,230	0,302
120	0,178	0,232	0,294	0,150	0,210	0,277
150	0,159	0,208	0,263	0,134	0,189	0,249
200	0,138	0,181	0,230	0,116	0,164	0,216
250	0,124	0,162	0,206	0,104	0,146	0,194
300	0,113	0,148	0,188	0,095	0,134	0,177
350	0,105	0,137	0,175	0,0878	0,124	0,164
400	0,0978	0,128	0,164	0,0822	0,116	0,154
500	0,0875	0,115	0,146	0,0735	0,104	0,138
700	0,0740	0,0972	0,124	0,0621	0,0878	0,116
1000	0,0619	0,0813	0,104	0,0520	0,0735	0,0975
1500	0,0505	0,0664	0,0847	0,0424	0,0600	0,0795
2000	0,0438	0,0575	0,0734	0,0368	0,0519	0,0689

A* = 0,999877 B* = 0,9999877 C* = 0,999951

Bei Bedarf lässt sich die 5%-Schranke durch $2/\sqrt{\nu+2}$ mit $\nu = FG$ approximieren, z. B. $\nu = 14$: $2/\sqrt{14+2} = 0,5$.

Abbildung 113: Signifikanztabelle für Korrelationskoeffizienten
[Quelle: Sachs, L. und J. Hedderich, S.634, 09]

Lebenslauf

Name	Mag. (rer. soc. oec.) Christian Piffer
Geburtsdatum	12. Dezember 1977
Ehefrau	Mag. Ilona Piffer
Kinder	Lena Chiara Piffer (2006) Fabian Timo Piffer (2008)
Eltern	Erich Piffer Dir.i.R. Veronika Piffer
Geschwister	Dr. med. Andrea Weimar Erich Piffer, jun.
1985-1989	Volksschule Eugendorf
1989-1997	Akademisches Gymnasium Salzburg
1997-1999	Matura am Abendgymnasium Salzburg
02-09/1999	Bundesheer: mit Kraftfahrerausbildung C, F & G
10/1999-06/2004	Studium der Wirtschaftsinformatik an der TU Wien Diplomarbeit: Beifahrer.at - Eine Transportplattform für die Kordinierung von Personen- und Gütertransporten in Österreich
10/2004- 02/2010	Doktoratsstudium der Wirtschaftsinformatik an der TU Wien. Dissertation: Simulation und Optimierung eines Herstellungsprozesses in der Pharmaindustrie
06/2006-08/2008	Projektmanager & Leitung der Gruppe DataQualityManagement & ReportingSystems Volksbanken AG
seit 09/2008	Senior Consultant Focus Solutions