

Statistische Versuchsplanung für **Data Farming-Konzepte in** **Tecnomatix Plant Simulation**

Bachelorthesis zur Erlangung des akademischen Grades:

Bachelor of Science (B. Sc)

im Fach Maschinenbau

Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet IT in Produktion und Logistik
Technische Universität Dortmund

Autor: René Zimmermann,
rene.zimmermann@tu-dortmund.de,
Matrikelnummer: 156995

Ausgegeben am: 25.05.2016

Eingereicht am: 23.08.2016

Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe
Dipl.-Inf. Anne Antonia Scheidler

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Statistische Versuchsplanung	3
2.1 Statistische Grundbegriffe	3
2.2 Aufbau und Nutzen der Statistischen Versuchsplanung	6
2.3 Varianten der statistischen Versuchsplanung	7
3 Elemente der Simulation	23
3.1 Data Farming	23
3.2 Plant Simulation	25
3.2.1 Elemente von Plant Simulation	27
3.2.2 Datentypen in SimTalk	28
4 Bestehendes Plant Simulation-Programm	30
4.1 Aufbau und Wirkweise	30
4.2 Potentielle Einflussgrößen und Wirkbereiche	34
4.3 Zielgrößen	35
5 Vorarbeit zur Generierung des Versuchsplans	36
5.1 Bewertung der Einflussgrößen	36
5.2 Niveaustufenzuordnung	41
5.3 Auswahl des Versuchsplans	46
6 Generierung und Anwendung des Versuchsplans	52
6.1 Grobplanung des Versuchsplans	52
6.2 Feinplanung des Versuchsplans	56
6.3 Auswertung	57
7 Zusammenfassung und Ausblick	63
Literaturverzeichnis	V
Anhang	VIII

Abkürzungsverzeichnis

BE	Bewegliches Element
GE	Gewichtseinheiten
OFAT	One Factor at a Time
VE	Volumeneinheiten

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Black Box-Schema	3
Abbildung 2.2: OFAT - Prinzip	7
Abbildung 2.3: DoE - Prinzip	8
Abbildung 2.4: Beispielversuchsplan und Erstellung	11
Abbildung 3.1: Arbeitsoberfläche bei Plant Simulation	26
Abbildung 4.1: Unterteiltes Plant Simulation-Modell	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Haupt- und Wechselwirkungen pro Faktoranzahl	14
Tabelle 2.2: Entstehung teilfaktorieller Versuchspläne	16
Tabelle 2.3: Auflösungstabelle	18
Tabelle 2.4: Plackett-Burman-Plan	20
Tabelle 3.1: Elemente in Plant Simulation	27
Tabelle 3.2: Datentypen in SimTalk	29
Tabelle 4.1: Potentielle Einflussfaktoren	34
Tabelle 5.1: Abhängigkeiten des Transportmittels nach Produktmenge	38
Tabelle 5.2: Einordnung der Einflussfaktoren	40
Tabelle 5.3: Niveaustufenzuordnung	44
Tabelle 5.4: Versuchsumfang bei vollfaktoriellen Versuchsplan	47
Tabelle 5.5: Aufspaltung eines achtstufigen Einflussfaktors	50
Tabelle 6.1: Auszug aus dem vollfaktoriellen Versuchsplan	54
Tabelle 6.2: Zuordnung der Wechselwirkungen	55
Tabelle 6.3: Stufen für Flugzeugtransport I	58
Tabelle 6.4: Messungen der Stufen für Flugzeugtransport I	59
Tabelle 6.5: Stufen für Flugzeugtransport II	60
Tabelle 6.6: Messungen der Stufen für Flugzeugtransport II	60
Tabelle 6.7: Stufen für Schiffstransport	61
Tabelle 6.8: Messungen der Stufen für Schiffstransport	62

1 Einleitung

Die globalisierte Marktwirtschaft strebt in allen industriellen Bereichen nach einer ständigen Optimierung. In aufwendigen Prozessen, wie in der Logistik ist es wirtschaftlich nicht immer möglich, Verbesserungen am realen System zu testen. Änderungen nach dem „Trail and Error“-Prinzip können Kapazitäten des Systems binden, so dass es zu wirtschaftlichen Verlusten kommen kann. Zur Lösung dieses Problems werden verschiedene Simulationsprogramme genutzt. Sie bilden reale oder geplante Strukturen bestehender oder zukünftiger Systeme nach und können deren Abläufe simulieren. Eines der gängigsten Simulationsprogramme für logistische Prozesse ist Tecnomatix Plant Simulation, welches auch für diese Thesis verwendet wird.

Trotz der Vorzüge der Simulation bedarf die Optimierung eines Prozesses, bei einer Vielzahl an Einflussparametern, einen großen Planungsaufwand. Statistische Planungsmethoden helfen, die benötigten Versuche zu koordinieren. Mittels gezielter Planung können die Versuche effizient geplant werden. So können Versuche mit redundanten Parametern bereits im Vorfeld vermieden werden.

Mittels DataFarming wird eine Datenmenge kultiviert. Aus einer großen Datenlandschaft können auch mehr Informationen gewonnen werden, die Versuchsplanung unterstützt bei deren Auswertung.

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption einer statistischen Versuchsplanung für ein gegebenes Data Farming-Simulationsmodell. Anhand der beeinflussbaren Einflussgrößen und der gesuchten Zielgrößen des gegebenen Modells soll eine geeignete Versuchsplanungsmethode ausgewählt und exemplarisch angewendet werden.

In dem ersten Teil dieser Bachelorthesis wird der Stand der Technik aufbereitet. Hier werden zunächst die statistischen Grundlagen erklärt, auf welche die späteren Kapitel aufbauen. Neben statistischen Grundbegriffen werden die geläufigsten Versuchsplanungsmethoden einleitend erläutert. Zusätzlich wird auf die anderen themengebenden Begrifflichkeiten, wie das Data Farming und das verwendete Programm Tecnomatix Plant Simulation eingegangen. Anschließend wird das gegebene Modell erläutert und bei Bedarf erweitert. In diesem Zusammenhang werden die Einfluss- und Zielgrößen für folgende Arbeitsschritte herausgefiltert. In dem folgenden Kapitel sollen anhand der gewonnenen Erkenntnisse die möglichen Versuchsplanungsmethoden auf ihre Tauglichkeit geprüft und die geeignetste Methode ausgewählt werden. Hierfür werden die zuvor bestimmten Parameter detaillierter analysiert, um ausgehend von ihren

Wertigkeiten und Abhängigkeiten einen entsprechend geeigneten Versuchsplan auswählen zu können. Diese gewählte Variante wird anschließend praktisch validiert. Dafür wird sie auf das gegebene Modell angewendet und die gewonnenen Ergebnisse dokumentiert. Von Interesse sind die Effekte der Eingangs- auf die Zielgrößen. Abschließend werden die Ergebnisse dieser Thesis zusammengefasst, zudem werden im Fazit zukünftige Einsatzmöglichkeiten überprüft.

2 Statistische Versuchsplanung

Kern dieser Arbeit ist die Entwicklung einer funktionierenden Versuchsplanungsvariante für ein gegebenes Supply Chain-Modell. Vorweg ist es notwendig, die statistischen Begrifflichkeiten zu erläutern, um das Prinzip der Versuchsplanung und deren verschiedenen Varianten beschreiben zu können. In diesem Kapitel werden sowohl die Begrifflichkeiten als auch die statistischen Grundlagen erklärt.

2.1 Statistische Grundbegriffe

Die statistische Versuchsplanung dient der Optimierung von Prozessen. Für das bessere Verständnis der folgenden Kapitel wird zunächst das benötigte Vokabular erläutert. Zu Gunsten der Übersicht empfiehlt es sich, hierbei zuerst die Begrifflichkeiten des Prozessaufbaus zu erklären. Anschließend werden dann die statistischen Grundlagen erläutert.

Die simpelste Visualisierung eines Prozesses ist die Darstellung als Black Box. Relevant sind Einfluss-, Stör- und Zielgrößen, die inneren Strukturen sind nebensächlich. Dieses Schema ist der Abbildung 2.1 dargestellt.

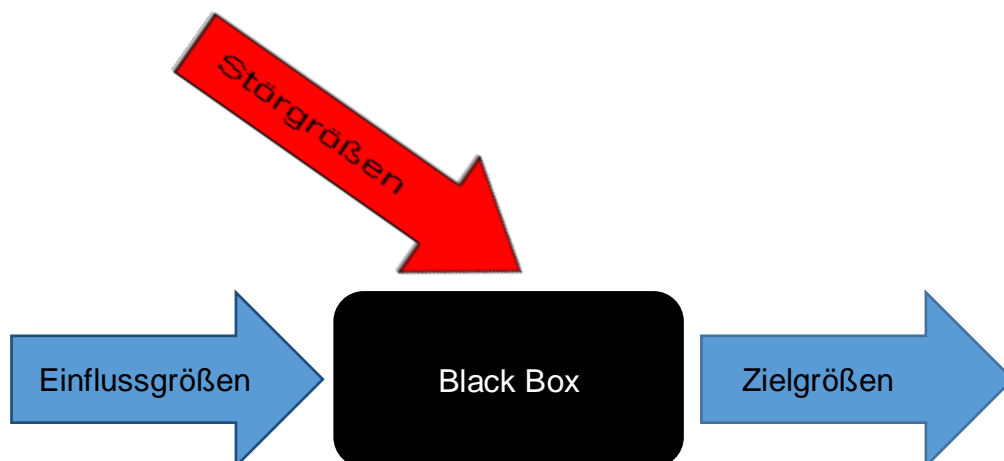


Abbildung 2.1: Black Box-Schema [HAC10]

Merkmal: Ein Merkmal ist eine für den Experimentator interessante Variable bei Untersuchungen. Merkmale gliedern sich in Einfluss- und Zielgrößen auf [SCH08].

Zielgrößen: Zielgrößen (Output) sind abhängige Variablen, welche die Resultate des Prozesses bzw. Versuches zeigen, die auf unterschiedliche Einflussgrößen verschieden reagieren. Je nach Zielgröße wirken Einflussfaktoren unterschiedlich stark, so dass deren Einflüsse analysiert werden muss. Zweck der Versuchsplanung ist es, Einflüsse auf Zielgrößen zu beschreiben oder diese zu optimieren. Messungen von Zielgrößen sollten getrennt erfolgen, und Verknüpfungen erst im Anschluss hergestellt werden. So wird der Verlust an Informationen gering gehalten, der mit Vereinigungen einhergeht [KLE13].

Einflussgrößen: Als Einflussgrößen (Input) werden alle Merkmale bezeichnet, welche potentiell auf Zielgrößen wirken. Sie gliedern sich in Steuer- und Störgrößen. Von beiden Varianten sind Steuergrößen einstellbar. Durch ihre Anpassung kann ein Prozess optimiert werden [KLE13].

Störgrößen: Störgrößen sind Einflussfaktoren, die einen optimalen Prozessvorgang stören. Es gibt zwei Varianten von Störgrößen [WEI13]:

- Unverzerrende Störgrößen werden im Versuchsplan nicht berücksichtigt, sie sind nicht einstellbar. Die Versuchsergebnisse streuen durch ihre Aufnahme zufallsbedingt. Sie sind nicht kontrollierbar.
- Die verzerrenden Störgrößen sind problematischer. Sie wirken nicht direkt auf eine Zielgröße, können aber als Einflussfaktor gewertet werden.

Versuch: Ein Versuch ist ein einzelnes Experiment zur Erfassung einer oder mehrerer Zielgrößen. Die wirkenden Einflussparameter sind dem Verwendungszweck entsprechend zu wählen.

Faktor: Da in einem realen Versuch unmöglich alle wirkenden Einflussgrößen berücksichtigt werden können, sind die wichtigsten auszuwählen. Die gewählten Einflussgrößen, welche in der Versuchsplanung gezielt angepasst werden, werden auch Faktoren genannt. Auf Grund ihrer ähnlichen Definitionen werden die Begriffe Faktor und Einflussgrößen häufig synonym verwendet. Faktoren sind jedoch spezifischer und

richten sich nach den relevanten Einflussgrößen. Wirklich synonym sind die Begriffe Parameter und Faktoren [KLE13].

Versuchsplan: In einem Versuchsplan wird vor Durchführung der Versuche die Zusammenstellung ihrer Parameter geplant. Dies verhindert redundanten oder irrelevanten Aufwand.

Merkmalsarten: Es wird zwischen zwei Arten von Merkmalen unterschieden. Als qualitativ werden Merkmale bezeichnet, die sich kategorisieren lassen, aber keine Rechenoperationen erlauben. Die qualitativen Merkmale können zusätzlich in zwei Gruppen unterteilt werden [AKK11]:

- Ordinal: Merkmale können in eine Reihenfolge gebracht werden.
- Nominal: Keine Stufung der Merkmale möglich.

Quantitative Merkmale erlauben grundlegende Rechenoperationen. Die betroffenen Merkmale lassen sich auf einer metrischen Skala anordnen.

- Metrisch diskret: Eine Skala ist metrisch diskret, wenn die Merkmale ausschließlich ganzzahlige Werte annehmen können.
- Metrisch stetig: Merkmale können auch Dezimalwerte annehmen.

Niveaustufe: Niveau- bzw. Faktorstufen sind gewählte Fixpunkte von Faktoren für einen statistischen Versuchsplan. Die Zuordnung der Stufen unterscheidet sich nach Faktoren. Für quantitative Faktoren sind dies meistens die jeweiligen Ränder des Grenzbereiches eines Faktors. Das Maximum des Faktors wird meistens mit einem Plusymbol in den jeweiligen Zellen der Versuchsplanung dargestellt. Entsprechend wird das Minimum durch ein Minussymbol eingetragen. Je nach Versuchsplan sind weitere Abstufungen möglich. Es kann z. B. eine weitere Stufe zwischen beiden Werten durch eine „0“ symbolisiert werden. Bei quantitativen Faktoren wird den Ausprägungen der Faktoren eine Stufe zu geordnet [GIE05].

Effekt: Effekte beschreiben den Einfluss von Faktoren auf die Zielgrößen. Die Berechnung wird im Kapitel 2.2.1 näher erläutert. Ein positiver Wert bedeutet einen fördernden Einfluss auf die Zielgröße, während ein negativer Wert eine Verringerung der Zielgröße bedeutet. Es gibt zwei Arten von Effekten [JON14]:

- **Haupteffekte:** Als Haupteffekte werden die separaten Effekte einzelner Faktoren bezeichnet, die auf die Zielgrößen wirken.
- **Wechselwirkungseffekte:** Wechselwirkungs- bzw. Interaktionseffekte bezeichnen den kombinierten Effekt einer Einflussgröße in Abhängigkeit mit einem oder mehrerer anderer Faktoren.

2.2 *Aufbau und Nutzen der Statistischen Versuchsplanung*

Statistische Versuchsplanung (englisch DoE = Design of Experiments) ist eine Methode zur Optimierung von bestehenden oder anlaufenden Prozessen und Produkten. Versuche aller Disziplinen veranschlagen pro Durchgang eine gewisse Zeitspanne, die mit steigenden Ausprägungen der einzelnen Parameter schnell unwirtschaftlich wird. Der Verzicht auf einige Versuchsdurchgänge aus zeitwirtschaftlichen Gründen kann zu einem Informationsverlust führen. Die statistische Versuchsplanung hilft bei dieser Problematik. Mittels systematischer Methoden, können die einzelnen Versuchsdurchgänge auf ein Minimum reduziert werden, ohne dass der Informationsgewinn abnimmt. Je nach gewähltem Versuchsplan kann die gewünschte Aussagekraft der einzelnen Haupteffekte und der verschiedenen Interaktionseffekte der Parameter, zugunsten weiterer zeitlicher Optimierungen angepasst werden. Die statistische Versuchsplanung bietet sich vor allem bei längerzyklischen Anwendungen wie bei biologischen oder fertigenden Prozessen an. Durch eine entsprechende vorangehende Planung bietet sie sich auch im Bereich der Simulationsverfahren an [RAS08].

Trotz genannter Vorteile findet die statistische Versuchsplanung in den simulativen Modellen selten Verwendung. Gängigere Anwendung findet ein einfaktorielles Verfahren (englisch: OFAT = One Factor at a Time). Dies ist ein alternatives Verfahren zur Prozessoptimierung. Pro Versuchsdurchgang wird einer der Einflussfaktoren verändert. Vorteil ist der genauere Fokus auf einen einzelnen Faktor, entsprechende

Änderungen auf die Zielgrößen können unkompliziert einem einzelnen Parameter zugeordnet werden [KOC10]. Nachteilig an dieser Variante sind neben der höheren Versuchsanzahl die fehlenden Erkenntnisse über die Interaktionszusammenhänge.

In der folgenden Abbildung 2.2 verdeutlicht eine schematische Darstellung den OFAT-Vorgang und zeigt dadurch auch seine Unzulänglichkeiten.

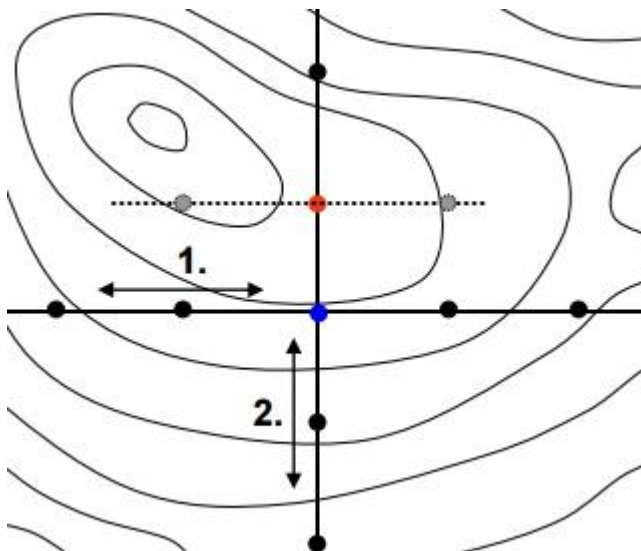


Abbildung 2.2: OFAT – Prinzip [FRA16]

Schema für OFAT:

Einzelne Faktoren werden sukzessiv angepasst bis sie jeweils ihr Optimum erreichen. Die verschiedenen Ausprägungen des Faktors 1. liegen auf der X - Achse, dessen stärkste Ausprägung wird im Ursprung (blauer Punkt) festgestellt und anschließend fixiert. Bei Anpassen des Faktors 2. wird das gemeinsame Optimum im roten Punkt festgestellt.

Wenn das Optimum bei einem der beiden grauen Punkte liegt, würde es nicht gefunden werden. Somit können keine Rückschlüsse auf Wechselwirkungen gezogen werden [FRA16].

2.3 Varianten der statistischen Versuchsplanung

Statistische Versuchsplanung ist der Überbegriff für eine Vielzahl an Methoden, um Versuche effizienter zu planen. Sie gliedern sich in Versuchspläne für einzelne Einflussfaktoren und Versuchspläne 1. Ordnung.

Die einzelnen Varianten funktionieren nach dem gleichen Grundschema. Im Folgen-

den wird dieses für den zweidimensionalen Fall erläutert, hier interagieren zwei Faktoren miteinander. Das Schema für Versuche in höherdimensionierten Fällen erfolgt nach gleichem Prinzip.

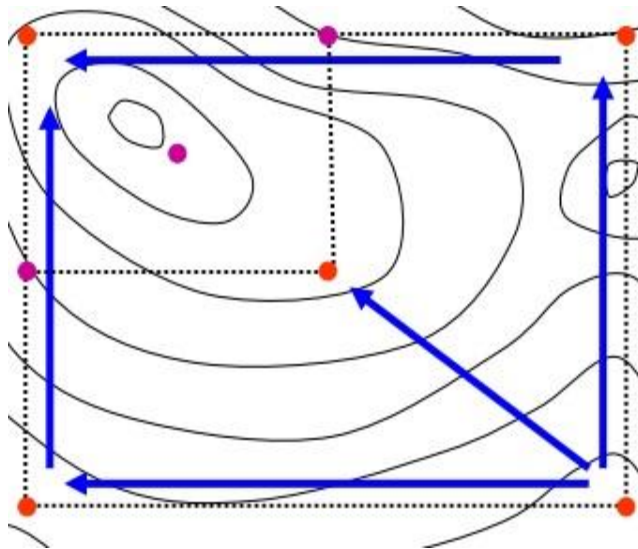


Abbildung 2.3: DoE - Prinzip [FRA16]

Schema für DoE:

Die beiden Faktoren liegen in je zwei Stufen vor. Sie spannen in der Horizontalen und Vertikalen ein Feld auf. Mit den berechneten Zielgrößen der Eckpunkte ist die Richtung bekannt, in welcher das Optimum liegt. In weiteren Schritten können so die Parameter optimal zusammengestellt werden [FRA16].

Versuchspläne für einzelne Einflussfaktoren

Die am häufigsten verwendeten Versuchspläne für einen einzelnen Faktor sind die vollständigen Zufallspläne. Ihr Vorteil liegt in ihrer problemlosen Anwendung. Sie beschreiben die Effekte auf eine Zielgröße, deren Ausprägungen den Versuchsplan aufspannen. Diese Variationen werden hierbei als Behandlungsverfahren bezeichnet. Die Elemente einer variablen Stichprobengröße werden den Behandlungsverfahren zufällig zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt gleichmäßig auf die Zielgrößen. Die Auswertung erfolgt durch eine Varianzanalyse:

$$x_{ij} = M + b_j + e_{ji}$$

Der Versuchswert „x“ hängt vom Gesamtmittelwert „M“, dem Faktoreinfluss „b_j“ und der Fehlerkomponente „e_{ji}“ ab. Diese Fehlerkomponente kann für jedes Element variieren, sie stellt eine Schätzung aller Einflüsse dar, die auf das betreffende Element wirken [BIL13].

Versuchspläne 1. Ordnung

Statistische Versuchspläne können aus einer Vielzahl an Einflussfaktoren, die Haupteffekte, die auf eine oder mehrere Zielgröße wirken filtern. Zusätzlich können Interaktionen erfasst werden. Im Gegensatz zu Versuchsplänen für einzelne Einflussfaktoren können lineare Zusammenhänge ermittelt werden [KLE14].

Vollständige 2^k -Faktorenversuchspläne

Vollständige Faktorenpläne bilden die gängigste Form der Versuchspläne 1. Ordnung. Allen Faktoren, welche Zielgrößen beeinflussen, wird entsprechend ihrer minimalen bzw. maximalen Ausprägung je einer Faktorstufe zugeordnet. Alle verschiedenen Faktorstufen werden so zusammengestellt, dass alle möglichen Kombinationen in einer Matrix zusammengefasst werden können.

Theoretisch ist es möglich, unbegrenzt viele Faktoren in einen einzelnen Versuchsplan einzubauen. Der praktischen Anwendung sind trotzdem Grenzen gesetzt. Mit zunehmenden Faktoren steigt die Anzahl der benötigten Versuchsreihen stark an. Die benötigten Versuche lassen sich durch eine unkomplizierte Formel berechnen:

$$n = m^k$$

Die Anzahl an Versuchen „n“ nimmt exponentiell mit einer steigenden Anzahl an verschiedenen Einflussgrößen „k“ zu. „m“ steht hierbei für die verschiedenen Niveaustufen der Parameter. Bei Versuchsplänen der 1. Ordnung werden lediglich zwei verschiedene Niveaustufen analysiert. Dies ermöglicht die Analyse von Wechsel- und Hauptwirkungen in lineare Zusammenhänge. Wechselwirkungen werden getrennt erfasst. Für die Erfassung nichtlinearer Zusammenhänge werden Versuchspläne höherer Ordnung benötigt. Den einzelnen Parametern müssen für den Fall mindestens drei Niveaustufen zugeordnet werden [GIE05]. Detailliertere Erklärungen werden in diesem Abschnitt an 2^k -Versuchsplänen erläutert.

Die vorherige Formel ergibt für einen Versuchsplan mit drei verschiedenen Einflussfaktoren, die je zwei Niveaustufen zugeordnet bekommen:

$$n = 2^3 = 8$$

Der Aufwand für eine Versuchsreihe ist mit drei Faktoren vergleichsweise überschaubar. Acht einzelne Versuche sind auch bei aufwändigeren Versuchen durchführbar. Das Hinzufügen eines weiteren Faktors erhöht die Gesamtzahl bereits auf $2^4 = 16$, und bei zwei zusätzlichen auf $2^5 = 32$. Zeit- oder kostenintensivere Prozesse sind ab einer bestimmten Faktorzahl nicht mehr produktiv. In kurzzyklischen Versuchsreihen, wie in Simulationsmodellen ist die Aufnahme noch weiterer Faktoren möglich, jedoch steigt auch hier der Aufwand drastisch an [GIE05].

In Abbildung 2.4 wird das Beispiel des 2^3 -Versuchsplans fortgeführt. Hierbei werden die einzelnen Bestandteile des Versuchsplans separiert dargestellt, so dass die Entstehung des Gesamtplans besser nachvollzogen werden kann [GUN04].

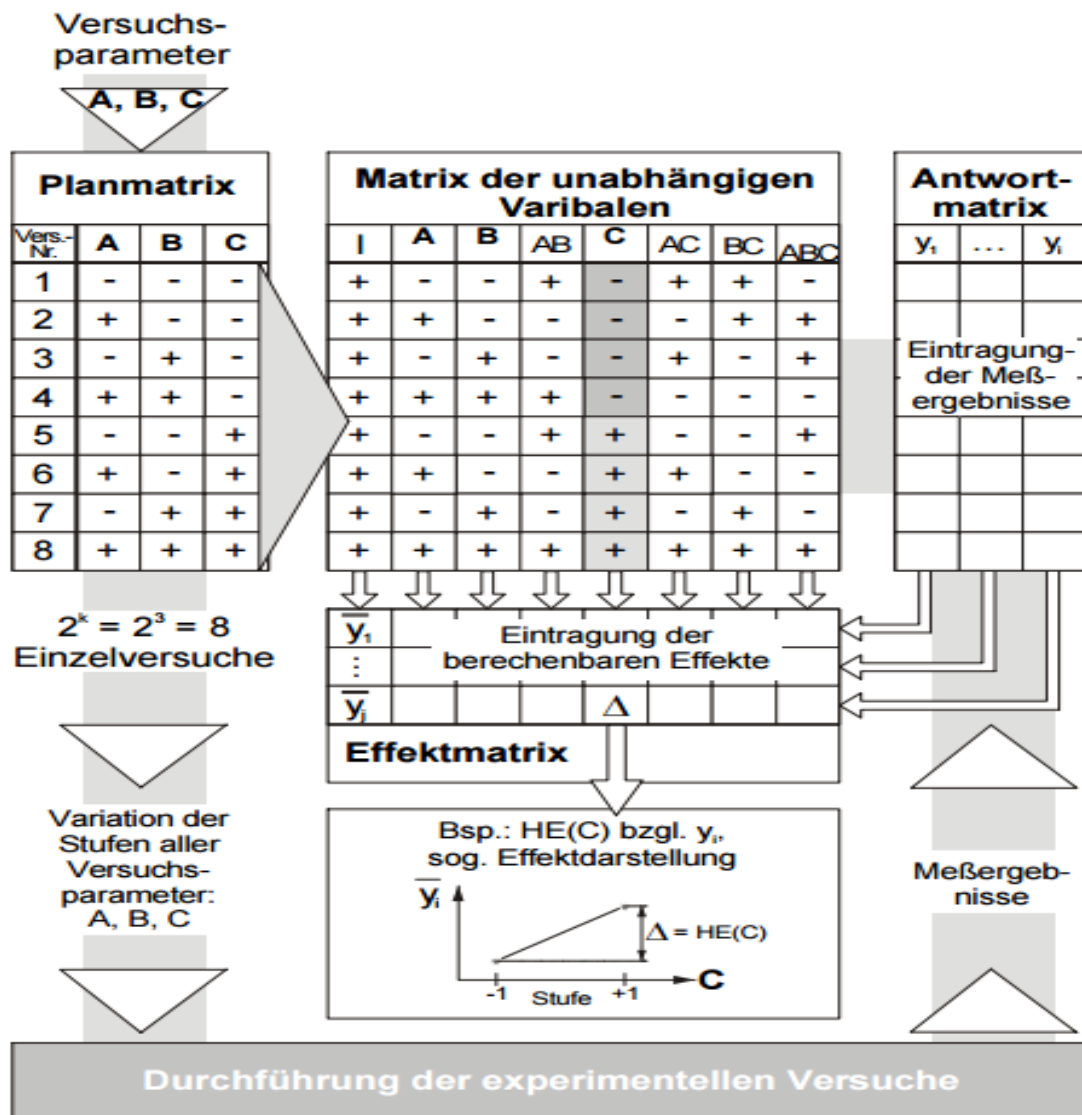


Abbildung 2.4: Beispielversuchsplan und Erstellung [GIE05]

In der Abbildung 2.4 dient die Planmatrix als Grundgerüst, des vollständigen Versuchsplans, weitere Matrizen werden zu dieser ergänzend hinzugefügt. Zusammen bilden sie den vollständigen Versuchsplan. Sie besteht aus den zuvor genannten Niveaustufen der Parameter. Die erste Zeile dient der Auflistung der betrachteten Einflussgrößen, für die jeweils ein Feld vorgesehen ist. In der ersten Spalte wird der Versuchsdurchgang durchgezählt.

Aus der Planmatrix kann die Matrix der unabhängigen Variablen gebildet werden. Diese besteht neben den identischen Spalten der Planmatrix aus zusätzlichen Spalten für Wechselwirkungen zwischen den Parametern. Während die Hauptwirkungen

aufeinander abgestimmt sind, so dass jede Niveauekombination überprüft wird, sind die Niveaustufen der Wechselwirkungen von den beteiligten Einflussgrößen abhängig. Die Multiplikation des einen Parameterwertes mit einem anderen beteiligten Wert ergibt den Eintrag der Wechselwirkung in derselben Zeile z. B. wenn der Faktor „A“ positiv dotiert ist, und der Faktor „B“ negativ, so ist der Eintrag der Wechselwirkung „AB“ ebenfalls negativ. Neben Zwei-Faktor-Wechselwirkungen korrelieren die Faktoren in allen möglichen Varianten untereinander. Die Anzahl der Wechselwirkungen ergibt sich durch die Formel [GUN04]:

$$\frac{k(k-1)(k-2)\dots(k-i+1)}{i!} = \binom{k}{i}$$

„k“ steht weiterhin für die Anzahl der beteiligten Einflussgrößen, „i“ steht für die jeweilige Wertigkeit der Wechselwirkung. Der beschriebene Fall der Wechselwirkung „AB“ wird bei „i = 2“ erfasst, ebenso werden die Interaktionen „AC“ und „CB“ aufgeführt. Zusätzlich bilden die drei Faktoren zusammen eine einzelne Drei-Faktor-Wechselwirkung „ABC“.

Die erste Spalte der Matrix der unabhängigen Variablen wird Identitätsspalte genannt. Sie wird durch Multiplikation einer Spalte mit sich selbst erzeugt. Diese Aussage ist für alle Spalten gültig. Da durch Eigenmultiplikation ausschließlich positive Werte entstehen sind die betreffende Spalte und deren Vorzeichen beliebig, so sind die Werte der Identitätsspalte stets positiv. Sie wird der Matrix beigefügt, um der Matrix eine quadratische Form geben zu können. Diese ist für die anschließende Versuchsauswertung erforderlich [WHI04].

Nachdem die Matrix generiert worden ist, können die entsprechenden Versuche durchgeführt werden. Die Werte der Zielgrößen werden in die Antwortmatrix eingetragen. Pro Zielgröße wird eine separate Spalte verwendet. Die Anzahl der Zielgrößen und so auch die Anzahl ihrer Spalten sind beliebig wählbar.

In der Effektmatrix werden die Einträge der Matrix der unabhängigen Variablen und der Antwortmatrix zusammengeführt. Deren Werte werden durch die folgende Formel berechnet [KLE13]:

$$E_{Faktor} = \frac{2}{n} \left(\sum y_{i+} - \sum y_{i-} \right)$$

Die Variable „n“ beschreibt weiterhin die Anzahl der Versuchsdurchgänge. Die beiden übrigen Variablen „ y_{i+} “ und „ y_{i-} “ stehen für die Wirkung eines Einflussfaktors bei einer Niveaustufe. Die Zielgrößen der Spalten der gleichen Niveaustufe des gleichen Faktors werden addiert und von der anderen Ausprägung abgezogen. Haupteffekte und Wechselwirkungseffekte werden nach analogem Schema behandelt. Die entsprechenden Werte geben jeweils die durchschnittliche Änderung der Zielgröße bei Wechsel der Niveaustufen des Faktors bzw. der Wechselwirkung an.

Optional können die einzelnen Faktoren in der Effektmatrix auf Signifikanz analysiert werden [GIE05]. Dies ist eine Untersuchung, ob ein Effekt zufällig oder signifikant ist. Der Test hat für diese Thesis keine Relevanz und wird an dieser Stelle nicht weiter thematisiert.

Teilfaktorielle Versuchspläne

Trotz ihrer Vorzüge gelangen vollfaktorielle Versuchspläne schnell an ihre Grenzen. Durch ihre exponentielle Ausdehnung sind sie ab einer bestimmten Anzahl an Faktoren schwer bis gar nicht mehr durchführbar. Entsprechende Versuchspläne müssen entsprechend verkleinert werden, um ihre Durchführbarkeit gewährleisten zu können, ohne dass die Aussagekraft vernachlässigt wird. Die gängigste Möglichkeit zur Modifizierung vollfaktorieller Versuchspläne ist die Verwendung teilfaktorieller Pläne [KLE13].

Bei steigender Faktoranzahl steigt die Anzahl der Mehr-Faktor-Wechselwirkungen deutlich schneller an als die der Haupt- und Zweifaktorwechselwirkungen. In der Tabelle 2.1 wird diese Diskrepanz dargestellt [GUN04].

k	2^k	Haupteffekte	Wechselwirkungen der Ordnung							
			1	2	3	4	5	6	7	
2	4	2	1	Physikalisch ohne Bedeutung						
3	8	3	3							
4	16	4	6	4	1	●				
5	32	5	10	10	5					
6	64	6	15	20	15	6	1			
7	128	7	21	35	35	21	7			
8	256	8	28	56	70	56	28	8	1	

Tabelle 2.1: Haupt- und Wechselwirkungen pro Faktoranzahl [GUN04]

Die Zusammensetzung für fünf Faktoren ist zur Verdeutlichung rot hervorgehoben. Versuchspläne mit vier oder weniger Faktoren sind bezüglich ihrer Wechselwirkungen verhältnismäßig unkompliziert durchführbar. Ab jenen fünf Faktoren übersteigt die Anzahl der Wechselwirkungen, an denen mindestens drei Faktoren involviert sind, die kombinierte Menge aus Haupt- und Wechselwirkungen erster Ordnung. Fünfzehn Haupt- und Zweifaktorwechselwirkungen stehen bei fünf Einflussfaktoren zehn Dreifaktor-, fünf Vierfaktor und einer Fünffaktorwechselbeziehung gegenüber. Je mehr Einflussparameter wirken, desto deutlicher verstärkt sich dieses Verhältnis. Mit steigender Faktoranzahl werden bei Viel-Faktor-Plänen größtenteils Zwischenbeziehungen, zwischen mehreren Einflussgrößen, untersucht.

Die teilfaktorische Versuchsplanung beruht auf dem Ansatz, dass mit steigender Anzahl beteiligter Faktoren, der betreffende Wechselwirkungseffekt abnimmt. Die Effekte von Zweifaktorwechselwirkungen sind verglichen mit denen reiner Hauptwirkungen deutlich geringer. Entsprechend schwächer sind Effekte von Wechselwirkungen dreifacher oder noch höherer Ordnung. Üblicherweise sind diese Effekte derart gering, dass sie

im Bereich der Streuung liegen und vernachlässigt werden können. Durch die fehlenden Wechselwirkungen wird der Versuchsplan entsprechend ungenauer [KLE13].

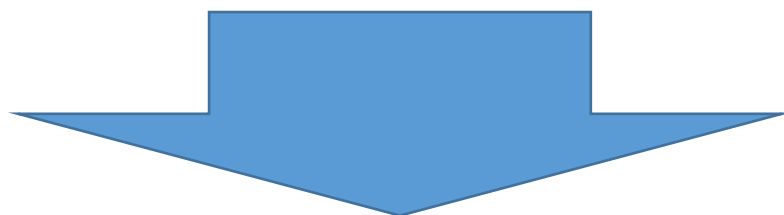
Nach demselben Prinzip, wie die vollfaktoriellen Versuchspläne auch als 2^k -Pläne betitelt werden, können die teilfaktoriellen Versuchspläne als 2^{k-p} -Pläne bezeichnet werden. „k“ beschreibt weiterhin die Anzahl der Einflussfaktoren. „p“ steht für additive Faktoren, die dem teilfaktoriellen Versuchsplan beigefügt werden. Die benötigte Versuchsanzahl ergibt sich aus der potenzierten Subtraktion beider Werte zur Basis. Die Anzahl der Versuche reduziert sich auf das $\frac{1}{2^p}$ -fache des zweistufigen Vollfaktorplans. Auf Kosten der Höher-Wertigen-Wechselwirkungen können so mehr Faktoren bei gleichbleibendem Versuchsaufwand analysiert werden. Zusätzlich werden Wechselwirkungen und Hauptfaktoren zusammengefasst, dadurch sind die Effekte den betreffenden Faktoren nicht mehr eindeutig zuzuordnen. Der berechnete Wert setzt sich aus beiden Einflüssen zusammen, der einzelne Einfluss der Faktoren ist nicht möglich zu bestimmen. Diese Problematik wird am deutlichsten bei der exemplarischen Betrachtung der Generierung eines teilfaktoriellen Versuchsplans. Am besten geeignet ist der 2^{4-1} -Plan. Der nächst kleinere Versuchsplan (2^{3-1}) ist für Erklärungen zu trivial. Da er lediglich eine einzelne Wechselwirkung besitzt, würde er weder die Vorzüge, noch die Nachteile verdeutlichen. Als Aufbau liegen drei Spalten vor, zwei Hauptfaktoren „A“ und „B“ sowie deren Wechselwirkung „AB“. Für die Kombination lässt sich der Faktor „C“ einsetzen. Entsprechende Effekte werden dann auf die Kombination „AB“ und den Einzelfaktor „C“ aufgeteilt [STA10].

In der Tabelle 2.2 wird die Entstehung eines teilfaktoriellen Versuchsplans an jenem 2^{4-1} -Plan ausführlich abgebildet.

Vollfaktorieller 2^3 Faktorenplan	Vers. Nr.	Matrix der unabhängigen Variablen							
		I	A	B	C	AB	AC	BC	AB C
	1	+	-	-	-	-	+	+	+
	2	+	+	-	-	-	-	+	+
	3	+	-	+	-	-	+	-	+
	4	+	+	+	-	-	-	-	+
	5	+	-	-	+	-	-	-	+
	6	+	+	-	+	-	+	-	+
	7	+	-	+	+	-	-	+	+
8	+	+	+	+	-	+	+	+	



Fraktioneller faktorieller 2^{4-1} Faktorplan	Nr	Matrix der unabhängigen Variablen															
		I	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	AB C	AB D	AC D	BC D	AB CD
	1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
	2	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
	3	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
	4	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
	5	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
	6	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
	7	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	



Vollfaktorischer 2^3 Faktorenplan	Vers. Nr.	Matrix der unabhängigen Variablen							
		I ABCD	A BCD	B ACD	C ABD	D ABC	AB CD	AC BD	AD BC
	1	+	-	-	-	-	+	+	+
2	+	+	-	-	-	-	+	+	
3	+	-	+	-	-	+	-	+	
4	+	+	+	-	-	-	-	+	
5	+	-	-	+	-	-	-	+	
6	+	+	-	+	-	+	-	+	
7	+	-	+	+	-	-	+	+	
8	+	+	+	+	-	+	+	+	

Tabelle 2.2: Entstehung teilfaktorierter Versuchspläne [GIE05]

Der oberste vollfaktorische Plan bildet den Ausgangszustand für den gewünschten Versuchsplan. In diesem Fall besteht die Matrix aus einem normalen 2^3 -Plan mit drei unterschiedlichen Faktoren „A“, „B“ und „C“ sowie deren Wechselwirkungen untereinander. Bei drei der vier Wechselwirkungen korrelieren zwei der beteiligten Faktoren, die letzte Wechselwirkung besteht aus allen Einflüssen der Hauptfaktoren. Ihre Bildung erfolgt standesgemäß durch Multiplikation der betreffenden Faktorstufen [GIE05].

Unter der Annahme, dass Drei- und Höher-Wertige-Wechselbeziehungen keine signifikanten Auswirkungen auf die Zielgröße haben, kann die vorhandene Drei-Faktor-Kombination „ABC“ durch einen weiteren Faktor ersetzt werden. In dem mittleren Versuchsplan wird an dieser Stelle der Faktor „D“ eingeführt. Der neue Versuchsplan ist durch diesen zusätzlichen Faktor für vier verschiedene Faktoren ausgelegt, bei Mitnahme der niedriger angesetzten Versuchsanzahl des 2^3 - Plans. Im nächsten Schritt wird der Versuchsplan weiter reduziert. Durch den zusätzlich eingefügten Faktor „D“, ergeben sich neue Wechselbeziehungen mit den anderen drei Faktoren. Das Hilfsmittel „D = ABC“ wird als Generator bezeichnet, er gibt die weiteren Verbindungen von Wechselwirkungen und Faktoren vor [LOR93]. Durch das Vergleichen der Niveaustufen von Haupt- und Wechselwirkungen fallen einige wertgleiche Spalten auf.

Diese Aliase können in einer Spalte zusammengefasst werden. Neben den Verknüpfungen zwischen den Zwei-Faktor-Wechselwirkungen „AB = CD“, „AC = BD“ und „AD = BC“ werden in diesem Beispiel jedem Hauptfaktor die Drei-Faktor-Wechselwirkung, welche ohne dessen Beteiligung gebildet wird, zugeordnet. Durch diese Zuordnungen ist eine eindeutige Auswertung bzw. Interpretation der Effekte nicht mehr möglich, da die kombinierten Einflüsse betrachtet werden [GIE05].

Die Pläne können durch den Grad ihrer Vermengungen unterschieden werden. Sie ordnen sich in einer von sechs Kategorien ein. Diese Kategorien werden Auflösung oder Resolution genannt. Ihre Angabe erfolgt in römischer Beschriftung, von I. bis VI. [KLE13].

		Anzahl der Faktoren										
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Anzahl Faktorstufenkombinationen	4	2^{3-1} III										
	8	2^3	2^{4-1} IV	2^{5-2} III	2^{6-3} III	2^{7-4} III						
	16		2^4	2^{5-1} V	2^{6-2} IV	2^{7-3} IV	2^{8-4} IV	2^{9-5} III	2^{10-6} III	2^{11-7} III	2^{12-8} III	2^{13-9} III
	32			2^5	2^{6-1} VI	2^{7-2} IV	2^{8-3} IV	2^{9-4} IV	2^{10-5} IV	2^{11-6} IV	2^{12-7} IV	2^{13-8} IV
	64				2^6	2^{7-1} VII	2^{8-2} V	2^{9-3} IV	2^{10-4} IV	2^{11-5} IV	2^{12-6} IV	2^{13-7} IV
	128					2^7	2^{7-1} VIII	2^{7-2} VI	2^{7-3} V	2^{7-4} V	2^{7-5} IV	2^{7-6} IV

Tabelle 2.3: Auflösungsstabelle [KLE13]

Die Abbildung 2.3 zeigt die tabellarische Zuordnung möglicher Versuchspläne in die entsprechenden Auflösungen. „m“ steht für die Anzahl an nötigen Versuchsgängen und „k“ für die betrachteten Faktoren. Vollfaktorielle Pläne liegen daher auf einer Diagonalen und sind farblich nicht unterlegt. Die Kategorien „I“ und „II“ finden praktisch kaum Anwendung und sind daher in der Tabelle auch nicht aufgeführt. Ebenfalls wird auf deren Beschreibung verzichtet. Die Resolutionen „III“ bis „VI“ sind farblich unterlegt und werden im Folgenden näher erläutert [CRO10]:

- **Auflösung III**

Die Haupteffekte überschneiden sich nicht mit anderen Haupteffekten, jedoch sind sie jeweils an einer Zwei-Faktor-Wechselwirkung gebunden. Diese Auflösung ist zu vermeiden, da Zwei-Faktor-Wechselwirkungen noch zu starke Auswirkungen auf Zielgrößen besitzen. In der Literatur werden betroffene Versuchspläne als kritisch bezeichnet, da die Gefahr von Falschinterpretationen hoch ist.

- **Auflösung IV**

Die Haupteffekte teilen sich weder mit anderen Haupteffekten noch mit Zwei-Faktor-Wechselwirkungen eine Spalte. Sie sind mit den Drei-Faktor-Wechselwirkungen verbunden. Einige Aliase werden durch Zwei-Faktor-Wechselwirkungen mit anderen Zwei-Faktor-Wechselwirkungen gebildet. Ihre Anwendung wird als unkritisch angesehen.

- **Auflösung V**

Weder Haupteffekte noch Zwei-Faktor-Wechselwirkungen bilden Aliase mit anderen Zwei-Faktor-Wechselwirkungen oder gar Haupteffekten auf. Die Zwei-Faktor-Wechselwirkungen sind mit den Drei-Faktor-Wechselwirkungen verbunden. Die Haupteffekte sind mit Vier-Faktor-Wechselwirkungen gekoppelt. Ihre Anwendung ist ebenfalls unkritisch.

Plackett-Burman-Methode:

Eine ebenfalls weit verbreitete Versuchsvariante ist die Methode nach Plackett-Burman. Sie dient hauptsächlich der Untersuchung von Systemen deren Einflussfaktoren zwei Einstellungen zulassen. Die Plackett-Burman-Methode ist von den teilfaktoriellen Versuchsplänen abgeleitet. Wie herkömmliche teilfaktorielle Pläne verwendet diese Methode vermengte Pläne. Der Unterschied besteht in der Belegung der einzelnen Spalten. Die Spalten der Plackett-Burman Versuchspläne sind hauptsächlich für Hauptfaktoren vorgesehen. Wechselwirkungen teilen sich auf die einzelnen Spalten auf. Bei schwacher Ausprägung verfälschen diese die Faktoren nicht, während starke Wechselwirkungen direkt mehrere Faktoren verfälschen können [BRU10].

Die Plackett-Burman-Methode erzeugt irreguläre Versuchspläne mit einer Auflösung dritter Stufe erzeugt. Irregulär bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Produkt je zweier Spalten ausschließlich zu diesen orthogonal ist. Die Haupteffekte sind mit Wechselwirkungen vermengt an denen sie nicht beteiligt sind. So würde die Zweifaktor-Wechselwirkung „AB“ in allen Faktoren außer „A“ und „B“ einfließen [SIE10].

Der Versuchsplan wird durch das zyklische Aufrücken der Niveaustufen um eine Spalte pro Zeile aufgebaut. Zum besseren Verständnis hilft die Tabelle 2.4, ein Ausschnitt eines Versuchsplans. Der vollständige Versuchsumfang würde sich über acht Zeilen erstrecken, zur Verdeutlichung des Schemas genügen die ersten drei Zeilen.

	A	B	C	D	E	F	G
y_1	+	-	-	+	-	+	+
y_2	+	+	-	-	+	-	+
y_3	+	+	+	-	-	+	-

Tabelle 2.4: Plackett-Burman-Plan [KLE13]

Auffällig ist das pro Zeile verschobene Muster. Die vorige Zeile rückt um einen Spaltenwert nach rechts auf. Der letzte Wert wird in der nächsten Zeile voran gestellt. Die Einträge der letzten Zeile, welche in dem Ausschnitt nicht gezeigt werden, bestehen vollständig aus negativen Ausprägungen. Neben achtstufigen Versuchsplänen sind Plackett-Burman-Pläne mit allen Faktorstufenkombinationen aus Vielfachen von Vier möglich. So können auch Versuche mit $n = 4, 8, 12$ usw. Durchgängen durchgeführt werden. Ausgehend von der Versuchsanzahl können $n-1$ Faktor analysiert werden. Oftmals werden eine bis drei Spalten ohne Werte in dem Versuchsplan mit aufgenommen [KLE13].

Taguchi - Methode:

Die Taguchi - Methode orientiert sich an der Versuchsplanung nach Plackett und Burman. Sie setzt die Fokussierung auf die Robustheit seiner Prozesse. Robustheit bedeutet in diesem Zusammenhang eine möglichst geringe Empfindlichkeit der Zielgrößen auf Schwankungen der Einflussfaktoren. Die Faktoren werden nach dieser Methode in orthogonale Felder eingetragen. Dabei wird zwischen zwei verschiedenen Arten von Faktoren unterschieden [LUN12]:

- Steuergrößen: Faktoren, die innerhalb ihrer Grenzen auf einen beliebigen Wert gestellt werden können.
- Störfaktoren: Faktoren, die zwar in experimentellen Versuchen verstellt werden können, aber in realen Prozessen aber kaum kontrollierbar sind

Die Steuergrößen sollen so gewählt werden, dass die Störfaktoren möglichst keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Zielgrößen ausüben. Der Taguchi-Versuchsplan setzt sich aus zwei einzelnen Versuchsplänen zusammen. Ein Plan wird aus den Steuergrößen zu einem teilfaktoriellen Versuchsplan erstellt. Der andere Plan ist ebenfalls ein teilfaktorieller Versuchsplan, er bildet sich aus den Störgrößen. Dessen Faktorkombinationen werden für jeden Versuchszusammenstellung der Steuergrößen überlagert. Über die gemessenen Zielgrößen können Abhängigkeiten festgestellt werden. Traditionell werden für die verschiedenen Niveaustufen Ziffern verwendet.

Versuchspläne nach Taguchi haben den Vorteil, dass sie wenige Versuche benötigen. Ihr geringer Aufwand geht zu Lasten der Genauigkeit. Die Pläne haben eine Auflösung der Stufe „III“. Sie lassen keine eindeutigen Aussagen über Wechselwirkungen zu. Insgesamt existieren 18 bekannte orthogonale Felder, in denen Einflussfaktoren nach der Taguchi - Methode eingesetzt werden können. Die meisten Felder sind für zwei-stufige Faktoren ausgelegt. Es existieren wenige Felder für höhere Stufen, maximal möglich sind Pläne mit bis zu fünf Stufen [KLE14].

3 Elemente der Simulation

Neben den statistischen Grundlagen dieser Thesis werden zusätzlich Informationen über den Anwendungsbereich benötigt. In diesem Kapitel werden die nötigen Grundlagen für das Verständnis des gegebenen Simulationsmodells erläutert. Unterteilt wird dieses Kapitel in zwei Abschnitte. Der erste Part behandelt das Data Farming im Allgemeinen, während der zweite Part sich spezifisch auf das Modell bezieht.

Vor tiefgehenden Betrachtungen empfiehlt es sich, den Simulationsbegriff von seinen Unterthemen abzugrenzen. Nach der VDI 3633 ist eine Simulation das Nachbilden eines Systems inklusive seiner dynamischen Prozesse, durch ein entsprechendes Model, um an Erkenntnisse zu gelangen, welche auf die realen Strukturen übertragbar sind.

3.1 *Data Farming*

Die einzelnen Parameter der statistischen Versuchsplanung werden durch das Data Farming (deutsch: Daten-Anbau) bestimmt. Dessen Funktion lässt sich aus den beiden Worten des zusammengesetzten Begriffes ableiten. Der Begriff der Daten wird in der DIN 44300 wie folgt definiert:

„Gebilde aus Zeichen oder kontinuierliche Funktionen, die aufgrund bekannter oder unterstellter Abmachungen Information darstellen, vorrangig zum Zwecke der Verarbeitung und als deren Ergebnis.“

Der nachstehende Begriff des Farmings ist assoziativ angelehnt an das Anbauen oder das Kultivieren von Nutzpflanzen. Wie in seinem gleichnamigen Pendant gilt es, die Maximierung des jeweiligen Outputs anzustreben. Beim traditionellen Anbau soll der Ertrag maximiert werden durch Manipulation der Umwelt. Im Data Farming sollen Daten so kultiviert werden, dass diese ebenfalls mit maximaler Ausbeute geerntet werden könnten. Die entsprechenden Manipulationen erfolgen am Simulationsmodell, welches als Versuchsumgebung dient [RAB15].

Data Farming ist ein junger Ansatz. Entwickelt wurde es für militärische Zwecke, erste

Ansätze entstanden im Sommer 1996. Das Defense Science Board, eine US-militärische Einrichtung, empfahl einige grundlegende Änderungen ihrer damaligen Analysemethoden. Diese Eindrücke teilte das Marine Corps. Im Jahre 1998 erkannte deren damaliger General Charles Krulak, dass die verwendeten Kampf- und Simulationsverfahren unfähig waren, viele der zeitgenössischen Vorgänge nachzubilden. Dieses Erkenntnis führte zur Entwicklung von neueren Methoden, die traditionellere Methoden bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit übersteigen. Diese wurden in einem Modell namens ISAAC zusammengeführt, zusätzlich wurde das Konzept des Data Farmings eingeführt [HOR04].

Horne und Brandstein haben 1998 für das ISAAC-Modell vier einzelne Komponenten definiert, welche zusätzlich den Ablauf des Data Farmings darstellen. Für sie war es von Bedeutung, dass diese Komponenten nicht als Schritte aufgefasst werden. Nach ihrer Auffassung würde der Begriff „Schritte“ nicht die Verflechtungen untereinander darstellen. Die einzelnen Glieder lauten:

- **Düngen:** Expertenmeinungen einholen, welche relevanten Aspekte innerhalb eines Konfliktes in der Vergangenheit mangelhaft erfasst worden sind, wie z. B. Moralvorstellungen, Führungsqualitäten oder Anpassungsfähigkeit.
- **Kultivieren:** Durch Expertise bedeutsame Einflüsse für bestimmte Situationen raussuchen.
- **Pflanzen:** Gewonnene Ideen, in Modelle einsetzen und bei Parametervariation Modelle starten.
- **Ernten:** Ernten des Datenoutputs durch Verwendung von Techniken zum Verständnis wissenschaftlicher Daten.

Für sie dient Data Farming dem Befriedigen des Wunsches nach Antworten. Alleine liefert Data Farming diese aber nicht. Es bereitet die Datenlandschaft lediglich vor, für deren Analyse werden weiterführende Techniken, z. B. Data Mining verwendet [HOR97].

Der Vorteil liegt in dessen Fähigkeit, Modelle schnell zu erstellen, diese durchzuführen und entsprechend interpretieren zu können [BAR04].

Susan M. Sanchez hat 2014 drei F's des Data Farmings definiert:

- **Factors:** Hiermit sind die verschiedenen Einflussfaktoren gemeint, die auf das Modell wirken. Deren Variation ändert das Systemverhalten.
- **Features:** hierbei sind die simulatoneigenen Rückmeldungen gemeint. Neben offensichtlichen Meldungen die sich z. B. auf Minima, Maxima oder auch auf Wendepunkte beziehen können. Können auch Schwellpunkte vorkommen, dies sind Parametervariationen ab denen sich die Systemoutputs ändern. Beispielsweise der Punkt ab dem sich das System von einer Niederlage zu einem Sieg ändert.
- **Flexibility:** Flexibilität bezieht sich auf den Nutzen des Data Farmings. Durch weitere Durchläufe ist es möglich Fragen, welche zu Beginn noch nicht feststanden, nachträglich noch zu beantworten. Dafür ist es notwendig, dass Konstruktionspunkte gespeichert und Zufallszahlen erhoben werden. Dadurch kann die Simulation nachgebildet werden.

3.2 *Plant Simulation*

Die zu analysierenden Prozesse dieser Thesis werden mit dem Simulationsprogramm Tecnomatix Plant Simulation der Firma Siemens durchgeführt. Mittels einer großen Auswahl an Bausteinen können verschiedenste Materialfluss- oder Produktionsprozesse visualisiert werden. Auf Grund der Übersichtlichkeit der Modelle und der intuitiven Nutzung, wird das Programm in vielen Unternehmen verwendet. Als Vorbereitung, damit auf das vorbereitete Modell eingegangen werden kann, werden im Folgenden die Grundlagen des Simulationstools erklärt [ELE12].

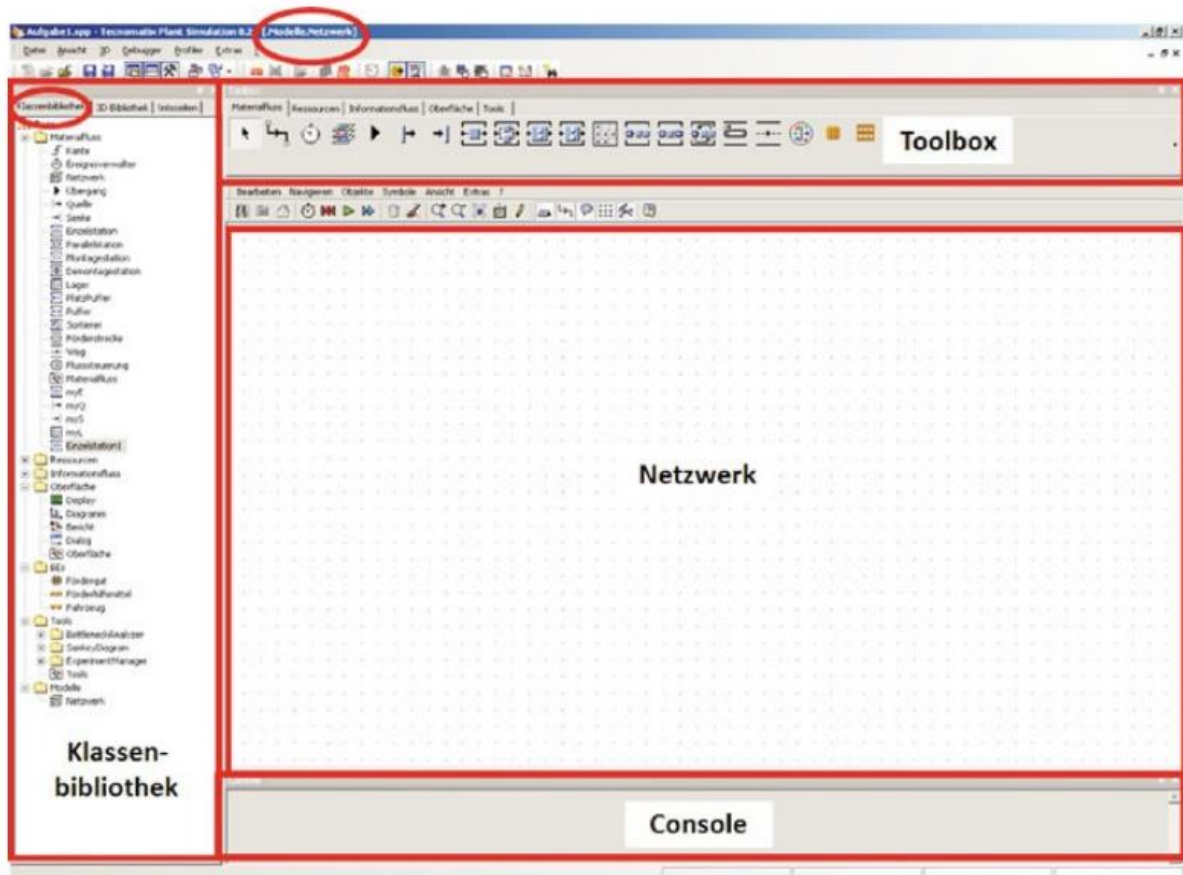



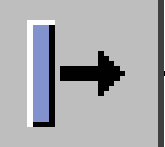
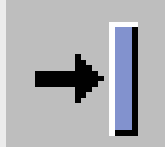
Abbildung 3.1: Arbeitsoberfläche bei Plant Simulation [ELE12]

In der Abbildung 3.1 wird die Arbeitsoberfläche von Plant Simulation dargestellt. Sie wird auch als TUNE-Fenster bezeichnet. Die wichtigsten Bereiche der Arbeitsoberfläche sind mit rot umrandeten Feldern markiert. Am linken Rand des TUNE-Fensters befindet sich die Klassenbibliothek. Sie umfasst die einzelnen Bausteine zur Erstellung eines Simulationsmodells. Die Bausteine liegen in den Gruppen Materialfluss, Flüssigkeiten, Ressourcen, Informationsfluss, Oberfläche, BEs (Bewegliche Elemente), Tools und Modelle vor. Je nach Anwendungszweck können diese aus ihren Gruppen ausgewählt oder auch individuell angepasst werden. Die Toolbox im oberen Drittel des Programms listet alle verfügbaren Elemente auf. Im Vergleich zu der Auswahl über die Klassenbibliothek können die benötigten Elemente schneller in das Modell übertragen werden. Die zuvor aufgelisteten Gruppen befinden sich in den Registerklassen über der Symbolleiste. Zusätzlich können eigene Elemente in die leiste implementiert werden. Die unten angelegte Konsole liefert Informationen während des Simulationsprozesses. Sie zeigt z. B. Fehlermeldungen in

dem Prozessablauf an [BAN10]. Im mittigen Fenster befindet sich das Netzwerk. In diesem Fenster werden die benötigten Elemente eingefügt. Dazu werden diese wahlweise aus der Klassenbibliothek oder der Toolbox auf das Netzwerkfenster gezogen. Während der Ausführung der Simulation werden entsprechende Bewegungen hier angezeigt. Zum Ablauf der Simulation wird ein Ergebnisverwalter benötigt, dieser befindet sich im Netzwerk, oder kann aus der Toolbox hinzugefügt werden. Er dient der zeitlichen Steuerung des Modells. Mit ihm kann die Geschwindigkeit der Simulation sowie der Start- und Endzeitpunkt eingestellt werden [ELE12].

3.2.1 Elemente von Plant Simulation

In der Tabelle 3.2 werden die für diese Arbeit relevanten Elemente mit einer kurzen Erklärung aufgeführt.

Name	Funktion	Symbol
BE (Bewegliches Element)	Bilden Objekte wie Werkstücke oder Transportbehälter ab. Es kann produziert, bearbeitet oder transportiert werden.	
Quelle	Aufkommen von BE's. Quellen produzieren Güter häufig nach Auftragsliste.	
Senke	Vernichtet einzelne BE's. Stellt in Simulationsmodellen Warenausgang dar.	

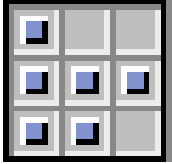

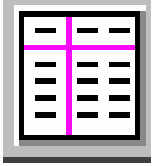

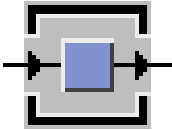
Lager	Zwischenlagert BE bis nachfolgendes Objekt frei wird oder bis Grenze erreicht wird.	
Methode	Mittels einer Methode kann eine Steuerung erstellt werden, welche andere Elemente beeinflusst. Methoden werden in SimTalk geschrieben.	
Tabelle	Tabellen bestehen aus mehreren Spalten, deren Werte wahlweise aus Methoden erzeugt oder eingelesen werden können.	
Kante	Verbindung zwischen zwei Elementen innerhalb eines Netzwerks. Die Fließrichtung wird per Pfeil angegeben. Können auch auf unsichtbar eingestellt werden.	
Einzelstation	Nimmt ein BE auf und gibt es nach Bearbeiten und Rüsten an nächstes Objekt weiter.	

Tabelle 3.1: Elemente in Plant Simulation [ELE12]

3.2.2 Datentypen in SimTalk

Das Plant Simulation Objekt „Methode“ wird in der Programmiersprache SimTalk geschrieben, in ihr können verschiedene Ausführungsanweisungen programmiert werden. Die verwendeten Datentypen von SimTalk gleichen den Datentypen der gängigsten Programmiersprachen. Tabellarisch werden sie in 3.2 aufgelistet.

Datentyp	Verwendung	Definitionsbereich / Bemerkung
Integer	Ganzzahlige Werte	$-2\,147\,483\,648 \leq integer \leq 2\,147\,483\,647$
Boolean	Boolsche Variablen	true / false
Real	Gleitkommazahlen	$-8.9 * 10\,307 \leq real \leq 8.9 * 10\,307$
Time	Zeiten	Angabe in Sekunden
Date	Datumsangaben	Datum zwischen 1.1.1970 und 31.12.9999
Datetime	Datums- und Zeitangaben	Datum zwischen 1.1.1970 0:00:00 und 31.12.9999 23:59:59 Uhr
String	Zeichenketten	Buchstaben $\{a..z, A..Z\}$, Ziffern $\{0..9\}$ und Sonderzeichen

Tabelle 3.2: Datentypen in SimTalk [ELE12]

4 Bestehendes Plant Simulation-Programm

Das bereits existierende Plant Simulation-Modell simuliert den logistischen Transport von mehreren Produkten verschiedener Lieferanten zu ihren Zielpositionen. In diesem Kapitel werden die einzelnen Bestandteile dieses Modells näher betrachtet. Zusätzlich zur Wirkweise der einzelnen Objekte werden die Verknüpfungen untereinander erklärt. Hinsichtlich zur Generierung des statistischen Versuchsplans werden die zugehörigen Einflussgrößen und die resultierenden Zielgrößen erfasst. Diese werden außerdem jeweils auf ihre Spannbreite analysiert.

4.1 *Aufbau und Wirkweise*

Für eine bessere Übersicht empfiehlt es sich, das vorliegende Modell in einzelne Segmente aufzugliedern. Das Modell lässt sich inhaltlich in vier Bereiche unterteilen. Diese Bereiche unterscheiden sich sowohl in ihren verwendeten Objekten, als auch bezüglich Komplexität und Wirkungsweise ihrer Strukturen. Das Modell mit den abgegrenzten Bereichen wird in der Abbildung 4.1 aufgeführt. Die roten Trennlinien teilen die einzelnen Segmente auf.

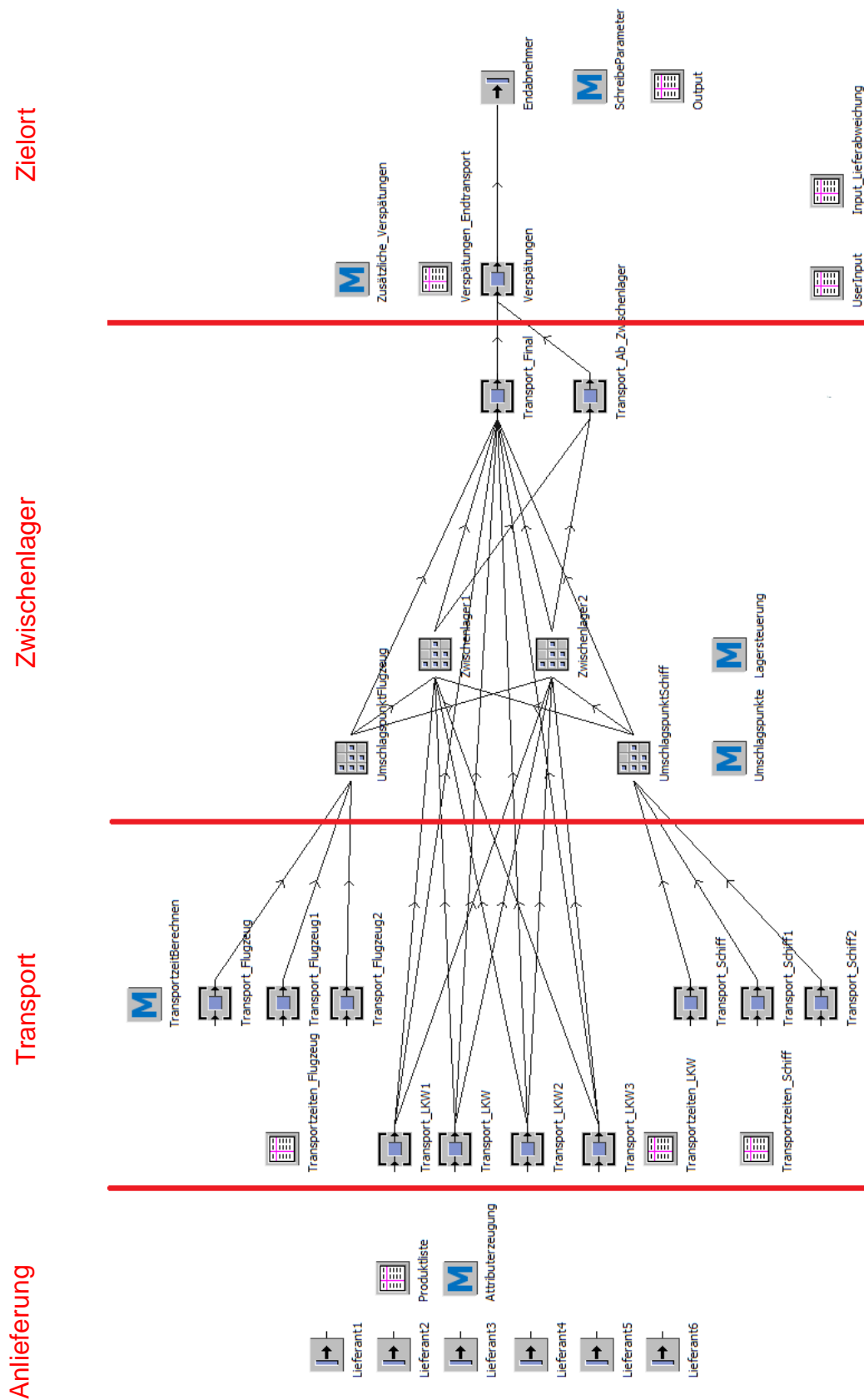


Abbildung 4.1: Unterteiltes Plant Simulation-Modell

Anlieferung: Ausgangspunkt des Modells ist der Anlieferungsbereich. Er besteht aus sechs Quellen, welche jeweils einen Lieferanten darstellen. Die Quellen generieren BE's, welche die betrachteten Produkte darstellen. Da die vorgelagerten Prozesse, wie Fertigung oder weitere logistische Transporte, für das Modell irrelevant sind, genügt die Darstellung der Lieferanten als Quellen. Die BE's sind erst ab ihrem Vorliegen bei einem Lieferanten von Bedeutung. Bei jedem Zuliefern sind die Zeilen für Abstand und Start vorgegeben. Für die Erzeugungszeiten sind bei allen Quellen die entsprechenden Intervallgrenzen angegeben. Alle Zulieferer sind anderen Zeiten zur Erzeugung zugeordnet, sie sind alle normalverteilt. Die Quellen werden über die Methode „Attributerzeugung“ gesteuert. Unter anderem greift die Methode die Einträge der Tabellen „Produktliste“ und „UserInput“ auf und weist sie den jeweiligen Lieferanten zu. Das Element „Produktliste“ beinhaltet die möglichen Produktvariationen mit ihren grundlegenden Eigenschaften. Sie umfassen Gewicht, Volumen, Höchst- und Mindestbestellmenge. Zusätzlich wird über eine Boolesche Variable angegeben, welcher Lieferant welches Produkt anbietet. Die Methode bestimmt einen Zufallswert zwischen der minimalen und der maximalen Bestellmenge aus den Werten der „Produktliste“ und verknüpft diese mit einem zufälligen Zielort zwischen 1 und 20. Durch die Methode werden das Gesamtgewicht und das Volumen der Bestellung errechnet. Die ausgehende Transportart hängt von deren hochgerechneten Werten von Gewicht und Volumen ab.

Transport: Die verschiedenen Lieferungen verteilen sich auf drei verschiedene Transportmittel. Sie werden von den Lieferanten auf die Fördermittel entsendet. Ausgehenden Verbindungslinien der Quellen, welche zu den einzelnen Transportstationen führen, sind für die Übersicht transparent gehalten. Jedes Transportmittel ist im Modell als Einzelstation dargestellt. Lieferanten können je nach Bestellung auf das benötigte Transportmittel zugreifen. Die zuvor beschriebene Methode verteilt diese auf die drei Möglichkeiten:

- **Schiffstransport:** Große Lieferungen ab einem Gewicht von 1 500 GE oder einem Volumen ab 1 000 VE, werden per Schiffstransport versendet. Insgesamt liegen drei Schiffe zur Beladung vor.

- **Straßentransport:** Mittelgroße Lieferungen mit einem Gewicht zwischen 500 GE und 1 500 GE bzw. einem Volumen zwischen 1000 VE und 500 VE werden mit einem von vier LKWs versendet.
- **Luftfracht:** Kleine Lieferungen unter einem Gewicht von 500 GE oder unter einem Volumen von 500 VE werden mit einem von zwei Flugzeugen verschickt.

Die jeweiligen Transportzeiten sind in einer eigens für ein Transportmittel definierten Tabelle mit der Zuordnung Zeit und Häufigkeit hinterlegt. Die Einzelstationen greifen bei der Bearbeitung auf diese zurück:

Zwischenlager: Die per Luft- oder Schiffsfracht transportierten Lieferungen werden zu einem Umschlagspunkt gebracht. Nach einer festgelegten Mindestwartezeit werden diese weiter transportiert. Wenn der letzte Sammelpunkt „Transport_Final“ der Lagerkette nicht belegt ist, werden die Güter zu diesem transportiert. Andernfalls dienen zwei Zwischenlager als mögliche Puffer. Produkte die per LKW transportiert werden übergehen den Umschlagspunkt. Sollte das Element „Transport_Final“ bei Auslagerung der Zwischenlager belegt sein, werden die Güter zu dem Element „Transport_Ab_Zwischenlager“ geliefert.

Zielort: Die anschließenden Transportwege von „Transport_Final“ und „Transport_Ab_Zwischenlager“ verbinden sich in Richtung der Einzelstation „Verspätungen“. Nach dem gleichen Prinzip, wie bei den zugeordneten Transportzeiten, weist eine Liste Zeiten und deren Häufigkeiten dem Element zu. Nach zufälliger Zuordnung einer Verspätung werden die BEs zu der Senke „Endabnehmer“ geleitet. Die Methode „SchreibeParameter“ steuert die Tabelle „Output“ anhand welcher Lieferdaten ausgelesen werden können.

4.2 Potentielle Einflussgrößen und Wirkbereiche

Auf den Prozess wirken mehrere Einflussgrößen. Die wesentlichen Prozessgrößen sind die Produkteigenschaften, die den Transportprozess beeinflussen. Die Produkteigenschaften gliedern sich in die jeweilige Bestellmenge, sowie Gewicht und Volumen. Die Werte sind für jedes Produkt einzeln festgelegt. Zusätzlich wirken der zugehörige Zulieferer und auftretende Verspätungen auf den Prozess ein.

Einflussfaktor	Produkt	
Produktbedingt		
ProduktID	1	2
Gewicht	10	100
Volumen	20	80
Bestellmenge	100 - 200	1 - 10
Lieferanten	4 - 6	1 - 6
Zwischenlager	Ja/Nein	
Transport_Final	Ja/Nein	
Zielort	1 - 20	
Transportbedingt		
LKW	1 - 8	
Flugzeug	1 - 6	
Schiff	1 - 8	
Verspätungen Endtransport	1 - 7	

Tabelle 4.1: Potentielle Einflussfaktoren

4.3 Zielgrößen

Im Vergleich zu der großen Menge an möglichen Einflussparametern ist die Anzahl der Zielgrößen überschaubar. In den meisten logistischen Prozessen liegt das Hauptaugenmerk auf einer möglichst geringen Lieferzeit. So wird das gegebene Modell ebenfalls nach seinem durchschnittlichen Zeitbedarf einer Lieferung analysiert. Berücksichtigt wird dabei die Zeitspanne zwischen Bearbeitung des Lieferanten bis zum Empfänger der Ware. Durch Kombinationen der gelisteten Einflussparameter sollen Abhängigkeiten erkennbar gemacht werden.

5 Vorarbeit zur Generierung des Versuchsplans

Dieses Kapitel behandelt den ersten praktischen Anteil dieser Bachelorthesis. Es werden im Folgenden die einzelnen Parameter zur Generierung eines statistischen Versuchsplans erörtert. Hierzu werden die im vorherigen Kapitel gelisteten potentiellen Einfluss- und Zielgrößen beschrieben und auf ihre Tauglichkeit für ihre Verwendung in einer entsprechenden Versuchsplanung analysiert. Zusätzlich werden diesen Größen entsprechend ihrer Ausprägungen Niveaustufen zugeordnet. Anschließend kann aus diesen Erkenntnissen ein Versuchsplan erstellt werden.

5.1 *Bewertung der Einflussgrößen*

Die in 4.2 gelisteten Einflussgrößen eignen sich nicht alle für die Verwendung in einem statistischen Versuchsplan. Die für einen Versuchsplan relevanten Einflussgrößen unterteilen sich, wie zuvor beschrieben, in Steuer- und Störgrößen. Die potentiellen Einflussgrößen sind noch nicht näher sortiert. Sie müssen vor ihrer Einbeziehung in einem Versuchsplan den Gruppen zugeordnet werden. Manche der möglichen Einflussgrößen sind nicht direkt einem der beiden Bereiche zuzuordnen. Einige Merkmale fallen aus dieser Zuordnung heraus, diese unterscheiden sich nochmals in offensichtlich irrelevante Einflussgrößen und in passive Einflussgrößen. Erstere vergrößern den Versuchsaufwand unnötig. Da ihre Betrachtung keine Erkenntnis bringt, werden sie nicht analysiert. Ebenfalls werden passive Einflussgrößen nicht berücksichtigt. Sie beeinflussen Zielgrößen schwach oder indirekt. Passive Einflussgrößen werden selbst von einer anderen Einflussgröße beeinflusst. Sie wirken daher reaktiv und wirken so auf den Gesamtprozess höchstens indirekt. Passive Einflussfaktoren werden daher nicht gesondert betrachtet und werden so nicht im Versuchsplan analysiert. Im Gegensatz zu den passiven wirken aktive Einflussgrößen, direkt auf die Zielgrößen.

Die in Versuchsplänen implizierten Einflussgrößen bestehen normalerweise zum größten Teil aus Steuergrößen. Sie füllen die einzelnen Spalten des Versuchsplans. Steuergrößen sind alle von dem jeweiligen Experimentator beeinflussbar. Innerhalb ihrer Grenzen können sie beliebig gewählt werden. Steuergrößen sind stabil und werden im Versuchsplan betrachtet, während Störgrößen möglicherweise durch Optimierung ausgeschlossen werden können. Die auftretenden Störgrößen wirken sich

unkontrolliert auf die Zielgrößen aus. Sie sind für die Versuchsplanung möglichst konstant zu halten, um die Messergebnisse nicht zu verfälschen. Nach diesen Gesichtspunkten wird der besagte Plan erzeugt.

Der logischen Reihenfolge nach erfolgt zuerst die Betrachtung der einzelnen Produkte. Die Auswahl zwischen einem der möglichen Produkte ist eine Steuergröße. In der aktuellen Version des Plant Simulation Modells besteht die Produktauswahl aus lediglich zwei Varianten, zwischen denen gewählt werden kann. Der entsprechende Versuchsplan lässt sich aber für zusätzliche Produkte zukünftig erweitern. Das betroffene Modell ändert sich dadurch nicht, die betroffenen Bausteine passen sich entsprechend an. Abhängig von dem Produkt werden die entsprechenden Werte für Gewicht und Volumen übernommen. Sie sind auf ein Produkt zugeschnitten und können nicht einzeln variiert werden. Der Einfluss der beiden Merkmale erfolgt passiv durch die Betrachtung weiterer Parameter. Sie haben keinen direkten Einfluss auf Verzögerungen oder andere Prozesseigenschaften. Die beiden Produkteigenschaften werden selber nicht in den Versuchsplan integriert, sie fließen in der Produktauswahl und der Liefermenge mit ein. Die Mengenangabe ist eine weitere Steuergröße. Sie variiert für jedes mögliche Produkt innerhalb festgestellter Grenzen. Deren Wertigkeit beeinflusst das zugewiesene Transportmittel, auf dem die Lieferanten ihre Produkte versenden. Die einzelnen Fördermittel transportieren ihre Lieferungen innerhalb bestimmter Grenzen. Ab einer bestimmten Liefermenge übersteigt entweder das Volumen, oder das Gewicht einer Ladung das vorgegebene Limit eines Transportmittels. Die Zuweisung des Transportmittels erfolgt daher auch passiv. Es kann manuell nicht direkt ausgewählt werden, welches Transportmittel liefert. Eine indirekte Bestimmung kann jedoch durch die beordnete Menge erzielt werden.

Die nachfolgende Tabelle 5.1 zeigt die Abhängigkeit der Transportmittel von der Anzahl beider Produkte. Lieferungen unter 500 GE oder 500 VE werden mit dem Flugzeug transportiert und werden daher nicht in einer separaten Zeile in der Tabelle beschrieben.

	Mindestgewicht	Ab Anzahl Produkt „a“	Ab Anzahl Produkt „b“
Straßentransport	500 GE	50	5
	500 VE	25	7
Schiffstransport	1 500 GE	150	15
	1 000 VE	50	13

Tabelle 5.1: Abhängigkeiten des Transportmittels nach Produktmenge

Da die Mindestbestellmenge des Produktes „a“ bei 100 Stück liegt, mit je einem Volumen von 20 VE, aber eine Lieferung ab 1 000 VE bereits zwingend einen Wassertransport bedarf, wird jede Lieferung der Produktes „a“ per Schiff entsendet. Lieferungen aus Produkten der Klasse „b“ werden per Straßen- oder Lufttransport verschickt. Erst ab einer Menge von 13 Stück würden sie per Schifftransport versendet werden. Die vorgegebene Bestellmenge erlaubt jedoch maximal 10 Stück, ein Schifftransport ist folglich nicht möglich.

Eine weitere Steuergröße ist die Auswahl des jeweiligen Zulieferers. In dem gegebenen Modell stehen sechs verschiedene Lieferanten zur Verfügung. Je nach Produkt werden verschiedene Zulieferer zugeordnet. Einzelne Lieferanten können entweder eine einzelne Produktvariante oder das gesamte Sortiment anbieten. Diese Lieferanten haben eigene zugewiesene Zeiten. Diese Zeiten werden zufällig einer Bestellung zugeordnet. So wird die Lieferung eines Produktes, sowohl durch die Anzahl der verfügbaren Lieferanten, als auch durch die entsprechende zeitliche Komponente beeinflusst. Die Zuweisung des Zulieferers verhält sich als unabhängige Einflussgröße, wie die Mengenangabe. Obwohl sie auch abhängig von der Produktauswahl ist, wie Volumen und Gewicht, variiert sie innerhalb ihrer jeweiligen Grenzen.

Eine weitere Störgröße ist die mögliche Einlagerung in eines der beiden Zwischenlager. Eine Zwischenlagerung lässt sich von außen durch den Experimentator nicht

eigens einstellen. Die Einlagerung ist ablaufgeschuldet. Je nach Platzverfügbarkeit im Endbereich wird eine Lieferung zum Abtransport bereitgestellt, oder zwischenzeitig in einem Lager aufbewahrt. Die nächste Störgröße bezieht sich auf den Abtransport. Neben dem im Materialfluss vorgesehenen Element „Transport_Final“ existiert eine alternative Verbindung. Sollte der eigentliche Transportweg belegt sein, werden die betroffenen Lieferungen auf diesen umgeleitet. Die Auswahl welche Verzweigung genommen wird liegt nicht im Einflussbereich des Experimentators.

Für zukünftige Betrachtungen kann der anvisierte Zielort in die statistische Versuchsplanung miteinbezogen werden. Im aktuellen Programm wird den jeweiligen Lieferungen zufällig ein beliebiger Bestimmungsort zugeordnet. Es macht hierbei keinen Unterschied, welche Destination zugeordnet wurde. Die Auslieferung veranschlagt ebenfalls keine Zeit, so dass dieser potentielle Einflusspunkt für diese Bachelorthesis keine Relevanz hat. Zu einem späteren Zeitpunkt kann die Zieladresse ebenfalls als eine Steuergröße behandelt werden. Den unterschiedlichen Destinationen können unterschiedliche Zeitwerte zugeordnet, so dass sich eine weitere Einflussgröße ergibt.

Zusammengetragen ergibt sich eine übersichtliche Sammlung der verschiedenen Klassifizierungen. In der nachstehenden Tabelle 5.2 werden die Faktoren grafisch aufbereitet. Unter „Aktive Einflussgrößen“ sind die Steuer- und Störgrößen aufgeführt, welche als Faktoren in der Versuchsplanung analysiert werden. Die aussortierten Einflussgrößen werden unter „Passive Einflussgröße“ gesammelt. Sie haben keinen direkten Einfluss auf den Prozess, ihr Einfluss wird in mindestens einem Einflussfaktor berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.1).

Aktive Einflussgrößen	
Steuergrößen	
Produktauswahl	Mengenangabe
Zuliefererverfügbarkeit	
Störgrößen	
Abtransport	Zwischenlager
Transportzeiten	
<ul style="list-style-type: none"> • LKW • Flugzeug • Schiff 	
Verzögerung im Endtransport	
Passive Einflussgrößen	
Gewicht	Volumen
Transportmittel	

Tabelle 5.2: Einordnung der Einflussfaktoren

Der zukünftige Versuchsplan verringert sich um vier Einflussgrößen, die bereits durch andere Einflussgrößen miteinfließen oder irrelevant sind. Auf Grund des exponentiellen Verhaltens statistischer Versuchspläne reduziert sich der Versuchsaufwand des fertigen Versuchsplans dadurch drastisch. Die unter „Aktive Einflussgrößen“ gelisteten Steuer- und Störgrößen fungieren im späteren Versuchsplan als Einflussfaktoren.

Wie alle Bereiche der Statistik sind auch statistische Versuchspläne fehlerbehaftet. Um zufällige Einflüsse ausschließen zu können, müssen mehrere Durchläufe durchgeführt werden. Anschließend müssen deren Ergebnisse zusammengerechnet werden. Dies sorgt für eine potentiell wirklichkeitsnähere Verteilung der wirkenden Einflussgrößen. Bei Simulationsprozessen funktioniert die Methodik, der erneuten Durchläufe nicht direkt. Bei wiederholter Ausführung liefert das Modell erneut dieselben Werte. Um dies

auszuschließen wird der Seedwert von seinem initialen Wert verändert bei Beibehalten des restlichen Szenarios. Der Seedwert ist ein Startwert für Zufallsvariablen, er randomisiert den Ablauf der Versuche. Für das gegebene Modell wird so ausgeschlossen, dass wieder die gleichen Lieferungen bestimmte Elemente blockieren. Im Modell wird pro Durchlauf der Seedwert neu festgelegt. Die neu dokumentierten Messergebnisse unterscheiden sich jetzt von den ursprünglichen Daten. Zusammengerechnet ergeben die Werte sicherere Ergebnisse für die gesuchten Zielgrößen.

5.2 Niveaustufenzuordnung

In diesem Unterkapitel werden die Faktoren aus dem vorherigen Kapitel aufbereitet. Bevor die jeweiligen Niveaustufen der Einflussparameter bestimmt werden können, müssen zu den Merkmalen ihre jeweiligen Skalenniveaus zugeordnet werden. Je nach Skalenniveau können die in dem Plan eingetragenen Tabellenwerte unterschiedliche Werte annehmen (vgl. Kapitel 2.1).

Die Produktauswahl skaliert nominal. Es gibt eine begrenzte Anzahl an möglichen Optionen. Die Auswahl umfasst die beiden existierenden Produktvarianten, es handelt sich hier um ein binäres Merkmal. Es gibt keine logischen Kriterien nach denen sie in eine Reihenfolge geordnet werden können. Eine Rangordnung über eine der passiven Einflussgrößen des Gewichtes oder des Volumens ist unzulässig. Beide Produkteigenschaften sind gleichwertig, es existiert keine Prioritätenrangfolge. Gemäß der üblichen Notierung werden die unterschiedlichen Ausprägungen mit den mathematischen Symbolen „+“ und „-“ beschrieben. Dem Produkt der Produktklasse „a“ wird das „+“-Zeichen zugeordnet und der Produktklasse „b“ das „-“-Zeichen. Dies ist keine Wertung, die Symbolik dient der Übersichtlichkeit und zur besseren Unterscheidbarkeit im vollständigen Versuchsplan. Eine metrische Skalierung liegt bei der Mengenangabe vor. Spezifischer eingeordnet gliedert sich die Einflussgröße in eine Intervallskala, da sie diskrete Werte umfasst.

Die Niveaustufenzuordnung der „Menge“ erfolgt über den Bereich, in dem eine Stückzahl eines der beiden Produkte liegen darf, damit ein Transportmittel zugeordnet werden kann. Die Zuordnung in Intervalle verhindert spätere Probleme bei der Versuchsplanauswertung, wenn die jeweiligen Endwerte als Niveaustufen betrachtet werden würden. Es ist unklar wie Stückzahlen, welche von den Grenzen abweichen,

behandelt werden müssen. Lieferungen des Produktes „b“ wird in dem Bereich ihrer Mindestbestellung von einem Stück bis zu vier Stück das „+“-Zeichen zugeordnet. Betroffene Lieferungen werden per Luftfracht transportiert. Dem „-“-Zeichen werden Bestellungen zwischen fünf und dem Maximalwert von zehn zugeordnet, diese Bestellungen werden per Straßentransport geliefert. Bei Produkt „a“ gibt es lediglich ein zulässiges Transportmittel. Alle erlaubten Bestellmengen werden dem „+“-Symbol zugeordnet, da das Produkt ausschließlich per Schiff verschickt wird. Die Symbolik der zweiten Variante erfolgt pro forma. Das „-“-Symbol fungiert bei Produkt „a“ als Dummy, während der Erzeugung des Versuchsplans. Es enthält keinen Wert, es dient lediglich der Generierung des Versuchsplans.

Die nächste Steuergröße, die Lieferantenverfügbarkeit, ist ebenfalls diskret, die Werte sind in einer Nominalskala anzuordnen. Das Merkmal ist diskret, da ihre Ausprägung endlich ist. Lieferanten können nach dem Modell ausschließlich einzeln eine Bestellung bearbeiten. Da sechs verschiedene Lieferanten zur Verfügung stehen, reicht die zuvor verwendete Symbolik nicht aus, um die sechs möglichen Stufen dieses Faktors in einen Versuchsplan implementieren zu können. Entsprechend müssen andere Symbole zugeordnet werden. Das Produkt „a“ wird von drei der sechs Lieferanten unterstützt. In dem Modell sind diese Lieferanten durchnummeriert von „Lieferant4“ bis „Lieferant6“. Entsprechend werden die unterschiedlichen Lieferanten anhand ihrer Nummerierung in dem Versuchsplan unterschieden. Das alternative Produkt kann von allen sechs Lieferanten bereitgestellt werden. Sie werden im Versuchsplan mit den Ziffern eins bis sechs beschrieben. Die Lieferanten müssen für beide Produkte nicht separat betrachtet werden, bei Produkt „a“ können die unzulässigen Lieferanten nachträglich gestrichen werden.

Die Störgrößen „Abtransport“ und „Zwischenlager“ sind wie die Produktauswahl nominal skaliert. Es sind absolute Zustände, eine Lieferung wird über ein Element eines der beiden Bereiche transportiert. Der durchgängige Transport ohne Zwischenlagerung wird durch das „+“-Symbol dargestellt und das zweite Element entsprechend konträr. Bei dem Abtransport wird dem standartmäßig vorgesehenen Element „Transport_Final“ das „+“-Symbol zugeordnet. Für die erste Planungsphase werden die beiden Einflussgrößen getrennt betrachtet. So können Einflüsse auf das System genauer bemessen werden. Sollte der Versuchsaufwand zu hoch sein, werden diese im späte-

ren Verlauf nachträglich zusammengefügt. Dies ist möglich, da es nur bei der Kombination der Merkmale Lagerung im Zwischenlager und Transport_Ab_Zwischenlager zu Verzögerungen kommt.

Die Transportzeiten der drei Fördermittel sind alle unterschiedlich. Sie unterscheiden sich in Dauer, Wahrscheinlichkeit und Anzahl der möglichen Zeiten. Da die Zuordnung der Lieferungen auf die Transportmittel von den Produkten abhängig ist, befasst sich die Einflussgröße mit den Transportzeiten und nicht mit dem jeweiligen Fördermittel. In realen Prozessen sind Transportzeiten variabel, in dem Modell besitzen sie eine begrenzte Anzahl an Ausprägungen. Daher werden sie in eine Intervallskala eingeordnet. Die Symbolzuordnung erfolgt chronologisch. Ausgehend von dem kürzesten Zeitbedarf werden die Lieferzeiten durchnummeriert. Bei LKW- und Schiffstransport gibt es mehrere Transportzeiten, denen die Ziffern bis 8 zugeordnet werden. Für den Flugzeugtransport stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung, ihnen werden die Ziffern 1 bis 6 zugeordnet. Die verwendeten Ziffern sind identisch, die dazugehörigen Transportzeiten sind für jedes Fördermittel individuell. Da jeder Auftrag von einem Transportmittel geliefert wird, überschneiden sich die Symbole nicht. Die Ziffern 7 und 8 sind bei dem Flugzeugtransport irrelevant. Sie dienen im Versuchsplan als Platzhalter der Felder.

Die Verzögerungen vor der Ablieferung zum Endabnehmer sind unabhängig von Produkt und Transportmittel. Für jede Lieferung besteht die gleiche Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Verzögerung kommt. Die maximale Verzögerung beträgt zwei Tage (2:00:00:00.0000 in Plant Simulation), ihr wird die Ziffer „7“-Symbol zugeordnet. Ein verzögerungsfreier Transportvorgang wird mit einer „1“ dargestellt. Die Werte zwischen Eins und Sieben stehen für weitere Verzögerungen unter dem Maximalwert. Für die erste Betrachtung wird die Verzögerung als normaler Einflussfaktor behandelt. Falls der Versuchsplan ab einer gewissen Größe unübersichtlich oder zu aufwendig wird, wird die Verzögerung als Störgröße betrachtet, welche sich durch Randomisierung egalisiert. Dies ist möglich, da jede Lieferung die gleichen Wahrscheinlichkeiten und Zeiten für auftretende Verzögerungen besitzen. Durch die vielen Versuche mit gleicher Merkmalsausprägung mit zusätzlichen Wiederholungen verringern sich die unbekanntene Effekte der Verzögerung. Dies geschieht auf Kosten der Nachvollziehbarkeit des Prozesses.

In der nachstehenden Tabelle 5.3 werden die beschriebenen Einflussgrößen und ihre

Niveaustufen mit den zugehörigen Symbolen für die Grobplanung eines Versuchsplans übersichtlich aufbereitet. Die rot markierten Felder können im Modell nicht auftreten. Die Versuchsplanerstellung erfolgt durch sie unkomplizierter. Ohne sie müssten viele einzelne Ersatzpläne generiert werden, die irreguläre Kombinationen von vornherein nicht umfassen.

Werte/Möglichkeiten		Symbolik	
Produktauswahl			
a			+
b			-
Zuliefererverfügbarkeit			
Produkt „a“		4 - 6	
Produkt „b“		1 - 6	
Mengenangabe			
a	100 - 200	+	Schiff
	> 200	-	
b	1 - 4	+	Flugzeug
	5 - 10	-	LKW
Abtransport			
Transport_Final		+	
Transport_Ab_Zwischenlager		-	

Zwischenlager			
Nein			+
Ja			-
Transportzeiten			
LKW	Schiff	Flugzeug	
6:00:00.0000	5:00:00:00.0000	5:00:00.0000	1
12:00:00.0000	7:00:00:00.0000	10:00:00.0000	2
18:00:00.0000	10:00:00:00.0000	15:00:00.0000	3
1:00:00:00.0000	12:00:00:00.0000	20:00:00.0000	4
1:06:00:00.0000	15:00:00:00.0000	1:00:00:00.0000	5
1:12:00:00.0000	20:00:00:00.0000	1:05:00:00.0000	6
1:18:00:00.0000	25:00:00:00.0000		7
2:00:00:00.0000	30:00:00:00.0000		8
Verzögerung im Endtransport			
0.0000			1
3:00:00.0000			2
6:00:00.0000			3
9:00:00.0000			4
12:00:00.0000			5
1:00:00:00.0000			6
2:00:00:00.0000			7

Tabelle 5.3: Niveaustufenzuordnung

5.3 Auswahl des Versuchsplans

Nach dem Sichten der Einflussfaktoren und deren Feinbetrachtung muss das geeignetste Schema für den statistischen Versuchsplan ausgewählt werden. Ausschlaggebend sind die relevanten Einflussfaktoren, die je nach Menge oder Anzahl ihrer Stufen die Verwendung bestimmter Versuchspläne empfehlen oder auch ausschließen können. Bevor ein komplexer Versuchsplan konstruiert wird, lohnt sich eine Hochrechnung, ob der Aufwand für einen vollfaktoriellen Versuchsplan überschaubar ist. Durch Verwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplans kann ein Informationsverlust vermieden werden

Vollfaktorieller Versuchsplan

Die Kalkulation, der benötigten Anzahl der Versuche in einem vollfaktoriellen Versuchsplan, funktioniert bei dem gegebenen Modell schwierig. Die in dem Abschnitt 2.2.1 erläuterte Formel erweist sich als unzureichend, da nicht allen Ausprägungen eines Einflussfaktors die gleichen Niveaustufen zugeordnet werden können. So besitzt beispielsweise die Ausprägung „Flugzeug“ bei den Transportzeiten sechs mögliche Zeiten, während die Transportzeiten für „LKW“ und „Schiff“ zwischen acht Möglichkeiten variieren. Zusätzlich sind mehrere Einflussfaktoren voneinander abhängig und treten ausschließlich bei bestimmten Kombinationen der übrigen Parameter auf. Die Formel für gleichverteilte Pläne kann aber entsprechend angepasst werden und so auch komplexere Systeme analysieren.

$$n = m^k = \underbrace{m \times m \times m \times \dots m}_{k\text{-Faktoren}}$$

Am Beispiel von 3^2 sind es zwei Parameter, die in drei Niveaustufen vorkommen. Umgeformt ergibt 3×3 ebenfalls neun nötige Versuche. Für den benötigten Versuchsaufwand können die Faktoren wahlweise als Exponent der Niveaustufen betrachtet oder entsprechend des Exponentialwertes ausgeschrieben werden. Bei verschiedenen Faktoren können die zusätzlich per Multiplikation angefügt werden [TÖP08].

In der Tabelle 5.4 wird diese Methodik für das behandelte Modell dargestellt. Neben dem reinen Versuchsumfang des vollfaktoriellen Versuchsplans werden so auch die unzulässigen Versuche bestimmt. Dies reduziert zum einen die Anzahl der nötigen Versuche, zum anderen werden auch fehlerhafte Analysen verhindert.

	A	B	C	D	E	
Produktauswahl	2	1	1	1		
Zulieferverfügbarkeit	6	6	3	6		
Mengenangabe	2	1	1	1		
Abtransport	2	2	2	2		
Zwischenlager	2	2	2	2		
Verzögerungen	7	7	7	7		
Transportzeiten	8	8	8	2		
Summe:	5 376	1 344	672	336	756	= 2 268

Tabelle 5.4: Versuchsumfang bei vollfaktoriellen Versuchsplan

In der Ersten Spalte „A“ wird ein vollfaktorieller Versuchsplan aufgespannt. Er umfasst alle theoretischen Versuche, welche nötig wären, wenn Einflussfaktoren keine Abhängigkeiten aufweisen würden. Die oben angegebene Formel wird exemplarisch auf diese Spalte angewendet.

$$2 \times 6 \times 2 \times 2 \times 2 \times 7 \times 8 = 5\,376$$

Die benötigten Versuche werden durch die Spalten „B“, „C“, „D“ und „E“ reduziert. Da der Parameter über die Mengenangabe bei Produkt „a“ zwangsweise mit „+“ symbolisiert wird, reduziert sich der Versuchsaufwand um ein Viertel der Gesamtkombinationen. Alle Versuche mit der alternativen Stufe müssen nicht durchgeführt werden. In der Spalte „B“ wird dies über die betroffenen Spalten rechnerisch überprüft. Neben der Mengenangabe erfolgt eine weitere Anpassung des Versuchsplans aufgrund der

Besonderheiten des Produktes. So muss ebenfalls die Summe der Spalte „C“ von der Gesamtzahl abgezogen werden. In „C“ werden die fehlenden Lieferanten bei Produkt „a“ berechnet. Die Lieferanten 1 - 3 werden bei einer Lieferung von Produkt „a“ nicht berücksichtigt. Spalte „D“ berechnet die unzulässigen Transportzeiten bei Luftfracht. Luftfracht tritt nur bei Produkt „b“ auf und besitzt sechs mögliche Transportzeiten, während LKW- und Schifftransport acht mögliche Zeiten annehmen können. Die Spalte „E“ reduziert den zwischenzeitlich berechneten Umfang weiter um ein Viertel. Hier wird die Summe der Versuche, bei denen das Element „Transport_Ab_Zwischenlager“ irregulär direkt von dem Transportmittel beliefert wird, bestimmt.

Nachdem der einzelne Aufwand für jede Spalte berechnet wurde, kann der benötigte Umfang berechnet werden. In der folgenden Rechnung wird der benötigte Versuchsumfang bestimmt. Die einzelnen Zahlen stehen für jeweils eine der fünf Spalten.

$$\underbrace{5\ 376}_A - \underbrace{1\ 344}_B - \underbrace{672}_C - \underbrace{336}_D - \underbrace{756}_E = 2268$$

Insgesamt ergeben sich bei der Anwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplans, für das gegebene Modell 2 268 Versuchsdurchgänge. Verglichen mit den ursprünglichen 5 376 Versuchen, reduziert sich der Aufwand um 42 %. Hinzu kommen die erneuten Versuchsreihen, um die zufälligen Fehler ausschließen zu können. Insgesamt sind es bei einer dreifachen Ausführung 6 804 Versuche. Für praktische Versuche ist das eine zu hohe Anzahl, um sie alle durchführen zu können. Versuche in Simulationsumgebungen sind vergleichsweise schnell umsetzbar, jedoch sind sie mit einem erheblichen Aufwand verbunden.

Die graumarkierten Zeilen betreffen den Abtransport von den Zwischenlagern. Werden diese zusammengefasst, reduziert sich der Umfang einer jeden Zeile um die Hälfte, da beide Faktoren durchgängig denselben Wert aufweisen.

Es empfiehlt sich, alternative Varianten der Versuchsplanung auszuloten, da der vollfaktorielle Versuchsplan einen großen Aufwand benötigt. Bei besserer Eignung einer anderen Methodik wird diese angewendet, trotz des drohenden Informationsverlustes.

Teilfaktorieller Versuchsplan

Bei einem großen Versuchsumfang ist die geläufigste Methode die der teilfaktoriellen Versuchsplanung. Sie bedarf nicht mehr die Analyse jeder möglichen Einflussfaktorkombination, der Umfang reduziert sich auf das Nötigste.

Da für das Modell noch keine Wechselwirkungen bekannt sind, muss vor der eigentlichen Generierung ein unkritischer Plan ausgewählt werden. Hierzu bedarf es einen Plan mit einer Auflösung über der Stufe III.. Dieser kann aus der entsprechenden Tabelle 2.3 ausgewählt werden. Mögliche Auflösungen sind für 2^k -Pläne vorgesehen, die zu analysierenden Merkmale der Einflussfaktoren variieren aber um bis zu acht Stufen. Daher müssen diese vor ihrer Anwendung in einem teilfaktoriellen Versuchsplan entsprechend angepasst werden.

Der achtstufige Faktor „Transportzeiten“ lässt sich in mehrere binäre Spalten transformieren. Durch das exponentielle Verhalten vollfaktorieller Versuchspläne ist ein Plan mit acht Versuchen unkompliziert umformbar. Dieser kann mit denselben Niveaustufen übernommen werden. Drei fiktive Einflussfaktoren setzen sich nach $2^3 = 8$ zu dem benötigten ursprünglichen Stufen zusammen [ROY10]. Für nachfolgende Analysen muss dann die Aufteilung in die drei Spalten berücksichtigt werden. Die nachstehende Tabelle 5.5 zeigt die Zuordnung der jeweiligen Einflussparameter auf die drei generierten Spalten.

Ursprüngliche Stufen	A	B	C
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

Tabelle 5.5: Aufspaltung eines achtstufigen Einflussfaktors

Die einzigen Faktoren, die einen teilfaktoriellen Versuchsplan verhindern, sind die Lieferantenzuweisung und die Verzögerungen bei dem letzten Lieferschritt in Richtung der Endabnehmer. Die Lieferantenzuweisung mit sechs Niveaustufen kann in zwei Spalten mit je zwei Niveaustufen und in eine Spalte mit drei Merkmalen aufgegliedert werden. Die Spalte mit drei Möglichkeiten verhindert die Aufnahme des Einflussfaktors in dem teilfaktoriellen Versuchsplan, er lässt sich auch nicht näher aufteilen. Der siebenstufige Faktor der Verzögerungen lässt sich nicht näher aufteilen, er kann daher ebenfalls nicht für einen reduzierten Versuchsplan berücksichtigt werden.

Für die alleinige Aufbereitung des zukünftigen Versuchsplans ist die Variante der teilfaktoriellen Versuchspläne nicht geeignet. Die Anwendung empfiehlt sich aber auf Grund der Effizienz zumindest für einen Teil der Faktoren. Die restlichen Parameter können dann mit dem teilfaktoriellen Versuchsplan kombiniert werden.

Plackett-Burman-Versuchsplan

Versuchspläne nach Plackett-Burman sind ausschließlich für zweistufige Merkmale einsetzbar. Da einige Faktoren mehr als zwei Ausprägungen besitzen, ist diese Möglichkeit der statistischen Analyse nicht verwendbar. Zusätzlich weisen alle Versuchspläne dieser Methodik eine Auflösung von III. auf. Da sich die Faktorstufen nicht in ein ausschließlich zweistufiges System übertragen lassen, können Plackett-Burman-Versuchspläne nicht für den ganzen Versuchsplan verwendet werden. Zusätzlich gelten Versuchspläne dieser Art auch als kritisch, deswegen wird ihre Anwendung nicht weiter diskutiert.

Taguchi-Versuchsplan

Ein Versuchsplan nach Taguchi kann für das gegebene Modell ebenfalls schnell ausgeschlossen werden. Zwar ist es möglich, Faktoren verschiedener Stufenzahlen in einem Versuchsplan zu analysieren, jedoch existiert kein standardisiertes orthogonales Feld, welches zu den Einflussfaktoren und ihren Stufen passen würde [BOL07]. Da entsprechende Grundlagen fehlen, werden Taguchi-Versuchspläne daher nicht näher auf ihre Eignung für das bestehende Modell analysiert.

6 Generierung und Anwendung des Versuchsplans

Die im vorigen Kapitel analysierten Versuchsplanvarianten haben alle ihre Vorzüge, oder ein ausschließendes Kriterium. Diese Vorarbeit dient in diesem Kapitel der Generierung des endgültigen Versuchsplans.

6.1 Grobplanung des Versuchsplans

In diesem Unterkapitel wird ein Versuchsplan erzeugt, wenn dieser den Anforderungen nicht genügt wird der generierte Versuchsplan weiter angepasst.

Wenn die Transportzeit in drei zusammenhängende Spalten geteilt wird, erfüllen sieben Einflussfaktoren die notwendige Voraussetzung für teilfaktorielle Versuchspläne. Teilfaktorielle Versuchspläne setzen sich ausschließlich aus Spalten mit zwei Niveaustufen zusammen. Zusätzlich müssen die beiden Faktoren Zulieferverfügbarkeit und Verzögerungen berücksichtigt werden, die das Kriterium nicht erfüllen. Da diese Einflussfaktoren nicht in einem reduzierten Versuchsplan berücksichtigt werden können, werden im Folgenden zwei separate Versuchspläne erstellt und später zusammengefügt. Der eine Versuchsplan wird teilfaktorisiert, während der zweite Versuchsplan seine vollfaktorielle Form behält. Die beiden Versuchspläne werden separat behandelt. Zur Überprüfung des Vorgehens wird die benötigte vollfaktorielle Versuchsanzahl mit dem zuvor berechneten Umfang verglichen.

$$\underbrace{2^7}_{\text{Zukünftig-Teilfaktorieller Versuchsplan}} \times \underbrace{(6 \times 7)}_{\text{Vollfaktorieller Versuchsplan}} = 5\,376$$

Die notwendige Anzahl an Versuchen bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit sieben binären Einflussfaktoren unterscheidet sich nicht von dem vorher berechneten

Wert in Tabelle 5.4 Die Trennung beider Pläne und deren spätere Rekombination verursacht auch keine Änderung.

Die beiden Einflussfaktoren mit sechs und sieben Niveaustufen erzeugen durch Multiplikation einen vollfaktoriellen Versuchsplan mit 42 Versuchen. Diese werden nach Erzeugung des teilfaktoriellen Versuchsplans mit diesem multipliziert. Die 42 Versuche lassen sich nicht verringern, so muss der Gesamtaufwand über den teilfaktoriellen Part reduziert werden.

Ein Versuchsplan mit sieben Faktoren, mit jeweils zwei Merkmalen, würde 128 Versuche benötigen. Diesen Versuchsplan kann in einen teilfaktoriellen Plan umgewandelt werden. Als Auflösungen stehen vier Möglichkeiten zur Verfügung, aus denen eine Möglichkeit ausgewählt werden muss. Eine Auflösung Stufe III. wird bei einem 2^{7-4} -Plan erzielt, eine IV.-Stufe bei 2^{7-3} - oder 2^{7-2} -Plan erzielt. Die letzte mögliche Auflösung VII. wird bei einem Versuchsplan mit der Zusammensetzung 2^{7-1} erreicht. Die Auflösung III. wird im Vorfeld ausgeschlossen. Auflösungen dieser Höhe sind zu vermeiden, sie sind als kritisch anzusehen. Die Effekte der Faktoren sind zwar nicht untereinander vermengt aber mit den Effekten der Zwei-Faktor-Wechselwirkungen. So ist nicht zu unterscheiden, ob ein Effekt von einem Faktor oder von einer Wechselwirkung ausgelöst wird. Daher muss zwischen den beiden übrigen Auflösungen ausgewählt werden. So muss ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Größe des Versuchsplans gefunden werden. Der VII.-Plan benötigt mit 2^{7-1} 64 einzelne Versuche, mit dem vollfaktoriellen Versuchsplan sind dies 2 688 Versuche. Um statistische Unsicherheiten auszuschließen werden diese dreimal wiederholt. Insgesamt müssen nach der Methodik ganze 8 064 Versuche analysiert werden. Unter der Annahme, dass der Anteil irregulärer Faktorkombinationen des zusammengesetzten Versuchsplans gleich hoch ist wie der des vollfaktoriellen Plans, reduziert sich die Summe von 8 064 um 42 % auf 4 677 Versuche. Dies sind 70 % der benötigten Versuche des vollfaktoriellen Versuchsplans, eine weitere Reduzierung ist möglich durch Herabsenken der Auflösung von der VII.-Stufe auf die IV.-Stufe. Diese hat den Nachteil, dass Effekte der Hauptfaktoren mit den Effekten der Drei-Faktor-Wechselwirkungen vermengt sind. Da diese Wechselwirkungen als schwächer angesehen wirken, gilt die Auflösung als deutlich weniger kritisch und kann daher verwendet werden (vgl. Kapitel 2.3).

Eine Auflösung IV. erfüllt sowohl der Versuchsplan 2^{7-2} als auch der Versuchsplan mit

2^{7-3} . Erster reduziert den Umfang, ausgehend vom vollfaktoriellen Versuchsplan, um die Hälfte auf 32 Versuche, die zweite Möglichkeit halbiert diesen weiter auf 16 Versuche. Da die Vermengungen mit Wechselwirkungen beider Pläne identisch sind, wird normalerweise der 2^{7-3} -Versuchsplan wegen seines geringeren Versuchsumfangs gewählt. Auf Grund der Abhängigkeiten und der Unterschiede der Niveaustufen des Modells, wird der größere Plan gewählt. So wird sichergestellt, dass ein Versuchsplan nicht aus irregulären Versuchen erzeugt wird.

Die Erzeugung dieses teilfaktoriellen Versuchsplans erfolgt durch Reduzierung des zugehörigen vollfaktoriellen Versuchsplans. Gemäß des Exponenten des teilfaktoriellen Versuchsplans, setzen sich dessen Faktoren zusammen. Der Versuchsaufwand eines 2^{7-2} -Plans ist identisch mit dem eines 2^5 -Plans. So sind fünf Faktoren festgelegt, die restlichen beiden setzen sich aus Wechselwirkungen zusammen. Die Tabelle 6.1 zeigt einen Ausschnitt des vollständigen Versuchsplans. Die Faktoren, welche sich aus Wechselwirkungen ergeben, sind grau unterlegt.

A	B	C	D	E	F	G
Produkt	Menge	Abtransport	Zwischen-lager	Transport 1	Transport 2	Transport 3
+	+	+	+	+	+	+

Tabelle 6.1: Auszug aus dem vollfaktoriellen Versuchsplan

Da die Auflösung IV. gewählt wurde, setzen sich die zwei grau hinterlegten Faktoren aus Kombinationen von vier Faktoren zusammen. Diese werden im Folgenden gebildet.

Als Generatoren werden „F = ABCD“, und „G = ABCE“ definiert, die Zuordnung erfolgt der Einfachheit zugunsten alphabetisch. Die Kombinationen ließen sich auch vertauschen. Die restlichen Faktorkombinationen verteilen sich auf die gesamten sieben Faktoren und einer zusätzlichen Spalte für Kombinationen, die den Faktoren nicht

zugeordnet werden können. Diese werden im endgültigen Versuchsplan nicht übernommen. Die Tabelle 6.2 gibt die jeweiligen Zuordnungen der einzelnen Spalten an, die beiden Generatoren sind gesondert hervorgehoben. Auf Zweifaktor-Wechselwirkungen wird verzichtet, da diese nicht mit den Faktoren interagieren.

A	B	C	D	E	F	G
BCDF	ACDF	ABDF	EFG	DFG	DEG	DEF
BCEG	ACEG	ABEG	ABCF	ABCG	ABCD	ABCE
ADEFG	BDEFG	CDEFG				

Tabelle 6.2: Zuordnung der Wechselwirkungen

Die Generatoren der Spalten F und G sind grau markiert, durch sie erfolgt die Zuordnung der restlichen Wechselwirkungen. Die Spalten bestehen aus mindestens drei Einträgen, davon zwei Wechselwirkungen und einem Faktor. Die restlichen Kombinationen verteilen sich über die ersten drei Spalten. Die Zuordnung erfolgt gleichmäßig, einem Faktor kann keine Wechselwirkung zugeordnet werden, welche ihn selbst enthält z. B. ist die Verzweigung „A = ABC“ unzulässig.

Durch diese Vorüberlegungen kann der teilfaktorielles Versuchsplan erstellt werden. Dieser ist nach Erstellung für die Nutzung geeignet. Der fertige Versuchsplan ist im Anhang unter der Tabelle 7.1. hinterlegt. Die Generatoren sind in verschiedenen Graustufen markiert, einer hell- der andere dunkelgrau. Die dunkelste Spalte ist ausschließlich für diesen Versuchsplan gültig. Auf die Rücktransformation der drei Spalten für die Transportzeiten wird bei der Grobplanung verzichtet. Da der Versuchsplan weiter angepasst wird, ist dies nicht nötig.

Die vollständige Versuchsplanung umfasst neben diesem teilfaktoriellem Anteil noch den vollfaktoriellem Part. Dieser übersteigt mit 42 Versuchen den teilfaktoriellem

Versuchsplan deutlich. Er ergänzt den vollfaktoriellen Plan um seine Variationen, die genaue Zusammenstellung ist nach Generierung des teilfaktoriellen Versuchsplans trivial und wird nicht zusätzlich dem Anhang beigelegt. Der vollständige Versuchsplan umfasst 1 344 Versuche, in dreifacher Ausführung werden 4 032 Versuche benötigt.

6.2 *Feinplanung des Versuchsplans*

Durch die Grobplanung des vorherigen Unterkapitels, hat sich der Versuchsaufwand bereits deutlich verringert. Aufbauend auf dem entwickelten Schema, wird der Versuchsplan in diesem Kapitel weiter reduziert.

Zur weiteren Reduzierung des Versuchsplans werden im Folgenden die jeweiligen Einflussfaktoren beider Versuchspläne überarbeitet. Im teilfaktoriellen Versuchsplan werden die Faktoren „Abtransport“ und „Zwischenlager“ zusammengefasst. Da es ausschließlich bei der Kombination „Lagerung im Zwischenlager“ und „Transport_Ab_Zwischenlager“ zu Verzögerungen kommt, beschreibt der kombinierte zweistufige Einflussfaktor „Einlagerung“ nur noch, ob es zu einer Einlagerung kommt. Dadurch senkt sich der Versuchsaufwand um einen Faktor. Der Transportweg einer Lieferung kann jedoch nicht mehr derart detailliert nachvollzogen werden. Die Niveaustufenzuordnung erfolgt wie bei der Einflussgröße „Abtransport“ (vgl. Tabelle 5.3). Wird eine Lieferung zwischenzeitlich in ein Lager gebracht, wird dies durch das „-“-Symbol symbolisiert, im Sinne der verzögernden Bedingungen. Eine Lieferung ohne Zwischeneinlagerung wird mit dem gegensätzlichen „+“-Symbol notiert.

Zusätzlich wird der Einfluss der siebenstufigen Einflussgröße „Verzögerung“ durch Randomisierung auf ein Minimum reduziert. Durch die große Menge an Daten des simulierten Systems, mal dreifacher Ausführung, wird für die weitere Versuchsplanung auf diesen Faktor verzichtet. Für den Gesamtaufwand eines vollfaktoriellen Versuchsplans ergibt sich so eine deutlich geringere Versuchszahl.

$$2^6 \times 6 = 396$$

Der erste Teil der Rechnung kann erneut in einen teilfaktoriellen Versuchsplan umgeformt werden. Zur Auswahl stehen jeweils ein III.-, ein IV.- und ein VI.-Plan (s. Tabelle

2.3). Durch die Reduzierungen kann der unkritischste Plan, trotz der höheren Versuchszahl, ausgewählt werden. Der VI.-Plan reduziert die Durchläufe von $2^6 = 64$ um die Hälfte auf $2^{6-1} = 32$ Versuche.

Dieser Versuchsplan liegt ebenfalls dem Anhang in der Tabelle 7.1. bei. Zu Vergleichszwecken ist er in den anderen Versuchsplan integriert. Die für beide Spalten relevanten Spalten sind hellgrau gehalten. Die erste hellgraue Spalte umfasst den relevanten Generator. Der VI.-Versuchsplan wird aus nur einem Generator gebildet. Dieser variiert für die Versuchspläne. In dieser Versuchsplanung wird der Generator aus Fünf-Faktor-Wechselwirkungen gebildet. Ihr Einfluss ist unabhängig ihrer Zusammensetzung derart schwach, dass auf die Zuordnung der Wechselwirkungen an dieser Stelle verzichtet wird (vgl. Kapitel 2.3, Tabelle 2.3).

Für die Anwendung des Versuchsplans werden die Spalten der Transportzeit zurücktransformiert. Mit den zusätzlichen sechs möglichen Lieferanten multipliziert sich die Versuchszahl auf 192. In dreifacher Auswertung müssen so 576 Versuche überprüft werden.

6.3 Auswertung

Die Auswertung aller 576 Versuche übersteigt den Umfang dieser Bachelorarbeit, deren Fokus auf der Versuchsplangenerierung liegt, bei weitem. Exemplarisch werden daher die Versuche ausgewählt und in ihrer dreifachen Durchführung analysiert. Für eine Effektanalyse wird die Durchführung aller Versuche benötigt, daher beschränken sich die Deutungen der Versuche auf Tendenzen.

Als zentrales Merkmal für die betrachteten Versuche, wird das zugewiesene Transportmittel ausgewählt. Aufbauend auf die Wahl des Transportmittels gilt es die restlichen Niveaustufen so zu wählen, dass trotz der geringen Versuchsanzahl ein möglichst genauer Einblick auf die Aussagekraft der Versuche erzielt werden kann. Entsprechend fokussiert sich die Auswertung auf zwei Transportmöglichkeiten. Es werden Versuche mit Luftfracht und Schiffstransport ausgewählt, dadurch können zumindest Rückschlüsse zwischen den beiden Transportarten gemessen werden. Gemäß der Tabelle 5.3 erfolgt Flugzeugtransport bei Produkt „b“ und Wasserlieferungen bei Produkt „a“. Die Berücksichtigung aller drei möglichen Fördermittel geht zu Lasten von weiteren Rückschlüssen über andere Parameter, daher wird auf Versuche mit Straßentransport verzichtet.

Um zusätzliche Abweichungen der Lieferdauer innerhalb eines ausgewählten Transportmittels berücksichtigen zu können, wird eines der Fördermittel in zwei Versuchen betrachtet. Dies ist nötig, um z. B. den Einfluss von Lieferanten oder der Einlagerung auf die Lieferzeit bestimmen zu können. Die Auswahl des Lufttransports für zwei Versuche erfolgt willkürlich. Beide Versuche könnten auch bei Straßen-transport durchgeführt werden.

In Tabelle 6.3. wird der erste Auszug des vollständigen Versuchsplans dargestellt. Neben den Einflussfaktoren und ihren Niveaustufen sind in der letzten Zeile die Werte, welche sie symbolisieren, ergänzend eingetragen. Normalerweise wird zugunsten eines kürzeren Versuchsplans auf die realen Werte in Versuchsplänen verzichtet. Zu Gunsten der Nachvollziehbarkeit werden die Bedeutungen der Stufen in dieser Thesis in einer separaten Spalte beigefügt.

Flugzeugtransport						
Produkt	Menge	Einlagern	Transport 1	Transport 2	Transport 3	Lieferant
-	+	-	-	+	+	1
b	1 - 4	Ja	Gesamttransportzeit: 5			1:04:48:00
			1:00:00:00.0000			1:09:36:00
						6:00:00:00
						0

Tabelle 6.3: Stufen für Flugzeugtransport I

Der erste ausgewählte Teil des Versuchsplans beschreibt eine Lieferung per Luftfracht. Sie tritt bei Kombination des Produktes „b“ mit einer bestellten Menge von eins bis vier auf. Der interessante Faktor der ersten beiden Auszüge ist die Einlagerung. In diesem Versuch werden die Lieferungen betrachtet, welche in einem Zwischenlager eingelagert werden. Die beiden restlichen Parameter sind für die Analyse nebensächlich. Die Transportzeit wird in beiden Fällen auf einen Tag gesetzt. Zusätzlich wird die Lieferantenzuweisung verändert.

Die nachstehende Tabelle 6.4 zeigt die Zusammenstellung der Zielgröße „Lieferdauer“.

Sie bildet sich aus dem arithmetischen Mittel der durchschnittlichen Lieferdauer der betrachteten Seedwerte. Da statistische Versuche einer gewissen Unvorhersehbarkeit unterliegen, werden sie meistens mehrfach durchgeführt. Um zufällige Verteilungen minimieren zu können, wird jeder der drei Versuche in dreifacher Ausführung betrachtet (vgl. Kapitel 5.1). Der Aufbau der Tabelle ist für die beiden anderen Versuche identisch und wird übernommen.

Seedwert	133	141	150
Relevante Lieferungen	146	104	147
Gesamtlieferzeit	29 155,86	19 176	29 866,05
Durchschnittliche Lieferdauer	199,70	184,39	203,17
Durchschnittliche Lieferdauer: Gesamt	196,97		

Tabelle 6.4: Messungen der Stufen für Flugzeugtransport I

Die Seedwerte der Versuche werden in diesem und in den anderen beiden Versuchen auf jeweils 133, 141 und auf 150 gesetzt. In der zweiten Zeile wird deutlich, warum mehr als eine Messung benötigt wird. Die betreffenden Lieferungen, die zu den Niveaustufen passen, variieren zwischen den Messungen deutlich. Die äußeren Messungen sind sich ähnlich bezüglich ihrer Lieferungsanzahl und ihren zugeordneten Lieferzeiten. Die Werte der mittleren Spalte liegen deutlich darunter. Vermutlich handelt es sich um einen Ausreißer, welcher durch die anderen beiden Messungen kompensiert werden kann. Eine durchschnittliche Lieferung des Produktes „b“ benötigt in diesem Versuch im Schnitt 196,97 Stunden.

Die Zusammenstellung der Stufen des zweiten Versuches ist in der Tabelle 6.5 angegeben.

Flugzeugtransport						
Produkt	Menge	Einlagern	Transport 1	Transport 2	Transport 3	Lieferant
-	+	+	-	+	+	6
b	1 - 4	Nein	Gesamttransportzeit: 5			3:09:36:00
			1:00:00.00.0000			3:19:12:00 8:00:00:00 0

Tabelle 6.5: Stufen für Flugzeugtransport II

Der zweite Versuchsplanauszug orientiert sich stark an den zuvor analysierten Messungen. Bedeutendste Änderung ist die fehlende Einlagerung der Produkte. Lieferungen werden direkt nach dem Landen des Flugzeuges weitertransportiert. Zusätzlich wird der Lieferant 1 auf Lieferant 6 geändert. Die gemessenen Werte sind in der anschließenden Tabelle aufgeführt.

Seedwert	133	141	150
Relevante Lieferungen	3	4	3
Gesamtlieferzeit	186	203,63	207
Durchschnittliche Lieferdauer	62	50,91	69
Durchschnittliche Lieferdauer: Gesamt	59,66		

Tabelle 6.6: Messungen der Stufen für Flugzeugtransport II

Die gemessenen Werte der drei Durchgänge liegen für diesen Versuch deutlich näher beieinander. Auffallend ist es, wie wenige Lieferungen nicht zwischengelagert werden.

Die vorige Messung mit Lieferungen, welche zwischenzeitlich in Lager gebracht werden, weist eine deutlich höhere Anzahl an Lieferungen auf. Hier besteht Optimierungspotential, da Produkte ohne Zwischenlieferung durchschnittlich innerhalb von 60 Stunden geliefert werden können. Im industriellen Bereich hat sich eine solche Just in Time-Lieferung durchgesetzt. So werden zum einen Lagerkosten gespart, zum anderen kann auch schneller ein aufkommender Bedarf gedeckt werden.

Als abschließender Versuch wird eine Niveaustufenzusammenstellung, für Produkt „a“ analysiert. Die zugehörige Stufenkombination ist in Tabelle 6.7 hinterlegt.

Schiffstransport						
Produkt	Menge	Einlagern	Transport 1	Transport 2	Transport 3	Lieferant
+	+	-	+	+	+	6
a	100 - 200	Ja	Gesamttransportzeit: 1			3:09:36:00
			5:00:00:00.0000			3:19:12:00 8:00:00:00 0

Tabelle 6.7: Stufen für Schiffstransport

Durch Betrachtung eines Versuches mit Produktvariante „a“ wird deutlich, dass der Versuchsplan auch trotz seiner Abhängigkeiten untereinander gültig ist. Die erste Spalte ist trivial, für einen Versuch mit Produkt „a“ muss dieses verständlicherweise ausgewählt werden. Die Mengenangabe legen in Kombination mit den Produkteigenschaften fest, welches Fördermittel eine Lieferung transportiert. Gemäß des Kapitels 5.2 besteht bei Produkt „a“ keine Wahlmöglichkeit des Transportmittels. Dem Feld wird zwangsläufig das „+“-Zeichen zugeordnet. Die Auswahl dieses Versuches orientiert sich nach dem ersten Versuch. Wie in dem ersten Beispiel werden werden Lieferungen ebenfalls zwischengelagert. Zusätzlich wird weiterhin Lieferant 6 für den Transport zuständig sein. Die gemessenen Werte sind in der Tabelle 6.8 angegeben.

Seedwert	133	141	150
Relevante Lieferungen	69	75	74
Gesamtlieferzeit	25 482,52	27 823,87	26 872,63
Durchschnittliche Lieferdauer	369,311	370,98	363,14
Durchschnittliche Lieferdauer: Gesamt	367,79		

Tabelle 6.8: Messungen der Stufen für Schiffstransport

Die durchschnittliche Gesamtdauer bei Wassertransport ist mit 367,79 Stunden deutlich höher als die gemessenen Lufttransportzeiten. Der Hauptaspekt dieses Versuchsausschnittes ist die geringere Nachfrage gegenüber der ersten Messungen. Es herrscht deutlich weniger Bedarf an Produkt „a“ in dieser Kombination.

Für genaue Analysen und Zusammenhänge reichen die drei Abschnitte mit ihren Messungen nicht aus. Sie sollen beispielhaft zeigen, wie Analysen durchgeführt werden können. Ihr Informationsgehalt ist denkbar niedrig, sie geben lediglich Tendenzen über Verbindungen der Parameter mit der Zielgröße an. Für eine vollständige Betrachtung bedarf es der kompletten Auswertung des Versuchsplans.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Fokus dieser Arbeit steht die Generierung eines statistischen Versuchsplans für ein gegebenes Tecnomatix Plant Simulation-Modell. Das logistische Modell wurde entsprechend seiner einzelnen Bestandteile in mehrere Einflussgrößen aufgeteilt (vgl. Kapitel 5.2), an derer ein zugeschnittener Versuchsplan generiert werden konnte (vgl. Kapitel 6.2).

Das primäre Ziel der Analyse des Simulationsprogramms ist die effiziente Auswahl der einzelnen Faktoren aus den Einflussgrößen bei möglichst hohem Aussagegehalt ihres Einflusses auf das System. Im Sinne des Data Farmings wird die von dem Simulationsmodell erzeugte Datenlandschaft auf ein Minimum reduziert, dadurch verringert sich der benötigte Aufwand auf einen übersichtlicheren Umfang.

Die Erzeugung des Versuchsplans erfolgt schrittweise. Ausgangspunkt für die Generierung bilden die statistischen Grundlagen für voll- und teilfaktorielle Versuchspläne, aus denen sich der Versuchsplan in dieser Thesis zusammengesetzt hat. Dieser wird aus den passenden Einflussfaktoren gebildet. Die Einflussgrößen richten sich nach dem Einfluss auf das Gesamtsystem, entsprechend finden nicht alle potentiellen Einflussgrößen Verwendung in dem Versuchsplan. Außschließlich unabhängige Parameter, deren Niveaustufen nicht an einen vorgeschalteten Faktor gekoppelt sind, werden in dem Versuchsplan aufgenommen. Die ausgewählten Parameter teilen sich entsprechend ihrer Niveaustufenzahl auf die beiden Versuchsplanarten auf. In dem teilfaktoriellen Versuchsplan werden Einflussfaktoren, deren Niveaustufenzahl aus Zweierpotenzen besteht, soweit reduziert, wie es die abnehmende Aussagefähigkeit des Versuchsplans zulässt. Die restlichen Einflussfaktoren bilden einen vollfaktoriellen Versuchsplan, welcher ergänzend zu dem teilfaktoriellen Versuchsplan analysiert werden muss. In der endgültigen Auswahl der Parameter wird dem vollfaktoriellen Versuchsplan eine einzige Größe zugeordnet, welche in Form eines Versuchsplans eine Spalte aufspannt. Zusammengefügt bilden beide Teile alle benötigten Versuche, um das Modell analysieren zu können.

Zukünftig kann die erarbeitete Versuchsplanung auf weitere Modelle im Logistikbereich bezogen und weiterentwickelt werden. Direkt an dem gegebenen Modell kann die statistische Versuchsplanung für weitere Produktklassen verifiziert werden oder durch zusätzliche Parameter erweitert werden. Möglich ist zum Beispiel eine Erweiterung um

den jeweiligen Empfänger einer Lieferung. Jedem Empfänger können verschiedene Zeiten zugewiesen werden.

Mögliches Optimierungspotential der Versuchspläne besteht in der Automatisierung, der manuellen Versuchsplanerstellung; Je nach Eigenschaft der Einflussgrößen kann ein Versuchsplan mit einer bestimmten Methode generiert werden. Unter einer bestimmten Anzahl an Faktoren mit einer gewissen Anzahl an Niveaustufen wird ein vollfaktorieller Versuchsplan generiert. Alternativ wird einem definierten Bereich mit einer gewissen Parameteranzahl mit passenden Stufen ein teilfaktorieller Versuchsplan erzeugt.

Sollten die gegebenen Einflussfaktoren die beiden Methoden ausschließen, kann ein Mischplan erstellt werden. Hierfür werden die Einflussfaktoren nach ihren Niveaustufen sortiert; Je nachdem, ob ihre Niveaustufenzahl eine Zweierpotenz ist, werden sie einem teilfaktoriellen Versuchsplan zugeordnet. Binäre Einflussfaktoren können direkt in den Versuchsplan eingetragen werden, während Vielfache nach Möglichkeit zweistufig aufgeteilt werden. Restliche Faktoren würden sich zu einem additiven vollfaktoriellen Versuchsplan zusammensetzen, welcher anschließend an den teilfaktoriellen Versuchsplan angefügt wird.

Literaturverzeichnis

- [AKK11] Akkerboom, Hans: Wirtschaftsstatistik im Bachelor: Grundlagen und Datenanalyse. 3. Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler- Verlag, 2011
- [BAN10] Bangsow, Steffen: Manufacturing Simulation with Plant Simulation and Simtalk: Usage and Programming with Examples and Solutions. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [BAR04] Barry, Phillip; Koehler, Matthew: Simulation in Context: Using Data Farming For Decision Support. In: Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004
- [BIL13] Billeter, Ernst P.: Grundlagen der repräsentativen Statistik: Stichprobentheorie und Versuchsplanung. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013
- [BOL07] Bolboaca, Sorana D.; Jäntschi, Lorentz: Useful Orthogonal Arrays for Number of Experiments from 4 to 16. Universität: Cluj-Napoca, 2007
- [BRU10] Brunner, Franz J.; Wappis, Johann; Jung, Berndt: Taschenbuch Null-Fehler-Management: Umsetzung von Six Sigma. 3. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2010
- [CRO10] Croarkin, Carroll; Tobias, Paul; Filliben, Jack; Hembree, Barry; Guthrie, Will; Prins, Jack: NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 2010
- [DIN 44300] Informationsverarbeitung – Begriffe. Teil 1: Allgemeine Begriffe. Berlin: Beuth, 1988 - 2001
- [ELE12] Eley, Michael: Simulation in der Logistik: Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges „Plant Simulation“. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012
- [FRA16] Frank, Alexander: Quality Engineering. Hochschule Ulm: Vorlesung, 2016
- [GIE05] Gies, Christian: Evaluation der Prozesseinflussgrößen beim Fließlochformen mittels DoE. Universität Kassel, Fachbereich: Maschinenbau, Dissertation, 2005
- [GUN04] Gundlach, Carsten: Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung. Universität Kassel, Fachbereich: Maschinenbau, Dissertation, 2004
- [HAC10] Hachtel, Günter; Holzbaur, Ulrich: Management für Ingenieure: Technisches Management für Ingenieure in Produktion und Logistik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010
- [HEC10] Heckmann, Lars: Systematische Analyse der Schneidkantenarchitektur mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Universität Kassel, Fachbereich: Maschinenbau, Dissertation, 2010

- [HOR04] Horne, Gary E.; Meyer, Ted E.: Data Farming: Discovering Surprise, Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004
- [HOR97] Horne, Gary E: Data Farming: a Meta-technique for Research in the 21st Century, Naval Strategic Studies Group, 1997
- [JON14] Jonas, Klaus; Stroebe, Wolfgang; Hewstone Miles; Reiss Matthias: Sozialpsychologie. 6. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, Auflage, 2014
- [KLE13] Kleppmann, Wilhelm: Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. 8. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2013
- [KLE14] Klein, Bernd: Versuchsplanung–DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik. 4 Auflage, Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2014
- [KOC10] Koch, Jan: Qualitätsmanagement in Logistikunternehmen: Eine empirische Untersuchung (Supply Chain, Logistics and Operations Management). Lohmar: Josef Eul Verlag, 2010
- [LOR93] Lorenzen, Thomas; Anderson, Virgil: Design of Experiments: A No-Name Approach. Boca Raton: CRC Press, 1993
- [LUN12] Lunau, Stephan; Meran, Renata; John, Alexander; Stauder, Christian; Roenpage, Olin: Six Sigma + Lean Toolset: Mindset zur erfolgreichen Umsetzung von Verbesserungsprojekten. 3. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012
- [RAB15] Rabe, Markus; Scheidler, Anne A.: Farming for Mining - Entscheidungsunterstützung mittels Simulation im Supply Chain Management. In: Simulation in Production and Logistics 2015. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2015
- [RAS08] Rasch, Dieter; Herrendörfer, Günter; Bock Jürgen; Victor, Norbert.; Guiard, Volker: Verfahrensbibliothek: Versuchsplanung und -auswertung. 2. Auflage, Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2008
- [ROY10] Roy, Ranjit K.: A Primer on the Taguchi Method, Society of Manufacturing Engineers. 2. Auflage, Dearborn: SME, 2010
- [Sanchez, Susan M. 2014] Sanchez, S.M.: Simulation Experiments: Better Data, Not Just Big Data; In: Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 2014
- [SCH08] Schaps, Klaus-Peter; Kessler, Oliver; Fetzner, Ulrich: Das Zweite-kompakt: Querschnittsbereiche-Gk2. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008
- [SIE10] Siebertz, Karl; Van Bebber, David; Hochkirchen, Thomas: Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [STA10] Stadlober, Ernst: Versuchsplanung (Experimental Design) II. Technische Universität Graz, Fachbereich: Statistik, Vorlesung, 2010

- [TIL06] Tillmann, Wolfgang; Klaassen, Miriam: Innovative Verbundwerkstoffe als Problemlöser für hochbeanspruchte Werkzeuge zur Gesteinsbearbeitung. Verbundwerkstoffe: 14. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Weinheim: Wiley-VCH, 2006
- [TÖP08] Töpfer, Armin: Erfolgreich Forschen: Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008
- [VDI 3633] Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß-, Produktionssysteme – Grundlagen. Düsseldorf: VDI Verlag, 1993
- [WEI13] Weiß, Christel: Basiswissen Medizinische Statistik. 6. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013
- [WHI04] Whitcomb, Patrick J., Anderson, Mark J.:RSM Simplified: Optimizing Process Using Response Surface Methods for Design of Experiments. London: Taylor & Francis Inc, 2004

Anhang

Versuchsplan Legende	
+/- bzw. 1-8	Niveaustufen
	Generatorspalte für Grobplanung und Feinplanung, sowie zusammengesetzte Transportzeit für Feinplanung
	Generatorspalte ausschließlich für Grobplanung

Versuchsplan								
Grobplanung								
	Produkt	Menge	Abtransport	Zwischen-lager	Transport 1	Transport 2	Transport 3	
Feinplanung								
	Produkt	Menge	Einlagern	Transport 1	Transport 2	Transport 3		Transport Gesamt
1	+	+	+	+	+	+	+	1
2	+	+	+	+	-	-	-	4
3	+	+	+	-	+	-	+	6
4	+	+	+	-	-	+	-	7
5	+	+	-	+	+	-	-	2
6	+	+	-	+	-	+	+	3
7	+	+	-	-	+	+	-	5
8	+	+	-	-	-	-	+	8
9	+	-	+	+	+	-	-	2
10	+	-	+	+	-	+	+	3
11	+	-	+	-	+	+	-	5
12	+	-	+	-	-	-	+	8
13	+	-	-	+	+	+	+	1
14	+	-	-	+	-	-	-	4
15	+	-	-	-	+	-	+	6
16	+	-	-	-	-	+	-	7

17	-	+	+	+	+	-	-	2
18	-	+	+	+	-	+	+	3
19	-	+	+	-	+	+	-	5
20	-	+	+	-	-	-	+	8
21	-	+	-	+	+	+	+	1
22	-	+	-	+	-	-	-	4
23	-	+	-	-	+	-	+	6
24	-	+	-	-	-	+	-	7
25	-	-	+	+	+	+	+	1
26	-	-	+	+	-	-	-	4
27	-	-	+	-	+	-	+	6
28	-	-	+	-	-	+	-	7
29	-	-	-	+	+	-	-	2
30	-	-	-	+	-	+	+	3
31	-	-	-	-	+	+	-	5
32	-	-	-	-	-	-	+	8

Tabelle 7.1: Teilfaktorielle Versuchspläne

Eidesstattliche Versicherung

Zimmermann, René
Name, Vorname

156995
Matr.-Nr.

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit/Masterarbeit mit dem Titel

Statistische Versuchsplanung für Data Farming-Konzepte in

Tecnomatix Plant Simulation

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Dortmund, 23.08.2016
Ort, Datum

Unterschrift

Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -)

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Die Technische Universität Dortmund wird gfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Dortmund, 23.08.2016
Ort, Datum

Unterschrift