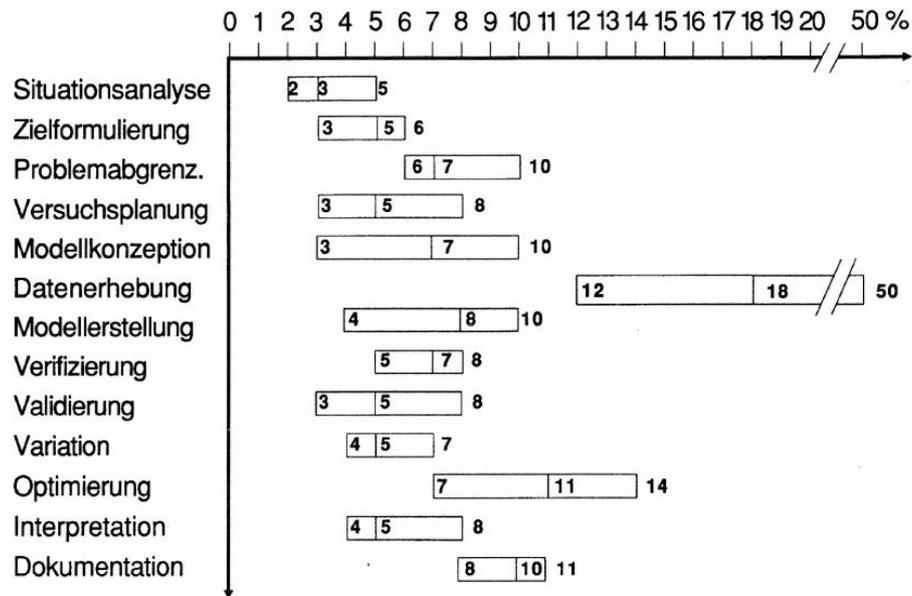




FORTSCHRITTSBERICHT SIMULATION FBS 4



Peter Acél

Methode zur Durchführung betrieblicher Simulationen

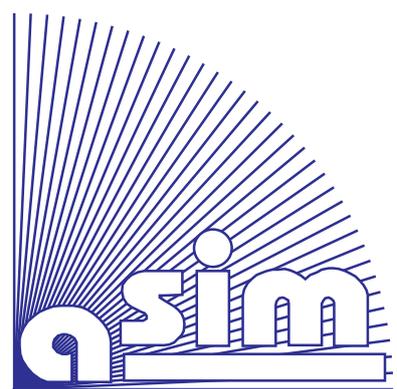
Effiziente Optimierung der diskreten Simulation



ISBN Ebook 978-3-903347-04-5

ISBN Print 978-3-901608-54-4

DOI: 10.11128/fbs.04



Fortschrittsberichte Simulation

FBS Band 4

Herausgegeben von ASIM
Arbeitsgemeinschaft **Simulation**, Fachausschuß 4.5 der GI

Peter Acél

Methode zur Durchführung betrieblicher Simulationen

Effiziente Optimierung der diskreten Simulation

ARGESIM / ASIM – Verlag, Wien, 1997
ISBN Print 978-3-901608-54-4

Ebook Reprint 2020 (Scan)
ISBN Ebook 978-3-903347-04-5
DOI: 10.11128/fbs.04

ASIM Fortschrittsberichte Simulation / ARGESIM Reports

Herausgegeben von **ASIM**, Arbeitsgemeinschaft Simulation, Fachausschuß 4.5 der **GI** und der **ARGESIM**

Betreuer der Reihe:

Prof. Dr. G. Kampe (ASIM)
Fachhochschule Esslingen
Flandernstraße 101, D-73732 Esslingen
Tel: +49-711-397-3741, Fax: --397-3763
Email: kampe@ti.fht-esslingen.de

Prof. Dr. D.P.F. Möller (ASIM)
Inst. F. Informatik, TU Clausthal-Zellerfeld
Erzstraße 1, D-38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel: +49-5323-72-2404, Fax: --72-3572,
moeller@vax.in.tu-clausthal.de

Prof. Dr. F. Breitenecker (ARGESIM / ASIM)
Abt. Simulationstechnik, Technische Universität Wien
Wiedner Hauptstraße 8 - 10, A - 1040 Wien
Tel: +43-1-58801-5374, Fax: +43-1-5874211,
Email: Felix.Breitenecker@tuwien.ac.at

FBS Band 4

Titel: Methode zur Durchführung betrieblicher Simulationen

Untertitel: Effiziente Optimierung der diskreten Simulation

Autor: Peter Acél
Email: acel@acel.ch

Begutachter des Bandes:

Prof. Dr. F. Breitenecker TU Wien, Prof. Dr. D.P.F. Möller Univ. Hamburg

ARGESIM / ASIM – Verlag, Wien, 1997

ISBN Print 978-3-901608-54-4

Ebook Reprint 2020

ISBN Ebook 978-3-903347-04-5

DOI: 10.11128/fbs.04

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© by ARGESIM / ASIM, Wien, 1997

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zur Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz - Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

METHODE ZUR DURCHFÜHRUNG BETRIEBLICHER SIMULATIONEN

Effiziente Optimierung der diskreten Simulation

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Peter Paul A c é l

Dipl. Masch. Ing., TH Karlsruhe

geboren am 4. November 1959

von Dällikon (ZH)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Alfred Büchel, Referent

Prof. Fritz Huber, Korreferent

Prof. Dr. Urs Meyer, Korreferent

1996

VORWORT

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit neuen Ideen im Umfeld der diskreten Computer-Simulation. Es wird gezeigt, wo Verbesserungspotentiale liegen und wie Probleme bei der Simulations-Anwendung zu vermeiden sind, ohne dabei neue Fehler zu begehen.

Dieser Arbeit liegen zehn Jahre industrielle Anwendererfahrung auf dem Gebiet der Simulation zugrunde. Viele Hinweise setzen praktische Vertrautheit mit der Simulation voraus. Der Inhalt dieser Ausarbeitung richtet sich einerseits an fachkundige Simulations-Anwender und andererseits an Auftraggeber von Simulations-Studien bzw. an deren Projektvertreter. Für die Auftraggeberseite sind besonders die Kapitel *Simulation und Modell-Bildung*, *Simulations-Anwendung* und *Konzeption einer Vorgehensmethode* von Interesse. Für fachkundige Simulations-Anwender sind besonders die Teile *Versuchs- und Optimierungs-Strategien*, *Parameter-Reduktion*, *Versuchsplanungs-Methode* und *Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche* empfohlen.

Der vorliegende Beitrag entstand während meiner Tätigkeit an der Stiftung für Forschung und Beratung am Betriebswissenschaftlichen Institut (BWI) der ETH Zürich.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. A. Büchel für die Uebernahme des Referates sowie für die vielen guten Anregungen und Diskussionen. Herrn Prof. F. Huber danke ich für die Uebernahme des Korreferates und die Möglichkeit, diese Arbeit im Rahmen meiner Tätigkeit an der Stiftung BWI zu vertiefen und abzuschliessen. Gleichzeitig danke ich Herrn Prof. Dr. U. Meyer für seine Unterstützung und die Uebernahme des zweiten Korreferats.

Ein weiterer Dank gilt der ABB, die mir den Beginn dieser Dissertation ermöglichte und ein interessantes Betätigungsfeld bot. Daraus resultierten sehr viele Impulse für diese Abhandlung.

Meinen früheren und jetzigen Arbeitskollegen, die mir in zahlreichen Gesprächen wertvolle Anregungen gegeben haben, und auch allen weiteren Personen und Unternehmen, die einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben, sei an dieser Stelle gedankt.

Mein spezieller Dank richtet sich an meine Frau für ihr Verständnis und ihre Geduld während der Entstehung dieser Dissertation.

INHALTSÜBERSICHT

Kurzfassung

Abstract

- 1. Einleitung**
- 2. Simulation und Modell-Bildung**
- 3. Simulations-Anwendung (Anmerkungen)**
- 4. Konzeption einer Vorgehensmethode**
- 5. Versuchs- und Optimierungs-Strategien**
- 6. Parameter-Reduktion**
- 7. Versuchsplanungs-Methode**
- 8. Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche**
- 9. Schlussfolgerungen und Ausblick**

Anhang

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Kurzfassung	1
Abstract	2
1. Einleitung	3
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	3
1.2 Ziel der Arbeit	4
1.3 Abgrenzung der Arbeit	6
1.4 Aufbau der Arbeit	7
2. Simulation und Modell-Bildung	10
2.1 Definitionen	11
2.2 Einordnung der Simulation	14
2.2.1 Betrachtungsebenen der Simulation	14
2.2.2 Einsatzgebiete	16
2.2.3 Einsatzarten	17
2.2.4 Einsatzebenen	19
2.3 Simulations-Ziele / -Ergebnisse	20
2.3.1 Gründe für den Simulations-Einsatz	20
2.3.2 Simulations-Ziele	23
2.3.3 Ergebnisse	24
2.4 Nutzen / Aufwand der Simulation	25
2.4.1 Wirtschaftlichkeit und Kostenaspekte	25
2.4.2 Alternativen zur Computer-Simulation	26
2.5 Modell-Bildung	28
2.5.1 Modell-Klassifikation	28
2.5.2 Modell-Konzeption	30
2.5.3 Modellierungsgenauigkeit	35
3. Simulations-Anwendung (Anmerkungen)	38
3.1 Einsatzhemmnisse / Forderungen	38
3.1.1 Vorgehensfehler	39
3.1.2 Gefahren in der Anwendung	41
3.2 Qualitätssicherung	44
3.3 Vorgehensmodelle: Beispiele	45
3.3.1 Vorgehensschema nach ASIM	46
3.3.2 Vorgehensschema nach VDI-Richtlinie 3633	47

3.3.3	Vorgehensschema nach SHANNON	49
3.3.4	Summarische Beurteilung weiterer Vorgehensweisen	50
4.	Konzeption einer Vorgehensmethode	52
4.1	Einsatzdefinition	54
4.1.1	Situationsanalyse	54
4.1.2	Zielformulierung	55
4.1.3	Problemabgrenzung	56
4.1.4	Versuchsplanung mit Versuchsmatrix	57
4.2	Modell-Bau	59
4.2.1	Modell-Konzeption	59
4.2.2	Datenerhebung	60
4.2.3	Modell-Erstellung	61
4.2.4	Verifikation	61
4.2.5	Validierung	62
4.3	Simulations-Läufe	63
4.3.1	Variation	64
4.3.2	Optimierung der Lösungsvariante	64
4.3.3	Interpretation	66
4.4	Lösungsempfehlung	67
4.4.1	Dokumentation	67
4.4.2	Umsetzung	67
5.	Versuchs- und Optimierungs-Strategien	68
6.	Parameter-Reduktion	72
6.1	Grundlagen	73
6.1.1	Allgemeine Begriffe aus der Literatur	73
6.1.2	Spezielle Definitionen	76
6.1.3	Parametrisierung	78
6.2	Verfahren zur Parameter-Reduktion	79
6.2.1	Allgemeine Ansätze zur Reduktion	80
6.2.2	Konzept Prioritätsmatrix	81
6.2.3	Beeinflussungsmatrix	82
6.2.4	Konzept Abhängigkeitsmatrix	84
6.3	Vorgehenskonzept Parameter-Reduktion	87
6.4	Beispiel für die Parameter-Reduktion	89
6.4.1	Beispiel: 1. Stufe (Intuitive Reduktion)	89
6.4.2	Beispiel: 2. Stufe (Prioritätsmatrix)	94
6.4.3	Beispiel: 3. Stufe (Abhängigkeitsmatrix)	95
6.4.4	Beispiel: Ergebnis	97

7.	Versuchsplanungs-Methode	99
7.1	Notwendigkeit der Versuchsplanung	100
7.2	Definitionen und allgemeine Erklärungen	102
7.3	Vorgehen bei der Versuchsdurchführung	105
7.4	Generelle Prinzipien der Versuchsplanung	107
7.5	Versuchsdurchführung	110
7.5.1	Trial and Error-Vorgehen	110
7.5.2	One by One-Versuchsplan	111
7.5.3	Ein-Faktor-Versuch mit Stochastik	111
7.5.4	Voll- und teilfaktorielle Versuchsplanung	112
7.6	2^n -Versuchsplan	113
7.6.1	Aufbau von vollständigen 2^n -Versuchsplänen	114
7.6.2	"Null"-Versuch	115
7.6.3	Reduktion und Vermengung von Versuchsplänen	117
7.6.4	Auswertung von 2^n -Versuchen	121
7.6.5	Ergebnisdarstellung	123
7.7	Versuchs-Strategie für 2^{n+1} -Versuchsreihen	127
8.	Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche	129
8.1	Problemstellung	129
8.2	Diskrete Optimierung	131
8.2.1	Optimierungs-Verfahren	132
8.2.2	Heuristische Suchstrategien	135
8.2.3	Eindimensionale Suche	135
8.2.4	Mehrdimensionale Suche	136
8.3	Such-Konzept, Startwert-Problem	139
8.3.1	Erklärungsbilder "Suche von oben"	140
8.3.2	Konkrete Beschreibung des Such-Konzeptes	143
8.3.3	Rezept für die praktische Anwendung	145
8.4	Diskussion des Such-Konzeptes	147
9.	Schlussfolgerungen und Ausblick	149

Anhang

KURZFASSUNG

Der grosse Wettbewerbsdruck erfordert eine rasche und effiziente Bewältigung der logistischen und strukturellen Defizite. Die diskrete *Computer-Simulation* - als *Schlüsseltechnologie* zur Lösung entsprechender Probleme - gewinnt eine immer grössere strategische Bedeutung.

Trotz der grossen Akzeptanz und der zunehmenden Verbreitung beinhaltet die Computer-Simulation einige aus der Praxis resultierende Einsatzhemmnisse, die es zu beseitigen gilt. Die Intention jeder Simulations-Anwendung muss es sein, möglichst schnell und möglichst kostengünstig die geforderte Unterstützung zu liefern.

Um die vorhandenen Defizite zu beheben, muss die Simulations-Anwendung kritisch ausgeleuchtet und beurteilt werden. Daraus sind dann Vorschläge zur Behebung abzuleiten. Dabei haben die gefundenen Aussagen auch qualitativen Kriterien zu genügen.

Die Arbeit hat das Ziel, bestehende Schwächen zu beheben bzw. auszugleichen und den Simulations-Einsatz anwendergerecht zu unterstützen, um die Planungsqualität sowie die Produktivität, d.h. die Nutzen/Aufwand-Relation der Simulation, zu erhöhen. Dieser Beitrag beinhaltet ein methodisches Instrumentarium zur Durchführung von Simulations-Studien. Dem Anwender werden bei den unterschiedlichsten logistischen Ablauf- und Strukturfragen schnell effiziente Lösungsalternativen aufgezeigt und optimiert.

Durch die Erfüllung dieser Zielsetzung wird eine verbesserte Akzeptanz der Computer-Simulation als eine analytische Methode in der Industrie erreicht.

Die in dieser Dissertation vorgeschlagenen Konzepte gelten für die diskrete Computer-Simulation von formalen Modellen im Rahmen der betrieblichen Leistungserstellung.

Die Ergebnisse gliedern sich in vier Teilbereiche:

1. Ein effizientes und zielgerichtetes Vorgehenskonzept für die Simulation unter Berücksichtigung der Qualitätssicherung, auf der Grundlage des *Systems Engineering* nach BWI der ETH Zürich
2. Entwicklung und Vorstellung einer Systematik zur Parameter-Reduktion im Rahmen der Modellkonzeption und als Vorarbeit zur Versuchsplanung
3. Integration der statistischen Versuchsplanung in die Simulation zur Systematisierung der Versuchsreihenfolge und Reduktion des erforderlichen Versuchsumfanges sowie zur vereinfachten anschliessende Auswertung der Simulations-Versuche
4. Ansatz zur schnelleren simulationsunterstützten Optimierung der Parameter in n-dimensionalen Zielräumen mittels einer neuen heuristischen Suche. Diese Heuristik beinhaltet auch einen speziellen Startwert.

Schlagworte: Computer-Simulation, Vorgehensmethode, Parameterreduktion, Versuchsplanung (DOE), Parameteroptimierung

ABSTRACT

Strong competition demands fast and efficient instruments to overcome logistical and structural deficits. Therefore discrete *Computer-Simulation* as a *Key-Technology* gains more and more in strategic importance.

Despite a good acceptance and common use, computer simulation contains some limitations, which need to be eliminated. The aim of each use of simulation must be to supply quick and economical support.

To eliminate existing shortcomings, simulation applications have to be first critically evaluated and judged. On this basis proposals for improvement can be presented. These proposals need to satisfy also some qualitative criteria.

The target of this thesis is to bridge over existing gaps, to compensate for existing weaknesses and to support simulation applications in order to increase planning quality and productivity thereby improving the profit/cost relation of simulations. The thesis contains fast and efficient methodical instruments for simulation which help to show forth and optimize alternative solutions for different problems of structure design and procedures in logistics.

By accomplishing this goal, improved acceptance of computer simulation as an analytical method would be achieved in industry.

The proposed concepts are valid for discrete computer simulation of formal models in industrial processes.

The results are divided into four parts:

1. An efficient procedure for computer simulation under consideration of quality assurance, based on the methodology of *Systems Engineering* developed at the Institute for Management and Industrial Engineering (BWI) of the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich. A roadmap to successful simulation
2. Development and presentation of a systematic approach to parameter-reduction in the course of model conception and as a preparation to experimental design
3. Integration of statistical design of experiments (DOE) into the simulation in order to systematize the series of experiments, to reduce the required number of simulation runs and to simplify the follow up of experiments
4. An approach to support a faster way of parameter optimization for simulation in n-dimensional scope with a new heuristic searching method, based on a special starting point

Keywords: Computer Simulation Method, Quality, Experimental Design (DOE), Parameter Optimization

1. EINLEITUNG

1.1 AUSGANGSLAGE UND PROBLEMSTELLUNG

Die Betriebsorganisation und die Fabrikplanung beschäftigen sich mit der mittel- bis langfristigen Auslegung von Unternehmen. Sie müssen daher sowohl den aktuellen Stand der Technik als auch zukünftige Entwicklungsrichtungen und Markttrends aufgreifen und effizient umsetzen.

Der Markt fordert von allen Unternehmen zunehmend eine höhere Flexibilität bezüglich des Auftragsvolumens sowie der Produktevarianten und das bei immer kürzeren Lieferfristen. Die Entscheidungsprobleme, vor die sich ein Unternehmen heute in immer schnellerer Folge gestellt sieht, sind von einer stark zunehmenden Integration und Komplexität betrieblicher Systeme und Strukturen gekennzeichnet.

Im Umfeld der betrieblichen Leistungserstellung¹ werden laufend Projekte zum Aufbau, zur Kostensenkung, zur Effizienzsteigerung oder zur Reorganisation durchgeführt. Verschiedene Konzepte bzw. Schlagworte, wie z.B. Lean-Production, Time Based Management, Just In Time, CIM, flexible Automatisierung, finden dabei Eingang in die Zielsetzung der einzelnen konkreten Projekte.

Nicht nur auf der Seite der Projektziele gibt es Trends, sondern auch bei den Planungshilfsmitteln, z.B. die Simulation oder das Facility Management² sowie viele neue, verbesserte Vorgehensmethoden. Diese Hilfsmittel und Methoden finden zunehmend Eingang in die betriebliche Praxis.

In einem sich verändernden Umfeld ist es notwendig, einzelne Hilfsmittel kritisch auszu-leuchten, zu beurteilen und Vorschläge zur Behebung von vorhandenen Defiziten beim Einsatz vorzuschlagen.

Das Bedürfnis für diese Forschungsarbeit entstand durch langjährige Anwendung der diskreten Computer-Simulation im Rahmen von Beratungsmandaten bei diversen Unternehmen, primär in der Betriebsplanung und Reorganisation. Dieses Bedürfnis wurde im speziellen durch folgende Umstände ausgelöst:

¹ Vgl. HUBER 91, S. 40.

² Facility Management ist die Bündelung verschiedener technisch/planerischer Funktionen zu einem integrierten und dynamischen Gebäude-, Anlagen- und Installationsmanagement. Vgl. HENZLER, HEIDBREder 89, S. 31.

- Allgemeine Vorgehensschemata zur Computer-Simulation berücksichtigen die Aspekte der Versuchsplanung und Qualitätssicherung nur ungenügend. Zudem erlauben sie keine verbindliche Aufwandabschätzung zu Beginn eines Projektes.
- Ein ungeplantes Vorgehen in der Versuchsdurchführung und -auswertung erfordert eine sehr hohe Zahl an notwendigen Versuchen. Weiter ergeben sich durch die Variation der Einstellgrößen oft Schwierigkeiten bezüglich der Verifikation (Überprüfung der korrekten internen Modell-Lauffähigkeit) und Validierung (externen Überprüfung bezüglich Realität)³. Es folgen Unklarheiten bei der objektiven Einordnung von erhaltenen Einzelergebnissen. Zudem ist das intuitive Vorgehen sehr zeitaufwendig.
- Bestehende ungenutzte Potentiale der zielgerichteten Optimierung der Ergebnisse bei grossen Simulations-Modellen. Die gebräuchliche Optimierung mit der Simulation beruht auf einer intuitiven Vorgehensweise, die eine langjährige Erfahrung des Anwenders im Umgang mit ähnlichen Problemen voraussetzt. Dabei ist die Nachvollziehbarkeit häufig nicht gewährleistet.
Das Problem der Modell-Optimierung wird erschwert, indem sich bei der Änderung von beliebigen Parametern auch das Modell ändert. Dies führt häufig zu Unstetigkeiten bei den Modell-Ergebnissen. Eine allgemeine geschlossene Lösung auf analytischer Basis⁴ gilt wegen der Vielfalt der möglichen Modell-Varianten, in Abhängigkeit von der jeweiligen Fragestellung, als unmöglich.

Die Mängel, die sich einerseits bei der konkreten Anwendung auf der Benutzerseite ergeben und andererseits Fehler in den heute kommerziell verfügbaren Simulations-Paketen, sind mit Sicherheit dafür verantwortlich, dass sich die Simulation, im Gegensatz zu anderen Instrumenten, bis heute in der Praxis noch nicht auf breiterer Basis durchgesetzt hat.

Die Aussagen dieser Arbeit haben ihren Erfahrungshintergrund im Umfeld der Produktion, gelten jedoch auch ohne Einschränkung für die Simulations-Anwendungen im Dienstleistungsbereich.

1.2 ZIEL DER ARBEIT

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Erhöhung von Nutzen und Effizienz bei der Simulations-Anwendung zu erreichen und damit eine bessere Akzeptanz bei deren Einsatz zu erzielen. Die Steigerung der Effizienz beim Simulations-Einsatz soll durch folgende vier Punkte erreicht werden:

³ Eine ausführliche Begriffsbestimmung ist in den Abschnitten 4.2.4 "Verifikation" und 4.2.5 "Validierung".

⁴ Mathematisch geschlossen d.h. formelmässig.

- **Vorgehensmethode**
Eine klare Vorgehensmethode ermöglicht es, die Grösse des Simulations-Aufwandes zu schätzen. Eine Systematik ermöglicht eine Kalkulation und Begrenzung des Aufwandes, d.h. die Aussagequalität - für die quantitativen wie auch für die qualitativen Ergebnisse - resultiert aus der Vorgabe und ist nicht willkürlich.
- **Parameter-Reduktion**
Dieser Punkt ist eine Vorarbeit zur Versuchsplanung und Optimierung. Er beinhaltet die systematische Reduktion der möglichen auf die nötigen Parameter. Die Erkenntnisse fliessen auch in die Modell-Konzeption ein.
- **Versuchsplanung**
Die Simulation soll effizienter eingesetzt werden. Ausgehend von der jeweiligen Zielsetzung und der Modellart ist ein Maximum an Ergebnissen durch eine möglichst geringe, kalkulierbare Anzahl von Simulations-Läufen anzustreben.
- **Optimierung**
Die Suche eines "Optimums" für beliebige Fragestellungen muss effizienter erfolgen, primär erreicht durch eine geschickte Wahl eines Startpunktes für die Suche.

Dabei ist ein methodischer und in der Praxis nachvollziehbarer Ansatz einer theoretischen, geschlossenen mathematischen Lösung vorzuziehen. Viele Probleme sind in der Praxis nicht geschlossen lösbar.

Zusammenfassend beinhaltet diese Arbeit das Erarbeiten eines methodischen Instrumentariums für Simulations-Hilfsmittel, um bei den unterschiedlichsten logistischen Ablauf- und Strukturfragen schnell effiziente Lösungsalternativen aufzuzeigen, zu beurteilen und zu optimieren. D.h. es soll bei der Simulations-Anwendung eine Verbesserung des heutigen Nutzen/Aufwand-Verhältnisses erreicht werden.

Die praktische Bedeutung dieser Arbeit lässt sich demnach wie folgt umreissen:

- Steigerung der Produktivität des Planers und der Qualität der erzielten Aussagen unter Einbezug der Computer-Simulation
- Senkung der Planungskosten in Betriebsplanungs- und bei Rationalisierungs-Projekten, in denen die Simulation eingesetzt wird
- Schnellere Planungsergebnisse mit einer grösseren Genauigkeit unter Vermeidung von Fehlplanungen

Die wissenschaftliche Bedeutung dieser Arbeit ergibt sich durch:

- Erweiterung des Systems Engineering auf Simulations-Anwendungen, dargestellt in einem Vorgehenskonzept

- Systematisierung der Parameter-Reduktion bei einer grossen Anzahl von Parametern
- Integration der statistischen Versuchsplanung in die Simulation
- Vorstellen einer Heuristik zur Systemoptimierung mit Hilfe der Simulation

Das Ergebnis dieser Arbeit ist nicht auf eine spezielle Simulations-SW appliziert, sondern muss für allgemein auf dem Markt etablierte diskrete Simulations-Pakete anwendbar sein.

1.3 ABGRENZUNG DER ARBEIT

Dieses Kapitel enthält generelle Vorgaben für die gesamte Arbeit.

Zur Positionierung der Arbeit sind prinzipiell folgende Simulations-Einsatzgebiete und -ebenen denkbar:

1. in der Betriebsplanung, d.h. auf der strategischen und konzeptionellen Ebene von Unternehmen (Strukturplanung, System Design)
2. in der Detailplanung auf Stufe des Fachengineerings (z.B. konkrete Maschinen-aufstellung, Layout)
3. im Betrieb der Fertigungssteuerung vorgelagert
4. in einer lokalen Bereichssteuerung, z.B. in einem Leitstand

Die Arbeit ist primär im Bereich der Strukturplanung (1. Punkt) positioniert und beinhaltet keine wissenschaftlich motivierten Untersuchungen von generellen Steuerungskonzepten (Prioritätsregeln) etc.

Weitere Vorgaben bzw. Randbedingungen:

- Die diskrete dynamische Computer-Simulation, im folgenden kurz als Simulation benannt, wird als adäquates Instrument für die Betriebsplanung akzeptiert und nicht in Frage gestellt.
- Die Modell-Programmierung, das Umsetzen der Modell-Konzepte auf einem Computer, ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.
- Die aus der Arbeit abgeleiteten Erkenntnisse sollen unabhängig von einem speziellen Simulations-Paket sein.
- Die Zeitabhängigkeit der zu simulierenden Systeme wird im Rahmen dieser Arbeit, wenn immer möglich, als deterministisch und nicht als stochastisch (Monte Carlo -Simulation) angesehen.

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit stellt sich die Frage, auf welcher Stufe Erkenntnisse, Standards, Planungsregeln und Methoden transferierbar sind. Sicher ist, dass mit jeder Konkretisierungsstufe, angefangen von der Stufe Methode über die Problemlösung bis hin zum Vorgehen bei der Realisierung, die Uebertragbarkeit der Erkenntnisse abnimmt.

Daraus ergibt sich der Schluss, dass der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Ebene von Vorgehensmethoden liegen muss. Dabei basieren diese Vorgehensmethoden auf einem rechnerunterstützten Hilfsmittel, der Simulation, als modernes und zeitgemässes Planungsinstrument.

1.4 AUFBAU DER ARBEIT

Aus den Ausführungen zum Ziel der Arbeit folgt die Forderung, dass zur Steigerung der Effizienz beim Einsatz der Simulation entsprechende Strategien und Methoden gefunden werden müssen, um die Zahl notwendiger Iterationsschritte zu minimieren und damit die Zielfindungszeit zu verkürzen.

Um eine Methode zu entwickeln, die eine rationelle computerbasierte Problemlösung mit Hilfe der diskreten Simulation erlaubt, wurde die vorliegende Arbeit wie folgt gegliedert (vgl. auch Tabelle Nr. 1):

Im Anschluss an die Einleitung wird im nächsten Kapitel "Simulation und Modell-Bildung" die diskrete Computer-Simulation behandelt. Beginnend mit einem allgemeinen Ueberblick über die Simulations-Technik wird beschrieben, in welchen Situationen und unter welchen Bedingungen die Simulation üblicherweise zur Anwendung gelangt. Im Anschluss daran erfolgt eine Einführung in die Problematik der Modell-Bildung.

Im dritten Kapitel "Simulations-Anwendung" werden im Anschluss an verschiedene allgemeine Grundsätze einige ausgewählte bekannte Vorgehensschemata aus der Literatur dargestellt und anhand einer Schwachstellenanalyse im Hinblick auf Ansatzpunkte für Verbesserungen untersucht. Daraus sind Anforderungen an eine zu entwickelnde Vorgehensmethode abgeleitet.

Diese Erkenntnisse finden in Kapitel vier "Konzeption einer Vorgehensmethode", gemeinsam mit den SE-Grundsätzen⁵ und unter besonderer Berücksichtigung der Qualitätssicherung in der Simulation, Eingang in einen Vorschlag für eine umfassende Vorgehensmethode. Das neue, aus der Erfahrung resultierende Vorgehensmodell bildet die Basis für die folgenden Kapitel im Sinne einer effizienten und qualitativ ausreichenden Simulations-Anwendung.

⁵ SE: Systems Engineering, Methodik bzw. Leitfaden zur allgemeinen Problemlösung. Vgl. HABERFELLNER et al 92.

1. Einleitung	
Grundlagen	Vertiefung
2. Simulation und Modell-Bildung	5. Versuchs- und Optimierungs-Strategien
3. Simulation-Anwendung (Anmerkungen)	6. Parameter-Reduktion
4. Konzeption einer Vorgehensmethode	7. Versuchsplanungs-Methode
	8. Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche
9. Schlussfolgerungen und Ausblick	
Anhang	

Tabelle 1: Gliederung der Dissertation

Das fünfte Kapitel "Versuchs- und Optimierungs-Strategien" dient als Einleitung für die folgenden Kapitel. Dieses Kapitel fünf stellt einen Bezug der drei nachfolgenden Kapitel "Parameter-Reduktion", Versuchsplanungs-Methode" und "Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche" zueinander her.

Als erster Schritt der Versuchs- und Optimierungs-Strategien wird im sechsten Kapitel die "Parameter-Reduktion" erarbeitet. Es werden Verfahren zur Erfassung, Einordnung und Reduktion von Parametern/Variablen behandelt. Dieses Kapitel beinhaltet auch einen Vorschlag für die Verwendung einer reduzierten Beeinflussungsmatrix⁶ zur Parameter-Reduktion.

Das Kapitel sieben "Versuchsplanungs-Methode" beinhaltet die Integration einer faktoriellen Versuchsplanung in die Simulation. Es wird ein Weg aufgezeigt, um mit weniger Simulations-Läufen qualitativ bessere Ergebnisse zu erhalten. Diese Effizienzsteigerung erfolgt in Übereinstimmung mit den spezifischen Zielen. Die Versuchsplanung ist eine Vorarbeit für die Simulation, welche häufig unterschätzt oder gar vernachlässigt wird.

Ein neues Such-Konzept für die "Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche" bei der Simulations-Anwendung wird im folgenden Kapitel acht erläutert. Nach einer kurzen sum-

⁶ In der Literatur auch als Paarwertvergleich oder Papiercomputer bezeichnet.

marischen Darstellung der in dieser Arbeit in Betracht gezogenen allgemeinen Lösungsverfahren wird erklärt, welche Auswahlkriterien zugrunde gelegt wurden, um eine Beurteilung bezüglich einer Eignung zu treffen. Anschliessend wird ein Such-Konzept zur heuristischen Optimums-Suche ausführlich beschrieben. Die Lösungs-Suche erfolgt durch die Umkehrung der Suchrichtung - die Suche von oben - kombiniert mit einem orthogonalen Suchschema. Durch die Umkehr der Suchrichtung, d.h. Wahl eines speziellen Startpunktes für die Suche, lässt sich der Iterationsaufwand bei der Optimierung durch die Simulation drastisch senken und das bei gleichzeitig besseren Ergebnissen. Dieser Schwerpunkt baut direkt auf dem Kapiteln Parameter-Reduktion auf.

Im letzten Kapitel "Schlussfolgerungen und Ausblick" wird aufgezeigt, inwieweit unter Berücksichtigung allgemeiner Trends in der Simulation die gewonnenen Erkenntnisse verwendet werden können und wo eine ergänzende Forschung als Fortsetzung dieser Arbeit nützlich ist.

2. SIMULATION UND MODELL-BILDUNG

Die zunehmende Rationalisierung und Automatisierung von Fertigungsprozessen führt zunehmend zu vernetzten Systemen, die sich in ihren dynamischen Abläufen sowie im Verhalten gegenseitig beeinflussen. Die Erfahrung lehrt uns, dass die Dynamik bzw. die dynamische Betrachtung im Rahmen einer Planung von Prozessen eine immer grössere Bedeutung gewinnt. Dies gilt z.B. für die Dimensionierung und auch für die Kapazitäts-, DLZ-⁷ sowie Störungsbetrachtungen.

Ein wertvolles Hilfsmittel bei der Neu- und Umplanung dynamischer Systeme aller Art bildet die Simulation. Der Einsatz von Simulations-Techniken bietet sich für die Betrachtung von Materialfluss-, Fertigungs-, Prüf- und Montageabläufen an. Die Simulation ist vor allem ein Hilfsmittel, um die Komplexität von Systemen besser zu beherrschen, wobei es ein Irrtum wäre anzunehmen, sie löse eine Planungsaufgabe. Sie ersetzt den Planungsfachmann nicht, sondern gibt ihm ein wirkungsvolles und leistungsstarkes Werkzeug in die Hand. Dabei wird die Realität in einem Modell nachgebildet, an dem Simulations-Experimente durchgeführt werden. Die durch die Simulation gewonnenen Daten zu den einzelnen Systemkomponenten wie Auslastung, Pufferbelegung und Durchlaufzeit werden dann analysiert, um Ansatzpunkte für denkbare Verbesserungen zu finden. Die Simulation hat u.a. den Vorteil, dass eine grosse Anzahl möglicher Lösungen bzw. Varianten vorgängig zur Realisierung analysiert werden können, ohne dass es störender Betriebsversuche in der Produktion bedarf.

Die Simulation ist nicht auf als ganzes überschaubare Systeme beschränkt. Es genügt, wenn die einzelnen Zusammenhänge isoliert bekannt sind und sich im Simulations-Modell einzeln beschreiben (abbilden) lassen. Auf diese Art erhält man "Antworten" zum Verhalten des gesamten Systems welches sonst nicht erfassbar wäre.

Allerdings ist zu beachten: Die Simulation ist kein Ersatz für mathematische Lösungs- oder Optimierungs-Verfahren⁸. Sie liefert kein analoges Ergebnis, wie z.B. die Lineare Optimierung, welche nach Erfassen der Aufgabe "selbständig" ein Optimum liefert. Die Simulation bedarf zur Optimierung zusätzlicher Interaktionen oder Heuristiken. Sie stellt nur ein Hilfsmittel zur Lösung auf experimentellem Weg dar⁹. Die Bestimmung einer optimalen Lösung ist identisch mit der Entwicklung einer Vorschrift zur Variablen- bzw. Parameter-Variation, mit deren Hilfe die optimale Variablen- bzw. Parameter-Konstellation ermittelt wird¹⁰.

Bei diesem Kapitel handelt es sich um eine Beschreibung der Grundlagen für die vorliegende Arbeit. Besonders sei hier auf das Kapitel Nr. 2.4 "Nutzen/Aufwand der Simulation"

⁷ DLZ: Durchlaufzeit.

⁸ Die Simulation ist dann sinnvoll, wenn mathematische Verfahren wegen Systemkomplexität oder speziellen Fragestellungen nicht mehr anwendbar sind.

⁹ Die Anwendung der Simulation wird oft als ein heuristisches Vorgehen beschrieben.

¹⁰ Vgl. KOXHOLT 71, S. 131.

hingewiesen. Einzelne Aspekte werden über dieses Kapitel hinaus vertieft, so z.B. das Vorgehen bei der Anwendung und die Qualitätssicherung in der Simulation, die im dritten und vierten Kapitel dieser Arbeit behandelt sind.

2.1 DEFINITIONEN

Zum besseren Verständnis sind diesem Kapitel einige Definitionen vorangestellt.

System

Zunächst einige typische Systemdefinitionen und Aussagen, um die Breite der Verwendung des Begriffes zu demonstrieren:

Ein System ist eine Gesamtheit von Elementen mit Beziehungen zwischen diesen Elementen und ihren Eigenschaften. ¹¹

Ein System ist eine Anzahl von miteinander in Beziehung (Wechselwirkung) stehenden Teilen, die zu einem gemeinsamen Zweck miteinander operieren. Dabei kann ein System sowohl Menschen als auch Sachen umfassen. ¹²

Systeme sind etwas völlig anderes als eine wahllose Menge von Teilen. Selbst wenn wir die Struktur eines Systems erkennen, sagt uns dies noch äusserst wenig über sein Verhalten. Erst seine innere Dynamik offenbart uns sein eigentliches Wesen, seine kritischen Stellen, seine Stärke und seine Empfindlichkeit. ¹³

Ein System ist ein Ganzes, das aus mehreren Elementen und den Beziehungen zwischen diesen besteht, so dass auf Grund der Aktivitäten der Elemente und der Dynamik der Beziehungen das System zu Funktionen fähig ist, zu denen keines der Elemente für sich alleine fähig wäre.

Dies führt zur Erkenntnis, dass ein System mehr ist als die Summe seiner Teile; ein System weist gegenüber seinen Elementen neue, eigenständige Eigenschaften auf, die sogenannten "systemischen" Eigenschaften. ¹⁴

Komplexe Systeme weisen eine Vielzahl von Subsystemen mit entsprechend vielen und vielgestaltigen Beziehungen auf. Die Subsysteme haben unterschiedliche Funktionen und Eigenschaften. Auch die Eigenschaften der Beziehungen sind unterschiedlich. ¹⁵

Ein System wird als determiniert bezeichnet, wenn seine Elemente in eindeutig voraussagbarer Weise aufeinander einwirken und die Eigenschaften der Elemente mit Bestimmtheit

¹¹ In BÜCHEL 90 Teil "Systemdenken", S. 9, nach KOSIOL.

¹² Vgl. FORRESTER 72, S. 9.

¹³ VESTER 80, S. 26.

¹⁴ Vgl. BÜCHEL 90 Teil "Systemdenken", S. 10.

¹⁵ BEHRENDT 74, S. 37.

vorausgesagt werden können (i.d.R. Simulations-Modelle ohne Stochastik). Sind darüber Prognosen nur mit einer Wahrscheinlichkeit kleiner als eins zu finden, dann handelt es sich um probabilistische Systeme. ¹⁶

Hier in dieser Arbeit steht der Begriff "System" für eine reale, zu untersuchende, abgegrenzte (evtl. auch nur für eine planungsreale, gedachte) Einheit mit einer Menge von Elementen mit bestimmten Eigenschaften und einer Menge von Beziehungen zwischen diesen Elementen.

Ein System im Sinne der Simulation besteht aus Grundelementen der Lager-, Förder- und Umschlagstechnik sowie aus Elementen der Fertigung und/oder Montage, die wiederum Untersysteme enthalten können. Daneben gibt es logistische Elemente, wie Information und Steuerung. Alle Elemente eines Systems werden mit ihren logischen Verknüpfungen in ein Modell umgesetzt. Jedes System ist auch gleichzeitig ein Subsystem eines übergeordneten Systems. Die Gesamtheit aller Elemente und Beziehungen wird als Struktur bezeichnet. ¹⁷

Zur Vertiefung des Systembegriffs sei BÜCHEL 90, Teil Systemdenken, S. 7 ff. empfohlen.

Modell

SHANNON definiert den Begriff Modell folgendermassen:

Ein Modell ist eine Darstellung eines Objektes, eines Systems oder einer Idee in einer anderen Form als durch sich selbst. ¹⁸

BÜCHEL definiert Modell wie folgt:

Ein Modell ist allgemein ein Abbild von etwas Bestehendem oder Vorbild für etwas zu Schaffendes, insbesondere ist jede Beschreibung eines Systems ein Modell. ¹⁹

Nach HUBKA gilt:

Das Modell ist eine Nachbildung (Repräsentation) des realen Gebildes oder des Prozesses bzw. der Idee (Hypothese) durch geeignete Mittel. Die Beziehungen zwischen dem Modell und dem Original sind die Relationen (Ähnlichkeitsgesetze). Man muss sich zuerst klar werden, von welchem Gesichtspunkt aus die Ähnlichkeit zwischen dem Modell und dem Original interessiert, d.h. welche Eigenschaften im Modell zum Ausdruck gebracht und welche Ziele angestrebt werden sollen. Im Gegensatz zu einem Prototyp sind am Modell meist nur gewisse Eigenschaften wie Verhalten, Struktur, Gestalt etc. feststellbar. Das Modell hat immer ein bestimmtes Ziel. Es geht nicht nur um die Ermittlung von Eigenschaften, sondern es dient auch als Mittel zur Kontrolle, Kommunikation, Instruktion oder

¹⁶ Vgl. VOGT 83, S. 75.

¹⁷ Vgl. METZLER, ACÉL 87, S. 240.

¹⁸ Vgl. SHANNON 75, S. 4.

¹⁹ BÜCHEL 90, Teil Systemdenken, S. 34.

Unterweisung. Die Gesetzmässigkeiten der Aehnlichkeit sind Gegenstand der Aehnlichkeitstheorie. ²⁰

Für diese Arbeit ist ein Modell ein Abbild eines Systems zum Zwecke von Untersuchungen mittels der Simulation. Die notwendige modellmässige Auflösung eines Systems hängt nicht von der System-Komplexität ab, sondern von der jeweiligen Fragestellung. Ein Modell unterscheidet sich durch Vereinfachung, Dimension etc. vom Duplikat, d.h. ein System ergibt unter verschiedenen Fragestellungen unterschiedliche Modell-Abbildungen. Ein Modell ist immer ein Abbild eines Systems, es beinhaltet so eine Abbildungsrelation. Prinzipiell kann ein Modell auch wieder als ein System verstanden werden, da es alle dazu notwendigen Merkmale enthält. Trotzdem ist hier das System immer die Vorlage und das Modell immer das Abbild.

Mehr über Modelle findet sich im Kapitel Nr. 2.5 "Modell-Bildung" und in BÜCHEL 90, Teil Systemdenken, S. 34 ff.

Simulation

Der Begriff "Simulation" leitet sich aus dem lateinischen "simulare" ab und bedeutet soviel wie "nachbilden, nachahmen, etwas vortäuschen". ²¹

Die Simulations-Anwendung in der Planung und Entwicklung ist nicht auf ein Fachgebiet oder eine spezielle Einsatzart beschränkt. Die Simulation ist auch nicht an die Verwendung von Computern gebunden ²². Es kann sowohl mit physischen Modellen als auch mit rein gedanklichen Modellen simuliert werden.

Die VDI-Richtlinie 3633 definiert "Simulation" folgendermassen ²³:

Simulation ist die Nachbildung eines dynamischen (zeitabhängigen) Prozesses in einem System mit Hilfe eines experimentierfähigen Modells, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.

Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulations-Modell verstanden.

KAPOUN hält ergänzend fest ²⁴:

Die Simulation ist ein durch experimentelles Vorgehen gekennzeichnetes heuristisches Verfahren. Sie produziert keine Lösungen und Entscheidungen, sondern hilft sie zu finden.

²⁰ Vgl. HUBKA 84, S. 137 f.

²¹ Similis (lat.): ähnlich.

²² Es ist anzumerken: Die diskrete Simulation hat erst durch die zunehmende Leistungsfähigkeit der Computer einen breiteren Zugang in Praxis und Forschung gefunden.

²³ Vgl. VDI-Richtlinie 3633, S. 3.

²⁴ Vgl. KAPOUN 88, S. 14.

Der Begriff "Simulation", wie er in dieser Arbeit verwendet wird, hat Prozesse und Abläufe - also zeitabhängiges Geschehen - realer Systeme bzw. von deren Modellen zum Gegenstand und besitzt daher einen ausgeprägt dynamischen Charakter. Die Simulation besteht in der Durchführung von Experimenten an entsprechenden Modellen, indem vorgegebene Eingangsgrößen (Einstellgrößen) in Ausgangsgrößen (Ergebnisse) transformiert werden.

Des Weiteren hält sich diese Arbeit an die Definition der VDI-Richtlinie 3633 und geht von computerunterstützter diskreter (ereignisorientierter) Simulation aus.

Simulations-Experiment

Ein Experiment ist die gezielte empirische Untersuchung des Verhaltens eines Systems bzw. Modells mit den darin ablaufenden Prozessen durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Variation einer oder mehrerer System- und/oder Prozessparameter.²⁵

2.2 EINORDNUNG DER SIMULATION

Die früher bevorzugte Vorgehensweise, derartige Systemzusammenhänge (Beziehungen) mit Hilfe mathematischer Formeln quantitativ zu erfassen und danach mit Hilfe von Algorithmen ein Optimum zu bestimmen, versagt immer dann, wenn sich keine geschlossenen mathematischen Ausdrücke formulieren lassen. Ändert sich die Art der Beziehungen in einem System in stochastischer Abhängigkeit von der Wertekonstellation der Einflussfaktoren, ist ein System mathematisch nicht darstellbar.

Deshalb wurde in der früheren betrieblichen Praxis die Simulation meist nur auf Probleme mit stochastischen Prozessen angewendet, obwohl ihr Anwendungsgebiet prinzipiell alle Arten von Systemen umfasst, deren Zustand zeit- und bedienungsabhängig veränderlich ist²⁶.

Die grossen Fortschritte auf dem Computersektor haben eine weitgehende Verdrängung der früher in der Praxis gebräuchlichen Instrumente wie die Warteschlangentheorie oder die analoge Simulation bewirkt, die nur noch von Spezialisten beherrscht werden. Heute wird die digitale, diskrete Simulation bevorzugt.

2.2.1 Betrachtungsebenen der Simulation

Methodisch kann innerhalb eines Projektes zwischen der konzeptionellen Planung und der Simulations-Anwendung i.e.S. unterschieden werden. Dabei ist die Simulation ein allgemeines Hilfsmittel zur Untersuchung konzeptioneller Varianten. Zur vertieften methodi-

²⁵ Ein Experiment ist ein Test mit definierten Randbedingungen. Vgl. VDI-Richtlinie 3633, S. 3.

²⁶ Vgl. KOXHOLT 71, S. 329 ff.

schen Betrachtung lassen sich die methodischen Sichten auch als zwei Ebenen charakterisieren.

Die erste Ebene nimmt primär der Fach- oder Auftraggebervertreter auf der konzeptionellen Ebene wahr. Auf dieser Ebene erfolgt die Konzeptsynthese mit dem Generieren neuer Konzeptideen bzw. -varianten. Die zweite Ebene repräsentiert den Simulations-Experten. Er hat seinen Tätigkeitsschwerpunkt in der Konzeptanalyse der auf der ersten Ebene generierten Ideen und Varianten. Eine Konzeptanalyse durch Simulation umfasst neben den spezifischen Antworten zum Problem auch immer die Überprüfung der Vollständigkeit (sonst ist das Konzept nicht abbildbar), der Funktionstüchtigkeit und der Einhaltung der Restriktionen. ²⁷

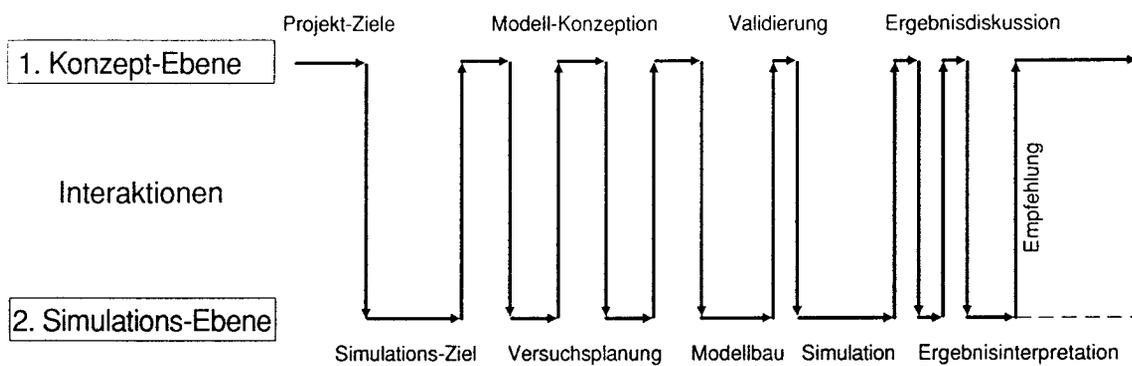


Bild 1: Betrachtungsebenen der Simulation

In der Praxis sind diese zwei Ebenen i.d.R. nicht klar getrennt oder die Ebene des Auftraggebers (Konzeptvertreters) wird aus allgemeinem Vertrauen zum (externen) Experten unzureichend wahrgenommen.

Eine fehlende Trennung dieser Ebenen kann ein Indiz für eine sehr gute Projekteinbindung der Simulation sein. Voraussetzung dafür ist, dass die zwei Ebenen durch zwei oder mehrere verschiedene Personen aktiv wahrgenommen werden. Sind beide Ebenen zusammen nur durch eine einzige Person abgedeckt, besteht die Gefahr einer isolierten Problembetrachtung mit "Elfenbeinturmlösungen".

Zwei Sichten (Ebenen) garantieren durch ihre Redundanz bei der Modell-Erstellung und -Umsetzung eine gewisse Übereinstimmung mit der Aufgabenstellung und der Realität. Wenn man betrachtet, dass Fehler und Unstimmigkeiten in der Aufgabenstellung, Modell-Konzeption oder in der -Umsetzung auf dem Rechner in alle durch die Simulation erhalte-

²⁷ Vgl. auch Einleitung zu Kapitel Nr. 4. "Konzeption einer Vorgehensmethode" sowie HABERFELLER et al 92, S. 157 ff.

nen Ergebnisse einfließen, so ist die Bedeutung der Redundanz für die Aussagequalität klar.

2.2.2 Einsatzgebiete

Ein Auszug aus dem breiten Angebot an Simulation-SW für die unterschiedlichsten Gebiete und Anwendungen ist in Tabelle Nr. 2 aufgelistet. Auch innerhalb der Gebiete existieren Pakete mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Ausprägungen. Darauf wird nicht speziell eingegangen.²⁸

Gebiete	Anwendungsbeispiele
Luft- und Raumfahrt	Mondlandung
Strömungstechnik	Tragflächenprofil
Meteorologie	Wetterentwicklung
Oekologie	Treibhauseffekt
Medizin und Biologie	Blutkreislauf
Architektur	Wohnraum-Animation
Militärische Applikationen	Artillerie (Flugbahnen)
Volkswirtschaft	Bevölkerungsentwicklung
Finanzplanung	Investitionsrechnung
Computersysteme	Telekommunikation und Netzwerke
Elektrotechnik	Logik- und Schaltkreis-Simulation
Regelungstechnik	Signalprocessing
Verfahrenstechnik	Chemische Prozesse
Körperdynamik	Finite Elemente
Produktion	Fabrikstrukturplanung

Tabelle 2: Einsatzgebiete der diskreten Simulation

Der Erfahrungshintergrund für diese Arbeit entstammt dem Umfeld der Produktion und der Betriebsplanung.

²⁸ Jedes Simulations-Paket hat seine Entstehungsgeschichte. Es wurde für ein bestimmtes Projekt oder für eine bestimmte Anwendung entwickelt und sollte später im Vertrieb dennoch andere Anwendungen ebenfalls abdecken. Die Entwickler haben ebenfalls eine "Vergangenheit" und Ausbildung, was sich dann in Charakteristika der Programmpakete zeigt.

2.2.3 Einsatzarten

Einsatzarten der diskreten Simulation sind ²⁹:

- Vorhersagen und Prognosen
- Entscheidungshilfe bei Planungen (als Denkhilfe)
- Analyseinstrument für eine Versuchsumgebung
- Nachweis der Funktionalität
- Visualisierungen, Kommunikationsmittel, Erklärungs-Modell
- Übungs- und Instruktionshilfsmittel für die Schulung und das Training

Der Bereich der Planung lässt sich wie folgt weiter aufgliedern:

1. System-Design (Konzeptphase)
 - Betriebsplanung
 - Strukturplanung
 - Betriebsorganisation
 - ...
2. System-Optimierung (Betriebsphase) ³⁰
 - Ablauf-Optimierung (Auftragsdurchlauf und Maschinenbelegung)
 - Zuordnungsprobleme (z.B. Teilesortiment zu Maschinen)
 - Materialflussprobleme (z.B. Engpässe beim Transport)
 - Betriebsmittel (z.B. Dimensionierung, Anzahl)
 - ...

Die Einsatzarten der Simulation lassen sich auch in Abhängigkeit der Projektlebensphasen (Vorstudie, Hauptstudie etc.) unterscheiden, z.B. Grob-Simulationen (Machbarkeit) in der Phase der Vorstudien oder Strategie-Simulationen für Steuerungen von Fertigungszellen in der Betriebsphase.

Eine weitere Unterteilung kann nach folgenden Kriterien vorgenommen werden:

- | | |
|-------------------------|---|
| 1. Art der Durchführung | <ul style="list-style-type: none"> - Computer (Computer-Simulation) - von Hand (Hand-Simulation) - gedanklich (Szenario) |
| 2. Steuerung | <ul style="list-style-type: none"> - digital - analog |

²⁹ Vgl. auch SHANNON 75, S. 5 nach S.E. ELMAGHRABY, "The Role of Modelling in I.E. Design", Journal of Industrial Engineering, Nr. 6, 1968.

³⁰ Z.T. auch Themen des Operations Research (OR). Die Anwendung des OR setzt i.d.R. mathematische Kenntnisse voraus. Bedingt durch ungenügende mathematische Vorbildung werden Fragestellungen dieser Art heute häufig mit Simulation behandelt.

-
3. Verhalten der Elemente ³¹
- zeitdiskret
 - ereignisorientiert
 - kontinuierlich (Differential-Gleichungs-Systeme)
4. Abbildung der Zeit
- statisch (Zeit ist nicht berücksichtigt; Aussagen sind statisch)
 - durch Zeitreihen (fester Zeitpunkt; Aussagen sind zeitpunktabhängig, Dynamik entsteht erst durch die rollende Wiederholung)
 - dynamisch (Zeit ist eine explizite Grösse; Aussagen sind zeitabhängig, statisch oder konstant)
- Weitere Unterscheidungen sind:
- I. Die Zeit läuft kontinuierlich.
 - II. Die Zeit ist eine diskrete Variable.
 - II a Simulation ist zeitgetaktet.
 - II b Simulation ist ereignisorientiert.
 - II c Simulation ist prozessorientiert.
5. Zeitverhalten der Prozesse
- statisch (konstant, fix)
 - quasi statisch (konstant über die Zeit, z.B. Förderband)
 - deterministisch (alle Veränderungen sind einzeln vollkommen vorbestimmt, gleicher Input ergibt gleichen Output)
 - quasi deterministisch (mit explizit reproduzierbarer Stochastik)
 - stochastisch (Variablen sind ganz oder teilweise durch Verteilfunktionen definiert und die Zuordnung der Resultate muss nach statistischen Gesichtspunkten erfolgen.)
6. Modellart
- formale Modelle, abstrakte symbolische Abbildungen (Computersprachen, verbale Beschreibungen von Szenarien, mathematische Gleichungen)
 - nichtmassstäbliche physische, stoffliche Abbildungen (nicht massstäblich verkleinert, vergrößert oder mit vernachlässigten Dimensionen sowie reine Analogie-Modelle)
 - Massstäbliche Modelle (Real-Simulation)

³¹ In der Realität existieren diskrete und kontinuierliche Prozesse bzw. Abläufe. Diese können auf verschiedene Arten abgebildet werden (siehe Aufzählung).

7. Verwendung

- Grob-Simulation (qualitativ, strategisch)
- Fein-Simulation (quantitativ)

2.2.4 Einsatzebenen

Im Umfeld von Unternehmen lassen sich die Einsatzebenen für eine Simulation wie folgt gliedern:

- strategische Unternehmensplanung
 - Bilanz- und Budget-Simulationen
- taktische Betriebsplanung
 - Auslegung von Fabriken, Werkstrukturplanung, Bereichsplanung
 - Strukturierung, Planung von Inseln und Zellen
 - Materialfluss- und Betriebsmittel-Optimierung
- operative Betriebsplanung
 - Simulation in Leitständen
 - Personaleinsatzplanung

Diese Arbeit beschränkt sich auf die Ebene der taktischen Betriebsplanung. Es wird weiter zwischen Struktur- und Materialflussplanung unterschieden.

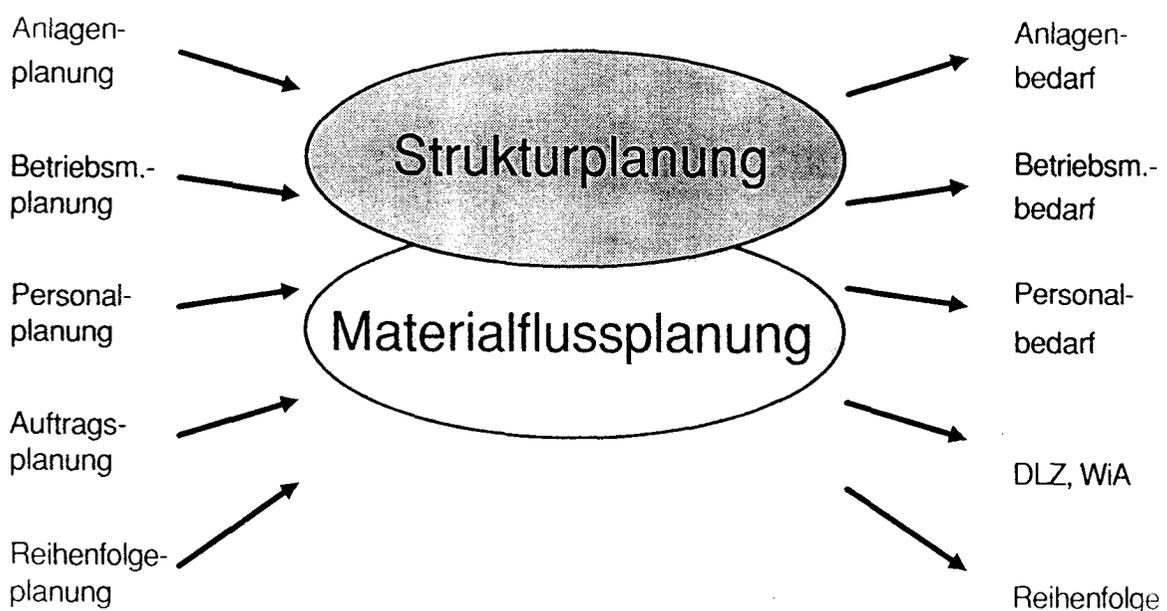


Bild 2: Einsatzebenen der Simulation in der Betriebsplanung

Diese Trennung zwischen Struktur- und Materialflussplanung ist in der praktischen Anwendung i.d.R. schwierig genau festzulegen, hat aber in der methodischen Betrachtung seine Richtigkeit.

Strukturplanung	Teil der Systemgestaltung z.B. Maschinenanzahl (Einrichtungen) inkl. der Materialflussplanung (viele Freiheitsgrade, ein grosser realisierbarer Nutzen)
Materialflussplanung	Ablaufplanung, Teil der Betriebssteuerung oder deren Planung (eingeschränkte Freiheitsgrade, oft nur Funktionsnachweis oder Fehlerbehebung)

2.3 SIMULATIONS-ZIELE / -ERGEBNISSE

Es herrscht bei vielen Entscheiden für und wider eines Simulations-Einsatzes ein Mangel an verbindlichen Antworten auf folgende drei Fragen:

- Welche Informationen bzw. Ergebnisse liefert die Simulation (quantitativ, qualitativ)?
- Welcher konkrete Nutzen ergibt sich daraus für den Entscheidungsträger?
- Wie hoch ist der Zusatzaufwand (zeitlich und bezüglich einer evtl. Projektverlängerung, sowie der Kosten)?

In diesem und im folgenden Kapitel wird diesen Fragen nachgegangen. Für die Ergebnisaufbereitung, die hier nicht speziell behandelt ist, sei auf weiterführende Literatur verwiesen ³². Die Beurteilung der Ergebnisqualität erfolgt im Rahmen der allgemeinen Qualitätssicherung der Simulation, siehe Kapitel Nr. 3.2 "Qualitätssicherung".

2.3.1 Gründe für den Simulations-Einsatz

Dieser Abschnitt behandelt die zentrale Frage: Wo und wann soll die Simulation sinnvollerweise eingesetzt werden?

In Fällen, in denen die geschlossene mathematische Behandlung eines Problems unmöglich oder nicht sinnvoll ist, kann man eine Problemlösung anhand von systematisch durchgeführten Simulationen mit experimentellen Untersuchungen ermitteln. In den meisten Fällen scheidet für Experimente ein Zugriff auf die realen Systeme im Betrieb aus Zeit- und Kostengründen aus. Daher bildet man die dynamischen Prozesse in dafür geeigneten Modellen nach und simuliert um Erkenntnisse zu gewinnen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind ³³.

³² Eine Zusammenstellung findet sich z.B. unter ACÉL, GREGOR, HRDLICZKA 93, Teil Ergebnisse.

³³ Vgl. VDI-Richtlinie 3633, S. 3.

Die konkreten Gründe für die Anwendung der diskreten Simulation sind sehr vielfältig. Sie dient zur Gewinnung von Informationen, die sich an einem realen System nicht beobachten lassen oder für die sich keine adäquaten alternativen Berechnungsarten anbieten. Für viele Fragestellungen ist die Simulation das einzige Hilfsmittel, um wenigstens durch "Probieren" brauchbare Ergebnisse zu erhalten.

Gründe für eine Anwendung sind:

- wenn die realen Abläufe zu langsam sind (Zeitgründe, Zeitraffer-Effekt der Simulation)
- wenn Neuland beschritten wird (Risikobegrenzung und -abschätzung, Elimination von Fehlern und Gefahren)
- wenn Betriebsmittel fehlen (Kostengründe, fehlende Systemkomponenten brauchen nicht erst beschafft zu werden.)
- wenn das reale System (noch) nicht existiert (nur Planungs-Idee, Prognose)
- wenn die Grenzen analytischer Methoden erreicht sind (fehlende vergleichbare Alternativen zur Simulation, z.B. für komplexe Systeme mit vielen Rückkopplungen, viele Ein- und Ausgangsgrößen oder relativ kleine Systeme mit vielen stochastischen Einflüssen ³⁴)
- wenn komplexe Wirkzusammenhänge die menschliche Vorstellungskraft überfordern (Entscheidungshilfe, Strukturierungshilfe für z.B. komplex vernetzte Systeme bzw. Modelle)
- wenn das Experimentieren am realen System nicht durchführbar bzw. zu kostenintensiv oder zu gefährlich ist (ohne Störung des aktuellen Betriebsablaufes)
- wenn das zeitliche Ablaufverhalten dynamisch zu untersuchen ist (z.B. bei starken dynamischen Rückkopplungen)

Diese Auswahl lässt sich in Abhängigkeit der Ursache für die jeweilige Planung entsprechend erweitern. Anstöße für eine Planung sind z.B.:

- Errichtung einer neuen Fabrik
 - Installation neuer Maschinen
 - Integration neuer technologischer Verfahren
 - Rationalisierungen
 - Lieferprobleme (DLZ)
- etc.

Des Weiteren unterscheiden sich die konkreten Gründe für einen Simulations-Einsatz je nach der Projektlebensphase (siehe Bild 3).

³⁴ Sind z.B. viele Rückkopplungen und stochastische Einflüsse vorhanden, so kann eine nicht reduzierte Problemstellung leicht den Rahmen für eine Simulation sprengen.

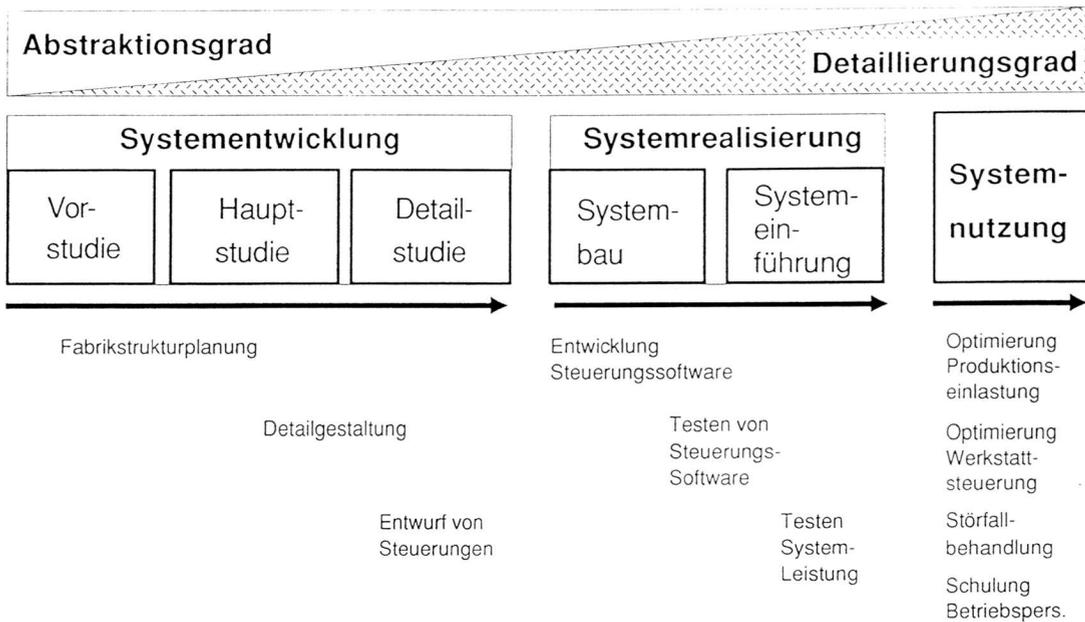


Bild 3: Simulations-Anwendung nach Projektlebensphasen

Der allgemeine Grund für einen Simulations-Einsatz ist, ein Wissensdefizit bezüglich eines Systems über Versuche an seinem Modell zu verringern. Das kann je nach Anwendungsphase ein Mehr-Wissen und/oder einen Wissens-Vorsprung darstellen.

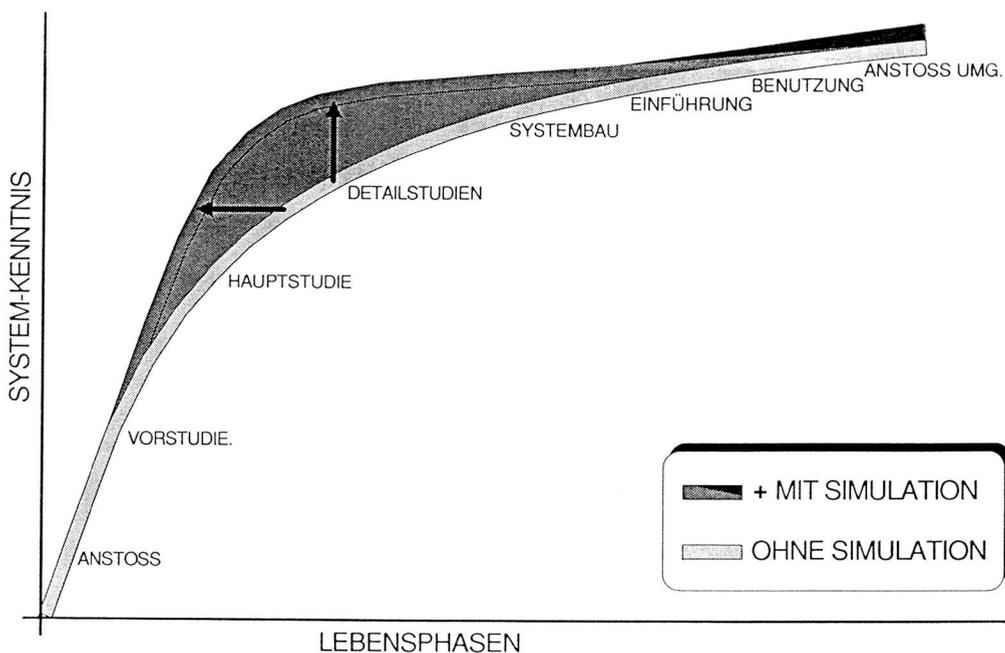


Bild 4: Wissens-Gewinn durch Simulation

2.3.2 Simulations-Ziele

Ziel der diskreten bzw. digitalen Simulation ist es, ein im zeitlichen Ablauf "gutes", d.h. ausreichendes und richtiges Abbild der Vorgänge innerhalb eines existierenden oder zu planenden Systems, unter Berücksichtigung der gegebenen Rahmenbedingungen, zu erhalten.

Kurz, die Simulation beantwortet folgende Frage: "Was passiert, wenn . . . ?" ³⁵

Mit der Simulation wird versucht, in komplexen Entscheidungssituationen die Handlungsalternative zu bestimmen, die dem Ziel am meisten Rechnung trägt. Regelmässig steht man vor dem Problem, mehrere quantitative und qualitative Zielgrössen zu den verschiedenen Entscheidungs-Variablen in Beziehung setzen zu müssen.

Dabei hat die Simulation eine Funktion als Optimierungs-Modell, um über die Konsequenzen von Parametereinstellungen und Entscheidungen Aufschluss zu bekommen. Oder anders ausgedrückt: Simulation als Antwortsystem, Denkverstärker, Erklärungs-Modell und Entscheidungs-Modell.

Fall	System	System-Input	Ergebnis
1	bekannt	bekannt	Funktionsnachweis
2	unbekannt	bekannt	Systemalternativen
3	bekannt	unbekannt	Leistungsgrenzen
4	unbekannt	unbekannt	Allg. Aussagen über Systemtypen (abhängig von der Parameter-Variation)

Tabelle 3: Aufgabenfelder der Simulation
(nach GROSSESCHALLAU 84, S. 190)

Bei der Definition von Zielen muss beachtet werden, dass eine Simulation stets das Vorhandensein eines oder mehrerer getesteter Basis-Modelle voraussetzt, mit denen experimentiert wird. Das Experimentieren kann wie folgt organisiert sein ³⁶:

- Variation der Input-Daten bei konstanter Anzahl von Einflussfaktoren
- Variation der Anzahl von Einflussgrössen
- Anwendung verschiedener Modelle mit dem gleichen Input-Datensatz

³⁵ Vgl. KAPOUN 88, S. 7.

³⁶ Vgl. KAPOUN 88, S. 12, siehe auch Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode" dieser Arbeit.

2.3.3 Ergebnisse

Obwohl die Simulation zu den Methoden ohne Konvergenzbeweis³⁷ zählt, da bei ihr mit numerischen Techniken ohne Lösungsgarantie Berechnungsexperimente an Simulations-Modellen durchgeführt werden, nimmt man den damit verbundenen Nachteil, oftmals nur "gute" statt optimale Lösungen zu liefern, häufig in Kauf. Die Simulation liefert nämlich aufgrund ihrer relativ grossen Wirklichkeitstreue sehr aussagekräftige Ergebnisse und ist für ein breites Anwendungsfeld einsetzbar.

Die Simulation ist dadurch gekennzeichnet, dass mit vorhandenen Daten oder Annahmen, die den IST-Zustand oder eine Planungssituation beschreiben, ein Modell erstellt wird, das die im geplanten System ablaufenden Vorgänge nachvollzieht. Durch Einführung von veränderten Eingangsdaten, die ein Experiment darstellen, lassen sich am Simulations-Modell eine grosse Zahl von neuen Ideen und Konstellationen testen sowie vorhandene Schwachstellen analysieren, ohne dabei aufwendige, störende oder gefährliche Betriebsversuche in der laufenden Produktion durchzuführen. Eine frühe Anwendung der Simulation in einem Projekt ergibt dabei den grössten Nutzen, da das Modell dann i.d.R. mehrfach und über eine längere Zeit genutzt wird. Zusätzlich sind in einem frühen Projektstadium mehrere beeinflussbare bzw. offene Freiheitsgrade vorhanden als z.B. in der Schlussphase eines Projektes.

Die Ergebnisse einer diskreten Simulation in der Betriebsplanung ergeben sich aus dem Studium des Systemverhaltens und der Analyse der Interaktionen zwischen den Systemteilen und -elementen. Ergebnisse sind z.B.:

- Kostenanalyse, gekoppelt mit Investitions-Optimierung und Fabrikationsstrategie
- Kapazitätsbedarf und Eignung von Verfahren in Abhängigkeit der Kapazitäten von Maschinen, Lager- und Fördereinrichtungen
- Auslastung der beteiligten Systemelemente, wie z.B. Personal, Maschinen
- Häufigkeit der auftretenden Ereignisse wie Arbeits-, Warte-, Rüst- oder Störzeiten
- Durchlaufzeiten in Abhängigkeit von Startzeit und gewählter Strategie
- Verhalten des Systems bei Expressaufträgen
- Erkennen von Engpässen im System, z.B. als Reaktion auf Produkt- und Bedarfsänderungen
- Werkzeug- und sonstiger Betriebsmittelbedarf zu einem beliebigen Zeitpunkt mit dazugehöriger Dispositionsstrategie
- Auswirkungen bei internen und externen Störungen, z.B. Lieferfristverzug für Rohmaterial und Halbzeuge
- Verhalten des Systems bei Expressaufträgen, d.h. Vorziehen von Losen oder Teilen davon
- Farbgraphische und zeitabhängige Darstellungen der Abläufe im Modell (Animation)

³⁷ Vgl. GAL, GEHRING 79, S. 37.

Als Ergebnis eines Simulationslaufes erhält man grosse Datenmengen, die mit Vorzug grafisch dargestellt werden. Dabei sind vergleichende Auswertungen über mehrere Simulationsläufe wünschenswert, um durch die höhere Datenkonzentration eine bessere Uebersicht und damit auch leichtere Erfassbarkeit zu ermöglichen.

Es ist wichtig zu wissen, dass die Ergebnisse der Simulation für die Realität nicht exakt übertragbar sind. Sie sind dann Folgerungen (qualitativ), die auf einer Serie von Experimenten beruhen ³⁸.

Nicht unerwähnt bleiben darf die folgende Tatsache: Das Ergebnis einer Simulation kann nur so gut sein, wie es das Modellkonzept und die Ausgangsdaten zulassen. Dies muss besonders bei globalen, vereinfachenden Betrachtungen berücksichtigt werden. Die meisten Problemstellungen sind nicht ohne Vereinfachungen zu lösen.

Bei der Anwendung der Simulation gilt es nicht, ein schönes Resultat zu "erspielen", gefällige Grafiken zu zeigen oder eine Animation vorzuführen. Allgemein besteht die Gefahr, dass der "Bildschirminhalt" optimiert wird und nicht das Simulations-Modell bzw. das Problem im Hintergrund. Vielmehr ist für das Erarbeiten von transparenten Ergebnissen als Entscheidungsgrundlage ein systematisches Vorgehen notwendig. Die Animation und vorhandenen Graphiken dienen dabei als Kommunikationshilfe.

2.4 NUTZEN / AUFWAND DER SIMULATION

Der Einsatz des Hilfsmittels "Simulation" als modernes und im Trend liegendes Werkzeug wird immer öfters von Auftraggebern gewünscht, bzw. von Unternehmensberatern angeboten. Gleichzeitig wird den Betroffenen i.d.R. keine vorgängige Rechenschaft über das Nutzen/Aufwands-Verhältnis des Simulations-Einsatzes gegeben. Dabei sind die Kenntnisse besonders auf der Auftraggeberseite unzureichend und führen zu falschen, übersteigerten Erwartungen ³⁹.

2.4.1 Wirtschaftlichkeit und Kostenaspekte

Die Simulation liefert nicht nur Ergebnisse (Nutzen), sondern verursacht auch Aufwand. Der Mindestaufwand beträgt gemäss der Erfahrung des Autors 15 - 20 Arbeitstage ⁴⁰. Eine obere Grenze des Aufwandes ist nicht generell festlegbar. Ab ca. einem Jahr Bearbeitungszeit ist erfahrungsgemäss über eine Projektaufteilung nachzudenken. Der jeweilige

³⁸ Vgl. KAPOUN 88, S. 15.

³⁹ Oftmals setzen Beratungsunternehmen Simulation auch wegen der schönen und vorzeigbaren Animation als ein Marketinginstrument ein, um eine moderne Projektdurchführung zu demonstrieren.

⁴⁰ Diese Aussage steht z.T. im Widerspruch zu sonst publizierten Werten.

Aufwand ist abhängig von der Fragestellung und der gewünschten bzw. notwendigen Detaillierung.

Die Aufwandsverteilung in Bild Nr. 5 erfolgt nach dem im Kapitel Nr. 4. "Konzeption einer Vorgehensmethode" behandelten Schema.

Die Grenzen zwischen den einzelnen Abstufungen (Vorgehensschritten) sind fließend, da es sich bei der Simulation um ein Vorgehen mit Wiederholungszyklen handelt. Die Datenbeschaffung und die Zielabklärungen erfolgen i.d.R. im Rahmen eines übergeordneten Projektes. Diese Tätigkeiten sind auf jeden Fall durchzuführen, auch unabhängig von einer evtl. Simulation.

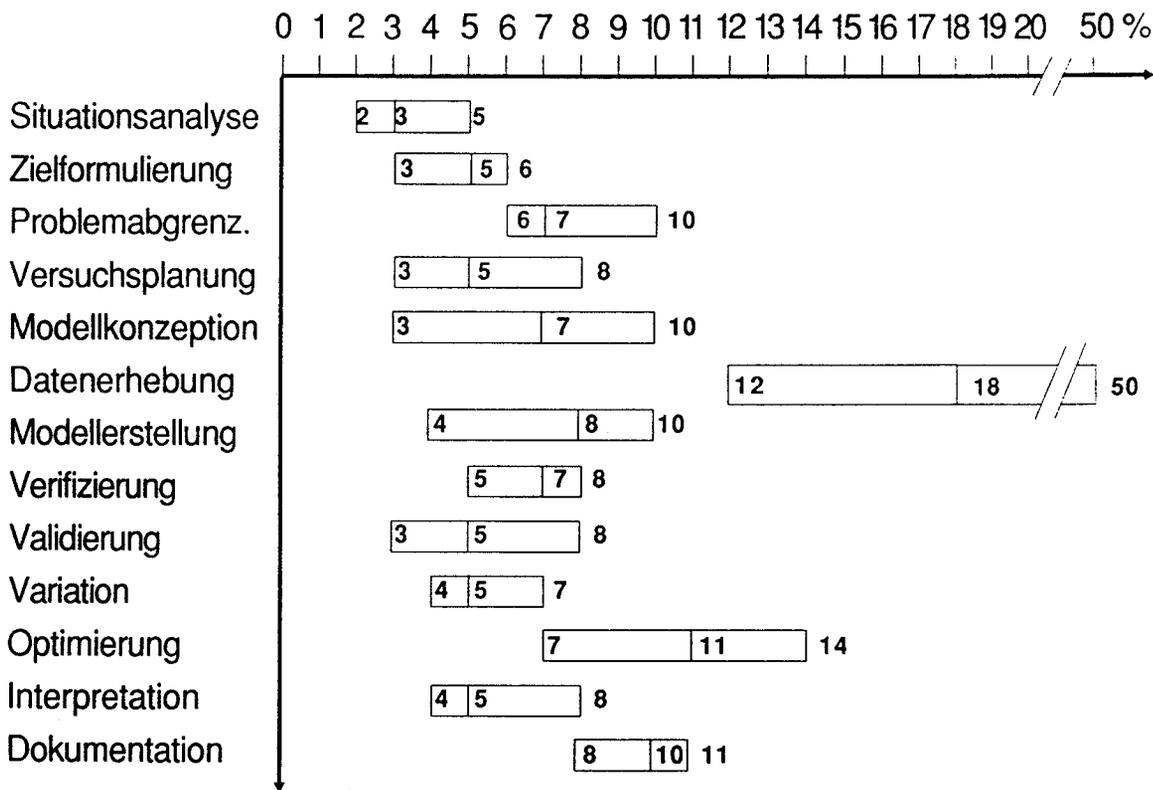


Bild 5: Zeitliche Aufwandsverteilung in Prozenten beim Simulations-Einsatz ⁴¹

2.4.2 Alternativen zur Computer-Simulation

Wenn man von Alternativen zur Simulation spricht, muss beachtet werden, dass viele dieser Alternativen in der Literatur auch unter dem Begriff "Simulation" im engeren oder weite-

⁴¹ ACÉL, Gastvorlesung im Fach Produktionsanlagen am Betriebswissenschaftlichen Institut der ETH Zürich, Thema: "Einführung in die diskrete Computer-Simulation", Juni 1991.

ren Sinn erscheinen und entsprechend den Entwicklungstrends auch zunehmend auf Computern ausgeführt werden. Hier sei die Rede von Alternativen zur Simulation in der Prozess- und Ablaufgestaltung ⁴².

I.d.R. werden nur diejenigen Alternativen zur Simulation in Betracht gezogen, von denen der jeweilige Anwender Kenntnis hat. Dies, obwohl gewisse Alternativen einfacher und schneller in der Anwendung sind und/oder im Gegensatz zur Simulation oftmals absolute Optima liefern.

Alternativen zur Simulation im Umfeld der Materialfluss- und Strukturplanung sind:

Manuelle Methoden

- physische Modelle mit beweglichen Elementen
- statische (Kapazitäts-)Rechnungen
- Tabellenkalkulation mit Zeitreihen
- intuitive Methoden, Szenariotechniken
- ...

Enumeration, partielle Enumeration

- Kombinatorik, Branch and Bound
- Heuristiken
- ...

Statistische Methoden

- Wahrscheinlichkeitsrechnung
- Monte Carlo -Methode
- Spieltheorie
- ...

Mathematische Methoden

- Differential- und Integralrechnungen
- Warteschlangentheorie
- Lineare Optimierung (Simplexverfahren)
- ...

Aus dieser sicher nicht vollständigen Aufzählung ist ersichtlich: Es lohnt sich die Simulationswürdigkeit (Nutzen/Aufwand-Verhältnis) bezüglich der Anwendung einer diskreten Simulation im Rahmen eines Projektes kritisch zu prüfen.

Die diskrete Simulation hat besonders beim Untersuchen dynamischer und offener sowie stark vernetzter Systeme mit vielen Ein- und Ausgängen grosse Vorteile. Im Gegensatz dazu lassen sich relativ einfache Probleme schneller analytisch lösen. Für die Beantwor-

⁴² Vgl. die Definition der Simulation in Kapitel Nr. 2.1.

tung komplizierter Fragestellungen ohne Dynamik bieten häufig Heuristiken eine ausreichende Genauigkeit. Siehe dazu folgende Tabelle mit Richtwerten für einen Vergleich.

Methode	Stationen max. Anz.	Teile max. Anz.	Aufwand min. Tage	Bemerkungen
Statische Rechnung	100	1 - 5	2	nur lineare Flüsse
Dynamische Rechnung	10	1 - 5	3	umständlich
Computer-Simulation	100	10 - 100	10	Aufwand inkl. Vorarbeiten min. 20AT
.....	

Tabelle 4: Unterschiedliche Methoden im Vergleich

2.5 MODELL-BILDUNG

Die Modell-Bildung ist ein wichtiger integraler Bestandteil der Simulation. Die Gewinnung von Modellen ist ein intuitiver, iterativer Prozess, der sehr viel Erfahrung erfordert. Die Modell-Konzeption lässt sich nicht nach einem fixen Schema ausführen. Die Kunst ist es, das richtige Abstraktionsniveau zu finden. Jedes Modell dient einem Verwendungszweck, der im voraus bestimmt sein muss⁴³. Bei jeder Untersuchung von Systemen werden deshalb zuerst folgende Schlüsselfragen beantwortet: Zweck, Wirkweisen, Aufbau und zulässige Zustände des Modells im Untersuchungsprozess?

2.5.1 Modell-Klassifikation

Modelle, wie sie hier Verwendung finden, gehören in das kausale Weltbild. Sie erfüllen das Kausalitätsprinzip, d.h. jedes Geschehen hat eine oder mehrere Ursachen und ist Ursache eines anderen Geschehens. Ohne Ursache geschieht nichts.⁴⁴

⁴³ Vgl. auch BÜCHEL 90 Teil "Systemdenken", S. 37.

⁴⁴ Vgl. HUBKA 84, S. 51.

Die folgende Zusammenstellung über die verschiedenen Modellarten nach Verwendung wurde aus BEHRENDT ⁴⁵ übernommen und an die Belange der Simulation angepasst. Die Grenzen zwischen den Aufgaben sind fließend. Innerhalb einer Untersuchung erfüllt ein Modell i.d.R. mehrere der unten genannten Aufgaben gleichzeitig:

- Erkenntnis-Modell: Ueber die Eigenschaften des Systems werden neue Erkenntnisse gesucht, die durch Untersuchung am Modell gewonnen und durch Analogieschluss auf das System zu übertragen sind. Dies geschieht dadurch, dass im Modell enthaltene Einzelinformationen im Zusammenhang gedeutet und dadurch zu neuen Informationen über das System werden.
- Erklärungs- und Demonstrations-Modell: Vorhandene Eigenschaften, Funktionen und Verhaltensweisen eines Systems werden im Zusammenhang dargestellt. Dadurch werden Hilfsinformationen gewonnen, die das Verständnis für das System erleichtern oder für Aussenstehende ermöglichen (z.B. Animation).
- Variations- und Analyse-Modell: Durch bewusste Veränderungen im Modell werden deren Wirkungen untersucht und erklärt sowie die gewonnenen Aussagen auf das System übertragen, ohne dieses zu verändern oder gar zu gefährden. Die Variationen der Parameter können sowohl den Inhalt (z.B. Eigenschaften) als auch die Struktur betreffen.
- Prognose-Modell: Zur Prognose werden Prozesse über längere Zeiträume und unter wechselnden Umweltbedingungen nachgebildet und daraus Aussagen über das zukünftige Verhalten des Systems abgeleitet.
- Optimierungs-Modell: Zur Optimierung wird durch systematische Parameter-Variation versucht, einzelne Eigenschaften entsprechend einer Zielvorstellung zu verbessern.
- Indikations-Modell: Das Modell bildet Eigenschaften ab, die im System selbst zwar vorhanden, dabei jedoch nicht zugänglich oder durch Seiteneffekte verwischt sind.
- Verifikations-Modell: Eine vorhandene Hypothese wird durch eine modellmässige Nachbildung auf ihre Gültigkeit hin untersucht. Hier steht weniger die Gewinnung neuer Erkenntnisse, sondern der Beweis der Hypothese im Vordergrund.
- Entwurfs-Modell: Durch Modellierung einer gedanklichen Vorstellung über ein noch zu realisierendes System kann seine Realisierbarkeit überprüft werden.
- Steuerungs-Modell: Im Modell enthaltene Informationen dienen einem System als Führungsgrösse zur Realisierung bestimmter Vorhaben.
- Ersatz-Modell: Das Modell ersetzt das System in Teilen seiner Gesamtfunktion.

⁴⁵ Vgl. BEHRENDT 74, S. 153 f, ursprünglich aus BUHR KLAUS G.M. (Hrsg.) 1971, "Philosophisches Wörterbuch", Leipzig, Beitrag von WÜSTNECK S. 731 f.

2.5.2 Modell-Konzeption

Die Modellierung mit den beiden Schritten Modell-Konzeption und Modell-Umsetzung ist für den Erfolg einer Simulationsstudie von entscheidender Bedeutung.

Bei der Modell-Konzeption spielt das Untersuchungsziel die massgebendste Rolle. Bei einer zu hohen Detaillierung besteht die Gefahr, dass "man den Wald vor lauter Bäumen nicht mehr erkennt". Es ist nicht sinnvoll und zweckmässig (zwangsläufiger Informationsverlust), im Rahmen einer Modell-Bildung "alles" genau abzubilden. Würde man dies trotzdem tun, hätte man ein sehr schlechtes Nutzen/Aufwand-Verhältnis. Zur Lösung der Abstraktions- und Reduktionsaufgabe bieten sich grundsätzlich zwei Wege an. Sie werden i.d.R. beide nacheinander benützt:

1. schrittweises Einengen des Betrachtungsfeldes
2. Abstrahierung des Systems bei der Umsetzung in das Modell

In der folgenden Tabelle Nr. 5 werden zwei unterschiedliche Ansätze zur Erfassung der Wirklichkeit vorgestellt, ein analytischer und ein ganzheitlicher Ansatz (Systemansatz).

Analytischer Ansatz	Systemansatz
Isoliert: konzentriert sich auf die einzelnen Elemente	Verbindet: konzentriert sich auf die Wechselwirkungen zwischen den Elementen
Berücksichtigt die Art der Wechselwirkungen	Berücksichtigt die Auswirkungen der Wechselwirkungen
Stützt sich auf die Genauigkeit der Details	Stützt sich auf die Wahrnehmung der Ganzheit
Verändert jeweils nur eine Variable	Verändert Gruppen von Variablen gleichzeitig
Die Bewertung der Tatsachen erfolgt durch experimentellen Beweis im Rahmen einer Theorie	Die Bewertung der Tatsachen erfolgt durch den Vergleich der Funktion eines Modells mit der Realität
Bildet genaue und detaillierte Modelle (z.B. ökonomische Modelle), die jedoch kaum in Handlung umsetzbar sind	Bildet Modelle, die nicht stichhaltig genug sind, um als Wissensbasis zu dienen, jedoch für Entscheidungen und Handlungen brauchbar sind
Nützlicher Ansatz, solange es sich um lineare und schwache Wechselwirkungen handelt	Nützlicher Ansatz bei nichtlinearen und starken Wechselwirkungen
Disziplinentrierte Betrachtung, führt zu einer im Detail programmierten Handlungsweise	Interdisziplinäre Betrachtung, führt zu einer durch Ziele bestimmten Handlungsweise
Erreicht gutes Detailwissen, jedoch schlecht definierte Ziele	Erreicht nur unscharfe Details, jedoch gutes Wissen über die Ziele

Tabelle 5: Vergleich analytischer Ansatz und Systemansatz
 (Vgl. VESTER 80, S. 43 nach J. DE ROSNAY, "Das Makroskop", Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1977)

Ein zu Untersuchungszwecken entwickeltes Modell wird durch die konkrete Abbildung selbst ein System, das einem realen System zugeordnet ist und Aehnlichkeiten mit diesem hat. Die Anforderungen an die Art und den Umfang der Aehnlichkeit werden von dem jeweiligen Untersuchungszweck bestimmt. Die Art der Aehnlichkeit legt die Gültigkeit des Modells für die wirklichen Verhältnisse fest. Doch anders als eine Landkarte ist ein Simulations-Modell nicht nur ein vereinfachtes Modell der realen Struktur, sondern auch ein Modell der inneren Dynamik des Vorbildes ⁴⁶.

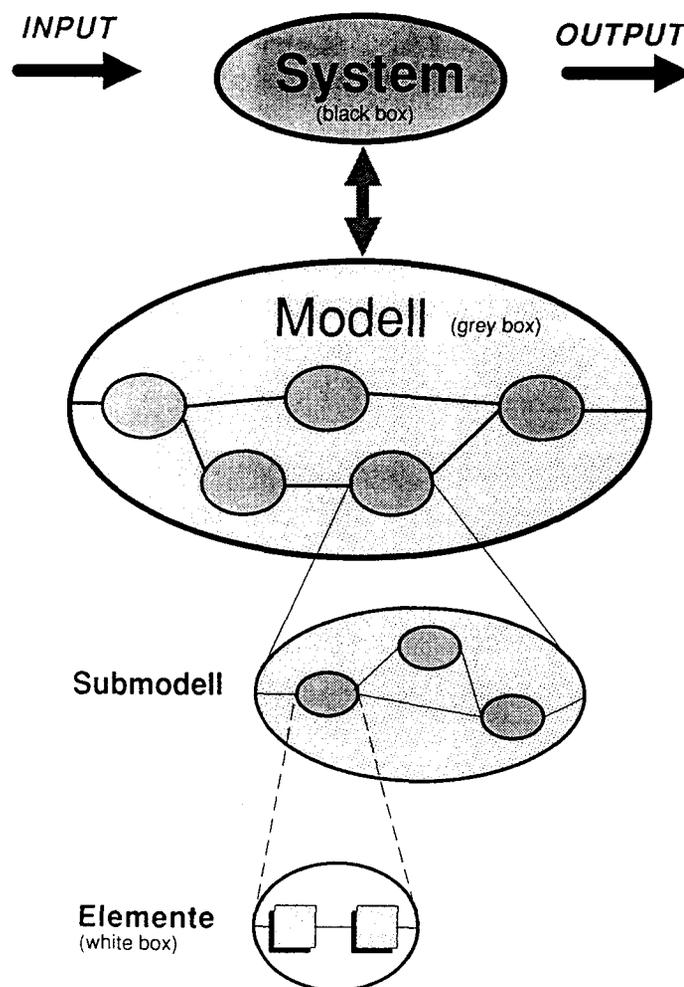


Bild 6: Darstellung eines Modells für die Simulation

⁴⁶ Vgl. VESTER 80, S. 104.

Das in der obigen Darstellung als Black Box ⁴⁷ verstandene Modell muss für die Simulation so weiterentwickelt werden, dass seine innere Struktur sichtbar und die Black Box zur White Box ⁴⁸ wird. Dabei sind folgende Aufgaben zu lösen ⁴⁹:

- Ableitung der Prozesselemente und ihre Nachbildung durch Modell-Größen
- Erfassung der Elementbeziehungen und Nachbildung durch Prozessregeln

Sie sind jeweils durch einen Satz von Attributen ⁵⁰ charakterisiert.

Das Verhalten eines Modells bzw. Systems ist nicht nur die Summe der einzelnen Elemente bzw. Subsysteme, sondern hängt massgeblich von den Beziehungen der Teile untereinander ab ⁵¹. Die jeweils richtige Erfassung der Vernetzung bestimmt primär die Qualität des Modells und nicht die Auflösung der einzelnen Daten.

Ist von der Komplexität eines Systems die Rede, so können dabei ganz unterschiedliche Aspekte gemeint sein:

- Verschiedenartigkeit der Elemente
- Verschiedenartigkeit der Beziehungen
- Anzahl der Elemente
- Anzahl der Beziehungen

Die allgemein übliche Einteilung von Systemen in 1.) einfach, 2.) komplex oder 3.) äusserst komplex ist äusserst subjektiv.

Die für eine Modellierung verwendeten Elemente lassen sich nach ihrem Verhalten wie folgt klassifizieren:

- | | |
|--------------------|--|
| Physische Elemente | - dynamisch (bewegt), z.B. Fördermittel
- stationär (zeitverbrauchend), z.B. Maschine, Puffer |
| Logische Elemente | - Regeln, z.B. Operationsfolge
- Information, z.B. Attribute zu physischen Elementen |

Die physischen Elemente wiederum lassen sich, wie in der folgenden Tabelle am Beispiel aus dem Umfeld der Produktion gezeigt wird, in drei Gruppen einteilen:

⁴⁷ Black Box -Modelle beschreiben nicht die eigentliche Transformation selbst, sondern lediglich ihre Wirkungen. Rückschlüsse auf die Transformation aus Input/Output sind bei komplexen Realsystemen wegen der fehlenden Eindeutigkeit schwierig.

⁴⁸ White Box, auch als Glas Box bezeichnet, stellt das Gegenteil einer Black Box dar, d.h. der innere Aufbau ist bekannt.

⁴⁹ Vgl. GEHRING 81, S. 22 ff.

⁵⁰ "Attribute" werden im Rahmen dieser Arbeit noch speziell im Kapitel Nr. 6. "Parameter-Reduktion" behandelt.

⁵¹ Vgl. auch HUBKA 84, S. 121.

Element	Elementart	Beispiel
Bewegte Elemente	Prozessobjekte Transportmittel	Produkt/Fertigungslos Fahrzeug
Stationäre Elemente	Station Lager Wege Verzweigungen Vereinigungen	Maschine Pufferlager Bearbeitungsfolge Fertigungsalternativen Montage
Schnittstellen-Elem. ⁵²	Quelle Senke	Systemeintritt Systemaustritt

Tabelle 6: Physische Elemente
(Vgl. GEHRING 81, S. 24 f.)

Die Vielfalt der zwischen den einzelnen Elementen bestehenden Beziehungen (Regeln) kann funktional in die beiden folgenden Gruppen unterteilt werden:

Regel	Regelart	Beispiel
Prozess-Steuerung	Eintrittsregeln Verteilungsregeln Vereinigungsregeln Störungsregeln Verfügbarkeitsregeln	Prozesseintritt Fremdvergabe Halbfabrikate Maschinenausfälle Arbeitsschichten
Bearbeitung	Zutrittsregeln Freigaberegeln Belegungsregeln Kapazitätsregeln Transformationsregeln	Eintritt in Pufferlager Verlassen einer Station Bearbeitungszeiten gleichzeitige Bearbeitung Zusammenbauvorschrift

Tabelle 7: Beziehungen zwischen Elementen

⁵² Schnittstellen-Elemente sind lediglich gedachte Verbindungsstellen an der Systemgrenze zur Prozessumgebung. Die restlichen Elemente entsprechen Einheiten des realen Systems. Die Schnittstellen-Elemente sind innerhalb eines Modells analog zu stationären Elementen.

Die Prozess-Steuerung bestimmt den Durchlauf der Prozessobjekte (Teile). Bearbeitungsregeln beschreiben die Beziehungen zwischen Prozessobjekten und stationären Elementen bzw. Transportmitteln.

Eintritts-, Stör- und Belegungsregeln sind oft durch Wahrscheinlichkeitsfunktionen definiert, Verteilungs-, Vereinigungs-, Freigabe- und Zutrittsregeln meistens durch Prioritätsregelungen. Verfügbarkeitsregeln beinhalten entweder feste Zeiten (z.B. Schichten) oder sind prozessbezogen definiert (z.B. betriebsstundenabhängige Wartung). Transformations- und Kapazitätsregeln werden meistens durch Mengenbeziehungen festgelegt.

Die Modell-Konzeption lässt sich in folgende Arbeitsschritte gliedern ⁵³:

- Systemerkennung Die Analyse beinhaltet ein prinzipielles Verständnis der Problemstellung und die Abgrenzung des Untersuchungsbereichs als System zur Umwelt (Freischneiden). Weiter beinhaltet die Analyse das Erfassen der groben internen Struktur (Material-, Informationsfluss) sowie der wichtigsten Beziehungen zur Umwelt.
- Systemidentifikation Die Abstraktion schliesst die Kennwertermittlung ein, d.h. die Erfassung der wesentlichen Eigenschaften, Strukturen und Funktionen im System, der Subsysteme und der Elemente. Die Abstraktion kann durch Verzicht (Reduktion) oder durch Vereinfachung (Idealisierung) erfolgen.
- Modell-Konzeption Sie wird damit eingeleitet, dass man eine Entscheidung darüber trifft, welche von den am System beobachteten Eigenschaften (Beziehungen, Zustände) man als Variable und Parameter (nicht beeinflussbare Grösse, Nebenbedingungen) in das Modell aufnimmt. Das Ergebnis ist eine zielspezifische Beschreibung des Systems.
- Modell-Umsetzung Die Implementierung, d.h. die konkrete Modell-Umsetzung, ist je nach SW-Paket ⁵⁴ sehr unterschiedlich. Sie ist kein Bestandteil dieser Arbeit. Trotzdem ist der Einfluss der Art der Implementierung ⁵⁵ auf die vorherigen Schritte bedeutsam.

⁵³ Vgl. auch VOGT 83, S. 93 f. Für eine weitere Vertiefung sei BÜCHEL 90 Teil "Systemdenken", S. 39 ff. empfohlen.

⁵⁴ SW: Soft Ware, Computerprogramme.

⁵⁵ Z.B. bausteinorientiert, prozedural oder durch Petri-Netze.

Zum Schluss dieses Abschnittes werden einige Grundregeln zur effizienten Modell-Bildung für die Simulation aufgeführt ⁵⁶:

- definiere klare Ziele
- vereinfache das Problem durch Abstraktion
- zerlege das Problem in einfachere Probleme
- suche Analogien
- fasse Nebensächliches zusammen
- ersetze Variablen durch Konstanten
- eliminiere oder kombiniere mehrere Variablen
- verwende lineare Zusammenhänge
- verwende härtere Annahmen und Restriktionen
- beschränke die Grenzen des Modells

Durch eine hierarchische Strukturierung der Modelle sind komplexe, unübersehbare Bereiche in mehrere Teile mit geringerer Komplexität aufzuteilen und evtl. nur partiell zu simulieren. Diese Art der Aufgliederung von Modellen wird damit zu einem wichtigen Mittel der Komplexitätsreduzierung bei der Gestaltung von Systemen. Die gegenseitigen Beziehungen innerhalb von Modellteilen müssen dabei vollständig definiert sein. Wenn es die Simulations-SW zulässt, sollte auch bei der softwaremässigen Umsetzung eine hierarchische Modellierung erfolgen. Die Vorteile der hierarchischen Gliederung sind ⁵⁷:

- Sicherung des Gesamtzusammenhanges bei der Isolierung von Teilproblemen durch bessere Uebersicht und damit Transparenz
- Mehrfachverwendung (Baukasten) für gleiche Funktionen bzw. Schubmodulen
- gezieltere Detaillierung
- Möglichkeit der Arbeitsaufteilung

2.5.3 Modellierungsgenauigkeit

Ein Hauptproblem bei der Modell-Bildung besteht in der Anforderung, das Modell einerseits möglichst einfach zu gestalten (Aufwand, Transparenz, allgemeine Verständlichkeit), andererseits aber alle für die Untersuchung wesentlichen Eigenschaften mit ihren Variationsbreiten zu erfassen ⁵⁸. Der daraus resultierende Zielkonflikt erfordert eine Kompromisslösung bezüglich Nutzen/Aufwand, d.h. ein Abwägen zwischen dem Wunsch nach einer hohen Genauigkeit und demjenigen nach einem schnellen, effektiven Lösungsweg. Mit zunehmender Detaillierung des Modells steigt der für eine weitere Verbesserung erforder-

⁵⁶ Vgl. auch SHANNON 75, S. 20.

⁵⁷ Vgl. auch VOGT 83, S. 120 ff.

⁵⁸ Die Erfassungsgenauigkeit beinhaltet in erster Priorität die Strukturidentität und in zweiter Priorität die Uebereinstimmung der quantitativen Werte.

derliche Aufwand immer stärker (progressiv), während bei der Forderung nach zunehmender Schnelligkeit der Lösungsfindung ein immer grösserer Verlust an Detaillierung in Kauf genommen werden muss. Dies ist im Rahmen der Simulation nur durch Erfahrung und gute Kenntnisse der jeweiligen SW zu lösen. Es gilt zu jedem Problem den richtigen Kompromiss zu finden.

Eine Reihe von Untersuchungen grosser und kleiner Oekosysteme wie auch von Wirtschaftsvorgängen beweisen, dass selbst bei fehlenden Daten, ungenauen Daten und Schätzfehlern ein dann zwar undeutliches, aber im Prinzip doch richtiges Modell entstehen kann, das Stabilisierungstendenzen, Risiken und Schwachstellen des Systems erkennen lässt.⁵⁹

Man kann unter Umständen schon aus wenigen relevanten Daten erfahren, wie ein System funktioniert, wie es sich im Gleichgewicht hält oder sich durch Störfaktoren verlagert, wenn man nur die wesentlichen Vernetzungen in diesem System kennt.

Dies ist offenbar nur dadurch zu erklären, dass die Faktoren und Beziehungen von untergeordneten Modell-Auflösungsebenen mit ihren Wechselwirkungen in der Grobstruktur der übergeordneten Ebene zum grössten Teil automatisch enthalten sind.⁶⁰

Die häufigsten Fehler und Gefahren, die im Umgang mit komplexen Systemen bzw. Modellen begangen werden, sind⁶¹:

- Uebermässige Modell-Verfeinerung: Jede Verfeinerung eines Modells erhöht dessen Komplexität, erschwert seine Handhabung, reduziert seine Uebersichtlichkeit und steigert die Untersuchungskosten, wobei sich i.d.R. der Informationszuwachs bei jeder zusätzlichen Verfeinerung verringert. Weiter können Verfeinerungen u.U. den Komplexitätsgrad des Modells soweit erhöhen, dass das Modell die relative Kapazitätsgrenze des Hilfsmittels (Simulations-SW oder Computer) übersteigt.
- Mangelnde Daten: Ein Modell hat immer im Hinblick auf die zur Verfügung stehenden Daten konstruiert zu werden; es nützt nichts, ein anspruchsvolles Modell zu bauen, wenn die erforderlichen Daten nicht verfügbar sind.
- Falsches Vorgehen: Grosse Datenmengen werden gesammelt, jedoch kaum Beziehungen aufgezeigt. Dadurch sind die Daten in keine Ordnung zu bringen und die Dynamik des Systems bleibt unbekannt.

⁵⁹ VESTER 80, S. 45 nach VESTER F., HESLER A.v., "Das Sensitivitätsmodell" Regionale Planungsgemeinschaft Untermain, Frankfurt, 1980.

⁶⁰ Vgl. VESTER 76, S. 39.

⁶¹ Vgl. VOGT 83, S. 95 f. und VESTER 76, S. 47 f. sowie auch VESTER 80, S. 25 nach DÖRNER D., "Problemlösen als Informationsverarbeitung", Kohlhammer, Stuttgart, 1976.

- Einseitige Schwerpunktbildung: Der Anwender versteift sich auf einen Ausschnitt der Gesamtsituation, der von ihm für richtig befunden wird. Hierdurch bleiben jedoch andere Bereiche unbeachtet.
- Falsche Abstraktion: Logische Fehler, durch fachspezifische Formulierungen mit ihrer scheinbaren Exaktheit verdeckt, lassen sich durch den Zwang zur klaren und einfachen Darstellung des Inhalts leichter erkennen und korrigieren. Auch Missverständnisse, Sackgassen, Trivialitäten und Unwesentliches werden eher erkannt.

Ein Modell zeigt seine Brauchbarkeit und Güte erst in der Konfrontation mit der Realität, d.h. in der Übereinstimmung der aus dem Modell abgeleiteten Folgerungen mit den Beobachtungen in der Wirklichkeit (Validierung). Für ein gutes Verständnis, eine gute Erklärbarkeit und eine leichte Kontrolle sind die Modelle immer denkbar einfach zu gestalten. Eine spezifische schrittweise Verfeinerung kann immer noch erfolgen.⁶²

Auch die Überprüfung eines Modells ist keine einmalige Angelegenheit. Bei jeder Änderung des Grundmodells muss das Modell auf die daraus folgenden Konsequenzen hin neu überprüft werden. Wurde das Grundmodell stark verändert, so sind die Verifikation und die Validierung als Ganzes zu wiederholen. Eine derartige Überprüfung setzt ein nachvollziehbar erstelltes/reduziertes Grundmodell voraus, das sauber verifiziert (logische Konsistenz) sowie validiert (Übereinstimmung mit der Realität) ist. Andernfalls bleibt jede Aussage mit einer nicht bekannten Unsicherheit behaftet.

Daraus folgen die Qualitätskriterien an ein Simulations-Modell⁶³:

- einfach zu verstehen, transparent, strukturiert
- ziel- und verwendungsorientiert
- robust bezüglich der Ergebnisse, Reproduzierbarkeit
- erlaubt alle geforderten Aussagen
- einfache Handhabung
- einfache Modellanpassungen

⁶² Einige Simulations-Pakete unterstützen diese spätere schrittweise Verfeinerung nur mangelhaft.

⁶³ Vgl. auch SHANNON 75, S. 22.

3. SIMULATIONS-ANWENDUNG (ANMERKUNGEN)

Die Simulation ist eine "mächtige" Alternative zu traditionellen Planungs- und Entwurfstechniken. Was muss unternommen werden, um dieses Instrument im Umfeld der Betriebsplanung zu etablieren? Die Computerkapazität und deren Leistungsfähigkeit sind gegenwärtig meistens kein limitierender Faktor mehr. Ausnahmen entstehen meistens nur im weiteren Umfeld der Simulation, z.B. bei extremen Animationen. Einerseits wird das Bedienungs-niveau der Simulations-SW immer einfacher und erfordert deshalb zunehmend weniger Computerwissen. Andererseits wird die SW-Struktur sowie die -Arbeitsweise (innere Abarbeitungsfolge) tendenziell durch neue Funktionen immer komplexer. Diese SW-Interna werden durch die Bedienungsfläche immer mehr verdeckt, so dass sie für den Benutzer nicht mehr nachvollziehbar sind. Dieser Zusammenhang beinhaltet diverse Gefahren in der Anwendung.

Daneben sind in der praktischen Anwendung starke Einsatzhemmnisse für die Simulation vorhanden. In diesem Kapitel werden nach einer Auflistung verschiedener Kategorien von Einsatzhemmnissen Forderungen bezüglich der Simulations-Qualität⁶⁴ und Wirtschaftlichkeit beim Einsatz abgeleitet. Anschliessend wird eine begrenzte Zahl an Vorgehensmodellen daran gemessen und bewertet.

In dem an dieses Kapitel anschliessenden Teil "Konzeption einer Vorgehensmethode" wird, ausgehend von der Bewertung der gezeigten Vorgehensmodelle, ein Vorschlag für eine Vorgehensmethode abgeleitet und aufgezeigt.

3.1 EINSATZHEMNMISSE / FORDERUNGEN

In diesem Zusammenhang ist es wichtig festzuhalten, dass die Simulation ein Instrument zur Unterstützung bei Problemlösungen ist. Sie ersetzt keine Planung an sich, und sie ist manipulierbar.

Im zeitlichen Rückblick über verschiedene abgeschlossene Simulations-Projekte zeigen sich besonders drei Problemkreise, weshalb Simulations-Anwendungen häufig unbefriedigend verlaufen⁶⁵:

1. **Methodische Vorgehensfehler, bedingt durch ungenügende Kenntnisse und Ausbildung der Anwender. Dazu gehört auch die Unkenntnis möglicher Gefahren und die Schwierigkeit, begangene Fehler zu korrigieren.**
2. **Unklare bzw. ungenügende Positionierung der Simulation innerhalb von Projekten, verbunden mit unklaren Zielsetzungen, sowie daraus abgeleitet eine falsche Einschätzung des erforderlichen zeitlichen Aufwandes und damit auch des Nutzen/Aufwand-Verhältnisses.**

⁶⁴ Vgl. Kapitel Nr. 3.2 "Qualitätssicherung".

⁶⁵ Diese Aufzählung basiert auf der Erfahrung der vom Verfasser durchgeführten Simulations-Projekte.

3. Kauf bzw. Auswahl von Simulations-SW unter falschen Annahmen durch einseitige und oft mangelhafte Beratung bzw. Vorkenntnisse. (Siehe auch Punkt 1.)

Diese Gründe lassen sich unter dem Stichwort "Ausbildung" und "Erfahrung" subsummieren.

3.1.1 Vorgehensfehler

In diesem Abschnitt werden Fehler beschrieben, die sich durch eine falsche Abfolge der Vorgehensschritte ergeben und damit einen methodischen Ursprung haben.

Ein gutes und zweckmässiges Vorgehen kann entweder durch eine Ausbildung erlernt werden oder kann durch Versuch und Irrtum (viel Zeit) aus der wiederholten Erfahrung abgeleitet werden. Das Ziel einer Simulations-Ausbildung ist auch "Wissen wie . . . ?".

Für die Anwendung der Simulation ist, neben dem Vorgehen, noch Wissen notwendig über:

- das zu untersuchende Gebiet
- die zu lösende Problemstellung
- die Stärken und Grenzen der Simulation
- die spezifische Simulations-SW

Häufige Vorgehensfehler sind:

- Keine klar definierten Simulations-Ziele und Bewertungsmaassstäbe für die Lösung
Die Simulations-Ziele werden erst zum Schluss oder im Verlauf des Projektes festgelegt. Das verhindert ein zielgerichtetes, kalkulierbares Vorgehen. Manchmal wird die Simulation eingesetzt, um das Fehlen klarer Projektziele zu vertuschen. Immerhin besteht die Hoffnung, durch intensive Beschäftigung im Rahmen der Simulation, Anregungen und Lösungen zu finden, die das Projekt dann hinterher rechtfertigen. Durch die fehlenden Bewertungsmaassstäbe wird bei den Zielen nicht festgelegt, welches Ergebnis gut, besser oder schlecht ist. Die Simulations-Untersuchungen werden dadurch auf intuitiver Basis fortgesetzt, bis die terminlichen und/oder finanziellen Ressourcen erschöpft sind.
- Fehlende Konsistenzprüfung der Ergebnisse
Das Ergebnis einer Simulation wird massgeblich durch die verwendete und umgesetzte Modell-Konzeption bestimmt. Bei Unklarheiten muss der Ursache nachgegangen werden. Fehler können sowohl bei den Input-Daten als auch bei der konzeptionellen Realisation des Modells liegen.
Daneben gibt es Fehler, die durch eine Sensitivitätsanalyse aufzudecken sind. Jede diskrete Computer-Simulation unterliegt internen SW-technischen Prioritäten und

numerischen Effekten. Diese sind durch die Realisierung der Simulations-SW in Kombination mit der Modell-Konzeption bedingt.

- **Mangelnde statistische Kenntnisse**

Der erfolgreiche Einsatz von Simulation setzt Kenntnisse in den Grundlagen der mathematischen Statistik voraus. Die Statistik dient der Unterstützung bei der Datengewinnung, -abbildung und -auswertung. Fehlen diese Kenntnisse, so werden die Ergebnisse häufig falsch interpretiert und/oder das erhaltene Datenmaterial wird ungenügend ausgewertet.

- **Fehlende Versuchsplanung**

Eine effiziente Simulations-Anwendung ist bei einer fehlenden, konkreten Vorgehensabsicht unmöglich. Diese Versuchsplanung enthält die Abfolge der Versuche. Sehr oft - bei unklaren Zielen immer - werden die einzelnen Simulationsläufe intuitiv aneinandergereiht in der Hoffnung, das Optimum in einem "n"-dimensionalen Lösungsraum zu finden. Jede Simulations-Studie sollte eine Versuchsplanung beinhalten, um ein effizientes, zielgerichtetes und kalkulierbares Vorgehen zu ermöglichen. Der Aufwand lässt sich nur bei einem konkreten und geplanten Vorgehen abschätzen ⁶⁶.

- **Fehlender Realitätsbezug und fehlende Unvoreingenommenheit bei der Modell-Konzeption (man spricht von "sich in sein Modell verlieben")**

Es ist eine häufige Tendenz des Modell-Erstellers, die eigene Sicht des Problems als beste und/oder einzige zu sehen. Durch die sehr intensive Beschäftigung entsteht eine hohe Identifikation mit der vorgeschlagenen Lösung. Dieser Punkt erschwert i.d.R. die Sicht auf neue Lösungsansätze sowie die Kritikfähigkeit.

Ist der Simulations-Anwender nicht aktiv und kritisch ins übergeordnete Projekt eingebunden, so entstehen aus dem einseitigen Blickwinkel unbefriedigende Lösungen.

Durch den fehlenden Kontakt zum realen Projekthintergrund sieht der Anwender zwangsläufig "sein" SW-Modell als einzige Realität.

Weiter besteht bei iterativ (ungeplant) entstandenen Computer-Modellen die Gefahr, einzelne Fragebereiche nicht ausreichend abzudecken. Leider werden oftmals trotzdem mit Bezug auf das Simulations-Modell Aussagen gemacht, obwohl sie sich aus den konkreten Simulations-Ergebnissen nicht ableiten lassen.

Einem fehlenden Realitätsbezug bzw. einer fehlenden Unvoreingenommenheit kann nur durch eine gute Einbindung ins Simulations-Umfeld (Projekt) vorgebeugt werden. Auch eine ausführliche Aufgaben- und Lösungsanalyse auf quantitativer und qualitativer Basis hilft die geschilderte Gefahr zu vermeiden.

- **Mangelhafte Dokumentation der Simulations-Studien**

Die Dokumentation ist ein Nachweis für das Vorgehen und die Qualität sowie die Funktionsweise (Aufbau, innere Logik) und die Ergebnisse der Studie. Die Dokumen-

⁶⁶ Es gibt Aussagen, der Simulations-Aufwand lasse sich nicht schätzen, da Simulation ein rein intuitives Verfahren sei.

tation hilft Aussenstehenden, die Entstehung der Ergebnisse mit Zwischenschritten nachzuvollziehen. Eine gute Dokumentation schafft durch Transparenz Vertrauen. Ohne eine Dokumentation ist es praktisch nicht möglich, ein bestehendes älteres Modell zu warten oder an ihm Anpassungen vorzunehmen.

3.1.2 Gefahren in der Anwendung

Neben den Vorgehensfehlern ergeben sich auch Gefahren in der Anwendung der Simulation.

Häufige Fehler und Gefahren in der Simulations-Durchführung sind:

- Simulation braucht Zeit, Geld und Experten.
Fehlt einer dieser Punkte, ist das Simulations-Ziel gefährdet⁶⁷. Besonders der Aufwand zur Datenerhebung und -bereinigung wird unterschätzt. Es gilt: Das Ergebnis kann nicht besser sein als die dazugehörige Qualität der bereinigten Input-Daten. Dabei ist die Datenmenge nicht relevant. Die Erfahrung zeigt, dass vielfach Annahmen und Aussagen zu Daten unreflektiert, ohne Ueberprüfung, z.B. einfach aus Bequemlichkeit, übernommen werden. Der Ursprung und die Verwendung von den Daten - besonders den kritischen - sollte dokumentiert werden. Es wird ersichtlich: grösserer Aufwand und mögliche Fehler lassen sich vermeiden, falls keine unnötigen Daten erhoben werden; d.h. das Modell ist durchdacht und enthält keine entbehrlichen Detaillierungen.
- Projekt-Integration der Simulation
Der Simulations-Anwender muss mit der Problemstellung vertraut und auch voll in das Projekt zur Lösung dieser Aufgabe eingebunden sein. Es bedarf einer engen Kooperation mit den Projektpartnern und Auftraggebern. Ist dies nicht der Fall, so besteht einerseits eine erhebliche Gefahr falscher oder unzulässiger Abstraktionen bei der Modellierung des Problems. Damit verlieren die Ergebnisse an Wert. Weiter lassen sich qualitative Mängel in der Validierung sowie Missverständnisse befürchten. Andererseits gehen qualitative Ergebnisse und Zusammenhänge und damit ein Teil des Nutzens aus der Simulations-Studie für das Projekt ungenutzt verloren.
Es ist von Vorteil, Simulations-Experten schon im Vorfeld einer denkbaren Simulations-Studie beizuziehen. Durch ihre Kenntnisse kann die Simulation gezielter und mit einem besseren Nutzen/Aufwand-Verhältnis in ein Projekt integriert werden. Für eine erfolgreiche Integration der Simulation in Projekte ist der Einsatzzeitpunkt entscheidend. Je früher die Simulation eingesetzt wird und je länger sie ein Projekt begleitet, desto mehr Freiheitsgrade kann sie helfen positiv auszunutzen (vgl. Bild Nr. 4, Wis-

⁶⁷ Demgegenüber hat die Simulations-SW nicht den gleichen Stellenwert. Mit guten Kenntnissen lassen sich z.B. aus einem einfachen Paket mehr und bessere Ergebnisse erarbeiten als bei schlechten Kenntnissen aus einem optimalen Paket.

sens-Gewinn durch Simulation). In vielen Projekten wird der Einsatz der Simulation zu einem Zeitpunkt entschieden, wenn bereits ein grosser Teil der investitionswirksamen Entscheide gefallen ist. Dann sind die zu variierenden Freiheitsgrade eingeschränkt, was sich wiederum auf das Nutzen/Aufwand-Verhältnis sehr nachteilig auswirkt ⁶⁸.

- Simulation braucht eine übergeordnete Projektverankerung.

Die Simulation ist ein Hilfsmittel, sie optimiert an sich nichts. Sie kann die Planung in unterschiedlichster Weise unterstützen, aber selbständig keine Planung durchführen. Eine generelle Optimierung wird nicht automatisch unterstützt ⁶⁹. Die Simulation ist bei korrekter Anwendung ein Denkverstärker (zeigt Zusammenhänge) bzw. eine Antwortmaschine (Input ergibt Output). Als ein computerisiertes Hilfsmittel erfolgt die Simulation genau nach den ihr vorgegebenen, evtl. auch falschen Vorschriften.

Es besteht die Gefahr, dass die Simulation nur eingesetzt wird, um einen Entscheid oder eine Idee zu bestätigen, d.h., das gewünschte Ergebnis steht dabei im voraus fest. Die Simulation liefert dann quasi postum eine Rechtfertigung. Da die Ergebnisse durch Computer und Simulation erzeugt wurden, geniessen sie i.d.R. ein grosses Vertrauen und eignen sich gut für eine Rechtfertigung. Es besteht dann die grosse Gefahr, gewünschte Ergebnisse in das Modell "hineinzusimulieren" ⁷⁰.

- Aussagen ableiten, für die das Modell nicht anwendbar ist

Eine Gefahr besteht in der Interpretation von Simulations-Ergebnissen zu einem anderen Zweck als es die ursprüngliche Modellkonzeption vorsah.

Ein häufiges Beispiel ist, dass ein Simulations-Modell, das zur Systemdimensionierung konzipiert wurde, für Aussagen bezüglich Steuerungsstrategien bei unterschiedlichem Teilemix herangezogen werden soll. Das gleiche gilt auch, wenn die Simulations-Ziele fehlen bzw. sich im Verlaufe eines Projektes verändern. Dadurch sind Aussagen gewünscht, für die das Modell nicht oder nur unzureichend geeignet ist, da seine Grenzen erreicht werden.

- Vertrauenswürdigkeit der Simulationsläufe

Die Aussagekraft der Simulations-Ergebnisse hängt in einem starken Mass von drei verschiedenen Bedingungen für die einzelnen Läufe ab. Diese Bedingungen sind: Einlaufzeit, Lauflänge und Anzahl von Laufwiederholungen. In Zweifelsfällen und bei ungenügender Erfahrung ist es von Vorteil, einen Statistiker oder eine in Statistik versierte Person beizuziehen.

⁶⁸ Ein anderer Grund für den Simulations-Einsatz sind Pannen in Projekten, z.B. wenn die Kapazität zu klein ist. In diesen Fällen gilt es, das Beste aus einer verfahrenen Situation zu machen. Der Nutzen ist vorgegeben und der Aufwand spielt nicht mehr eine so bedeutende Rolle. Auf das ganze Projekt gesehen ist aber der Nutzen sehr partiell (wenige Freiheitsgrade).

⁶⁹ Nur für ganz spezielle Anwendungen existieren regelbasierte Ansätze zur aktiven Optimierungs-Unterstützung.

⁷⁰ Anmerkung: Für den Wahrheitsgehalt gilt bei Simulationen das gleiche wie auch bei den Statistiken. Nur wer sie gemacht hat weiss genau, was dahinter steckt. Abhilfe kann durch die Anwendung der Qualitätsmerkmale geschaffen werden.

Die Vertrauenswürdigkeit ist in folgenden drei Situationen nicht gegeben:

1. Keine oder keine ausreichende Einlaufperiode bei Simulationsläufen kann zu falschen Ergebnissen führen. Häufig werden Simulationsläufe mit einem leeren bzw. ungenügend oder falsch vorbelegten (gefüllten) System gestartet und dann ausgewertet. Dabei wird aus Ungeduld und/oder Unkenntnis gehandelt. Für aussagekräftige Simulations-Ergebnisse muss vor der Werteerfassung ein quasi stationärer Systemzustand, der repräsentativ für das reale Problem ist, erreicht werden. Bei kritischeren Simulationen muss die Länge der Einlaufperiode auf jeden Fall statistisch abgesichert werden.
Die Belegung eines Modells mit Startwerten kann die Einlaufzeit verkürzen, aber nie ganz ersetzen. Der Grund liegt darin, dass in der Realität alle denkbaren Zwischenzustände (bezogen auf aktive Simulations-Ereignisse) auftreten können.
2. Zu kurze Simulationslaufzeiten bewirken nur die Betrachtung eines Ausschnittes von Ereignissen. Um eine gesicherte Aussage abzuleiten, muss im betrachteten Simulations-Zeitraum eine genügend grosse Zahl von Ereignissen auftreten, evtl. auch eine genügend grosse Zahl von verschiedenen Ereignissen. Längere Laufzeiten bieten Gewähr, auch ausgefallenerere Ereigniskombinationen zu enthalten.
3. Eine zu kleine Zahl von Laufwiederholungen mit identischer Konstellation für statistisch "gesicherte" Aussagen ist unzulässig. Als Ergänzung zu den vorherigen Abschnitten ist auch die Zahl von durchgeführten und miteinander ausgewerteten Simulationsläufen entscheidend. Besonders bei Verwendung von stochastischen Modell-Eingaben muss auch der Output von einer genügenden Qualität sein. Dazu bedarf es je nach Aussageniveau einer Mindestanzahl von Output-Daten.

- Gefahr einer falschen Schwerpunktsetzung bzw. des Abgleitens

Oftmals wird bei Schwierigkeiten und Unklarheiten während der Simulations-Studie in das Ausleuchten von Projekt- bzw. Modell-Details geflüchtet, unabhängig von der Relevanz für die eigentliche Zielsetzung (die Lösung liegt nicht im Detail). Eine Folge davon ist der überproportional steigende Datenbedarf und die sinkende Transparenz. Es ist empfehlenswert bei Schwierigkeiten ein höheres Abstraktionsniveau zu wählen um Uebersicht zu erlangen und dann eine Lösung zu suchen oder um einen Zusatzaufwand festzulegen, der sich rechtfertigt.

Der Schwerpunkt einer Simulations-Studie ist nicht eine SW-Programmierung am Computer. Simulation verlangt vielmehr eine relativ grosse konzeptionelle Vorarbeit, siehe Kapitel Nr. 3.3 "Vorgehensmodelle: Beispiele" und Nr. 4. "Konzeption einer Vorgehensmethode".

Bei der Simulations-Anwendung besteht, unterstützt durch Möglichkeiten einer "schönen" Animation und der vorhandenen interaktiven Fähigkeiten für den Betreiber die Gefahr, dass die Simulation zu einer reinen Unterhaltung verkommt. Diese Anwendung weist viele Parallelen mit Computerspielen auf.

- Animation ist nur ein Resultat von mehreren möglichen Ergebnissen. Eine Anwendung der Simulation geht über eine Visualisierung in Form einer Animation weit hinaus. Die Simulation unterstützt eine konkrete Problemlösung. Eine ansprechende Animationsoberfläche ist an sich überzeugend, sagt aber nichts aus über die Fähigkeiten der Simulation im Hintergrund. Dadurch, dass von den SW-Anbietern und auch von den Medien primär das Vorzeigbare (die Animation) behandelt wird, ist der Stellenwert für Simulationen im Umfeld der Produktion meistens überbewertet. Dabei ist die Animation nur ein qualitatives Ergebnis unter mehrheitlich quantitativen.
- Auswahl der Simulations-SW
Die Simulation ist primär kein SW-Problem. Bei der Auswahl eines Simulations-Paketes ist stets das konkrete Ziel der Anwendung sowie der Benutzerkreis zu berücksichtigen. Bench Mark's mit allen wesentlichen Elementen sind der einzig absolut zuverlässige Test. Die überwiegende Zahl von Simulations-Paketes ist spezialisiert oder für eine bestimmte erste Anwendung entwickelt worden. Diese Wurzeln eines Paketes bleiben in der Regel im Hintergrund erhalten und äussern sich in den spezifischen Stärken und Schwächen.
Es ist zu beachten, dass die SW auch Ursache für Probleme ist. Die Pakete sind wegen der relativ kleinen Verbreitung (nur 1 bis 2'000 Stück) im Verhältnis zu anderen SW-Paketes bis ans Ende ihrer Produktlebenszeit mit Fehlern und Unzulänglichkeiten behaftet.

3.2 QUALITÄTSSICHERUNG

Die Simulation auf einem Computer ist für Aussenstehende in der Regel nicht direkt nachvollziehbar. Dies gilt auch bei grafischen Animationen. Bei den meisten Simulations-Paketes beinhaltet die Animation nicht den kompletten Sachverhalt und nicht in jedem Fall die richtige Gewichtung der dargestellten Elemente ⁷¹.

Um in der Simulation zu richtigen und aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen, ist eine Qualitätssicherung sowie die Schaffung von Transparenz notwendig. Dadurch werden viele Vorgehensfehler und Gefahren in der Anwendung vermieden.

Qualitäts-Merkmale einer Simulations-Anwendung sind ⁷²:

- Eine erprobte und bewährte Vorgehensmethode
- Das Verifizieren und Validieren des Modells
- Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

⁷¹ Z.B. lassen sich Steuerungsregeln nicht direkt visualisieren. Sie sind evtl. nur über ihre animierten Wirkungen zu verfolgen. Ferner entstehen Differenzen durch die fehlerhafte Zuordnung der Simulations-Ereignisse zur Animation (Visualisierung).

⁷² Siehe auch Abschnitt Nr. 3.3.4 "Vorgehensmodelle: Beispiele, Beurteilung".

- Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich Modell und Ergebnisse
- Die Dokumentation des Vorgehens und der Ergebnisse

Anmerkungen zu den Qualitäts-Merkmalen im einzelnen:

- Eine Vorgehensmethode für die Simulation mit den Schwerpunkten "vom Groben zum Detail" und "in Varianten" ⁷³
- Die Verifikation zur Ueberprüfung der erstellten Modell-Qualität. Dabei sind auch jeweilige SW-spezifische Eigenheiten zu berücksichtigen.
- Die Validierung zur Ueberprüfung der Realitätsübereinstimmung des Modells
- Reproduzierbare Ergebnisse. Jedes Ergebnis einer Simulation muss eindeutig den Parameter-Einstellungen zuzuordnen sein.
- Eine Sensitivitätsanalyse ist notwendig, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse robust und nicht durch zufällige numerische Effekte beeinflusst sind. ⁷⁴
- Die Dokumentation erlaubt für Aussenstehende das Nachvollziehen der Ideen und Abstraktionen sowie der Funktion der Elemente. Auch verhilft sie zu einem Wiedereinstieg nach einer Unterbrechung, um z.B. weitere Modell-Varianten zu untersuchen. Bei einer undokumentierten Erstellung kann ein gutes Ergebnis oft nicht eindeutig allen gesetzten Einstellwerten zugeordnet werden.

3.3 VORGEHENSMODELLE: BEISPIELE

Durch Systematisierung und Formalisierung werden Vorgehen und Ergebnisse auch für aussenstehende Personen durchschaubar und können daher leichter nachvollzogen und ergänzt werden, als dies bei einem eher intuitiven Vorgehen der Fall sein kann. ⁷⁵

Im folgenden werden stellvertretend für zahlreiche unterschiedliche Ansätze drei Vorgehensweisen gezeigt und bewertet. Diese kleine Auswahl ist auf ASIM ⁷⁶, VDI und SHANNON ⁷⁷ beschränkt. Es ist zu beachten, dass neben vielen individuellen, z.T. publizierten Varianten i.d.R. zu jedem Simulations-Paket ein weiteres spezielles Vorgehen mitgeliefert wird.

⁷³ Gemäss SE.

⁷⁴ Eine Sensitivitätsanalyse erfolgt durch kleine Variationen der wichtigsten Parameter im Umfeld des gefundenen Ergebniswertes (Optimums). Dabei dürfen keine überproportionalen Ergebniswertschwankungen auftreten. Vgl. auch Bild Nr. 13.

⁷⁵ BEHRENDT 74, Vorwort.

⁷⁶ ASIM: Arbeitsgemeinschaft Simulation in der Gesellschaft für Informatik. Der ASIM gliedert sich intern in diverse Arbeitskreise auf, z.B. "Simulation in der Fertigung" oder "Simulations-SW und -HW".

⁷⁷ Vgl. SHANNON 75.

3.3.1 Vorgehensschema nach ASIM

Dieses Schema wurde ausgearbeitet, weil ASIM, eine deutschsprachige Arbeitsgemeinschaft zur Förderung und Weiterentwicklung von Modell-Bildung und Simulation in allen Fachrichtungen, mit ca. 700 Mitgliedern einen grossen Benutzerkreis repräsentiert.

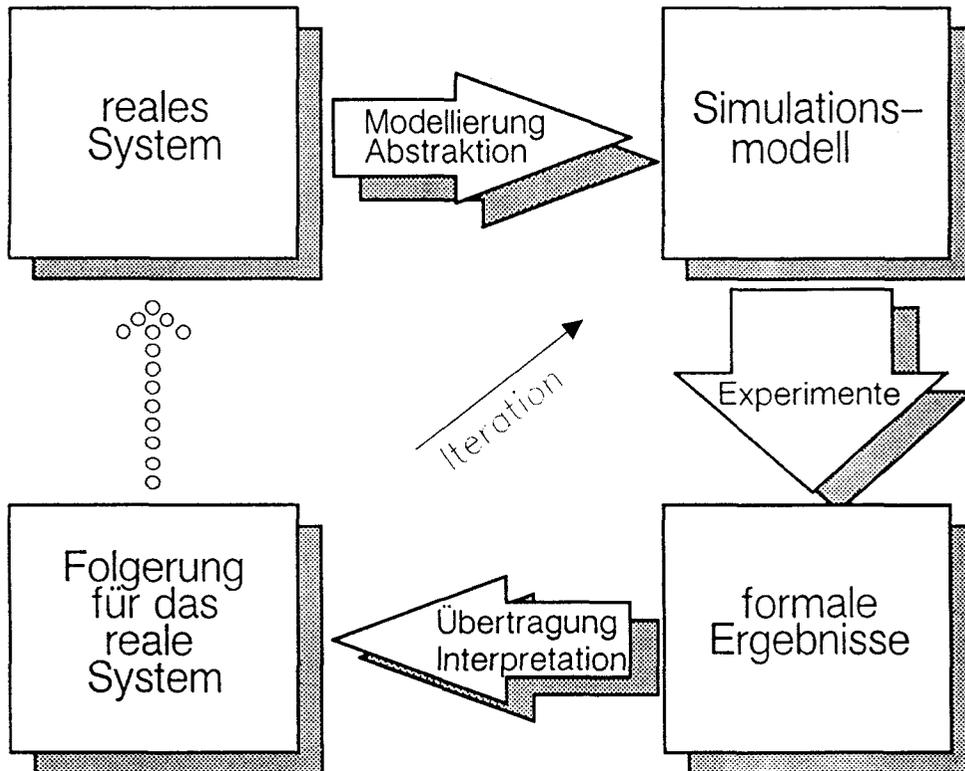


Bild 7: Vorgehen nach ASIM
(ASIM 87, S. 2)

In neueren Versionen wird ein zusätzlicher Pfeil diagonal von "Folgerungen für das reale System" zum Kästchen "Simulations-Modell" gezogen. Diese zusätzliche Verbindung soll die Iteration veranschaulichen.

Beurteilung:

Das Schema ist sehr allgemein gehalten und plakativ. Dies ergibt sich nicht zuletzt aus der Breite der Anwendungen, die von "Oekologie" über "Fertigungstechnik" bis zu "Medizin" und "Betriebswirtschaft" reicht. Für eine konkrete Anwendung ist das Schema zu global.

3.3.2 Vorgehensschema nach VDI-Richtlinie 3633

Das Vorgehen gemäss der VDI-Richtlinie 3633 (Entwurf) wurde ausgewählt, weil es als quasi Norm eine besondere Stellung einnimmt. Das Schema der Richtlinie ist ursprünglich schwerpunktmässig für die Simulation in der Materialflussplanung entworfen worden (siehe Bild Nr. 8). Das Vorgehen des Entwurfs von 1992 hat im Vergleich zum Entwurf von 1983 (nicht abgebildet) noch grundlegende Änderungen erfahren. Für die definitive Richtlinie ist mit weiteren Anpassungen zu rechnen.

Beurteilung ⁷⁸:

- + Positiv ist die Berücksichtigung von iterativen Zyklen sowie die explizite Prüfung auf "Simulationswürdigkeit".
- + In der Beschreibung des Vorgehens wird eine analytische Vergleichsrechnung in bezug auf die Machbarkeit der Lösung vorgeschlagen.
- + Dem Erstellen des Simulations-Modells geht gemäss Beschreibung eine symbolische Modellierung (Modell-Konzeption) voraus.
- Es wird nicht zwischen Verifizieren und Validieren unterschieden. In der Beschreibung wird das Verifizieren nur auf die Eingangsdaten bezogen anstatt auch auf die syntaktische Uebersetzung des Modells in eine lauffähige Version des Modells.
- Zum Zeitpunkt der Datenermittlung, -aufarbeitung und -abstimmung ist der Bedarf für das Simulations-Modell noch nicht explizit geklärt. Daher müssen einerseits Daten prophylaktisch erhoben werden und andererseits fehlen bei der Modellbildung erfahrungsgemäss doch noch einzelne Angaben.
- Weiter fehlt eine vorgängige Versuchsplanung. Auch die konkrete Positionierung im Ablauf ist nicht klar dokumentiert. Alternativen werden demnach erst bei nicht zufriedenstellenden Ergebnissen und neuen Fragestellungen generiert. Damit ist ein Abschätzen des Aufwandes nur schwer durchführbar und/oder ungenau. Auch das Ergebnis ist abhängig von der Erfahrung des Anwenders sowie vom "Zufall".

⁷⁸ Vgl. VDI-3633, S. 12 ff. und S. 18 f.

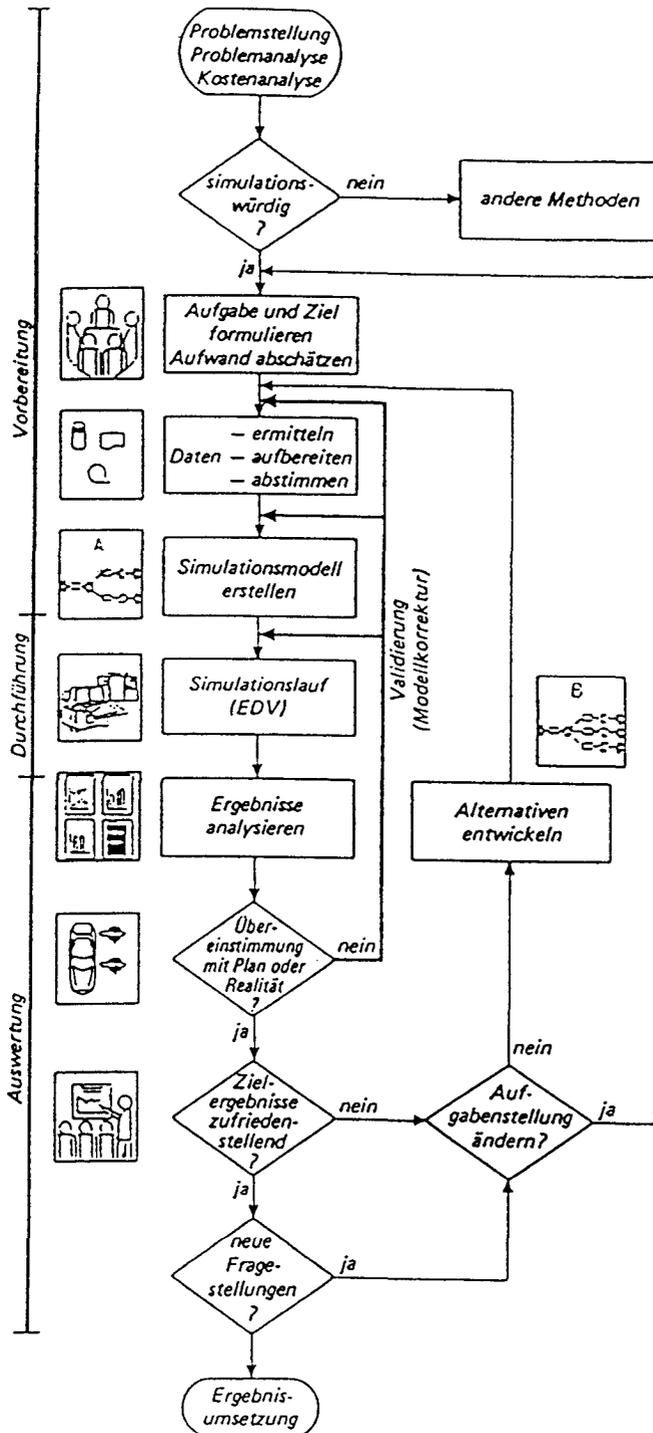


Bild 8: Vorgehen nach VDI-Richtlinie 3633 (VDI-Richtlinie 3633, S. 10)

3.3.3 Vorgehensschema nach SHANNON

SHANNON hat die Anwendung der diskreten Simulation in den USA massgeblich beeinflusst. Durch die grössere und frühere Verbreitung der Simulation in den USA ist dort ein Erfahrungsvorsprung entstanden. ⁷⁹

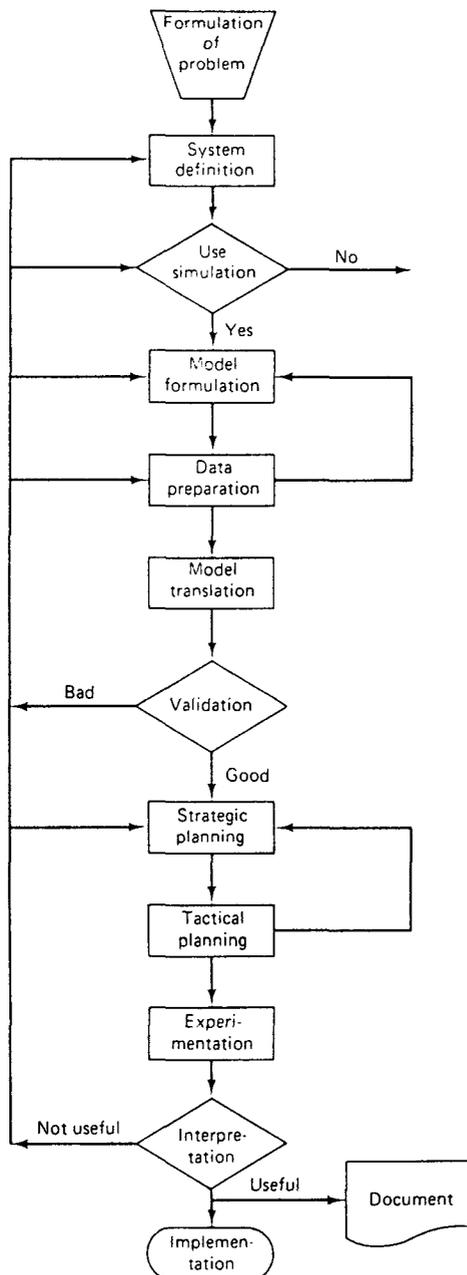


Bild 9: Vorgehen nach SHANNON
(SHANNON 75, S. 24)

⁷⁹ Man beachte: Das gezeigte Vorgehen stammt aus dem Jahre 1970.

Bewertung ⁸⁰:

- + Die Datenerhebung erfolgt erst nach der Bedarfsabklärung (Modell-Konzeption).
- + Das Vorgehen unterscheidet explizit zwischen den zwei Stufen der Versuchsplanung, d.h. zuerst strategisch und dann taktisch. ⁸¹
- + Die Versuchsdurchführung beinhaltet gemäss Beschreibung zwingend Sensitivitätstests.
- + Bei der Ergebnisinterpretation werden primär die Unterschiede ausgewertet und nicht die einzelnen absoluten Werte.
- Die Versuchsplanung erfolgt im Ablauf relativ spät. Das kann zu Modellanpassungen etc. führen. Eine Vorverlegung im Ablauf wäre sinnvoll.
- Es wird nicht zwischen Validieren und Verifizieren differenziert.
- Ungenügende Kenntnisnahme und Adaption der Erfahrung, die hinter dem Vorgehen steht, besonders in Europa.

3.3.4 Summarische Beurteilung weiterer Vorgehensweisen

Einige generelle Anmerkungen in Ergänzung zu den obigen spezifischen Beurteilungen:

- Eine Vielzahl der vorhandenen Vorgehensweisen zeigen unbefriedigende Ergebnisse bei der Verwendung, da sie neben einer oft mangelhaften Dokumentation auch Defizite in der praktischen Anwendung und in einer effizienten Simulations-Durchführung aufweisen.
- Die vorhandenen Defizite zwingen viele Anwender, neue und eigene Vorgehensvarianten zu kreieren (siehe vorherige Kapitel).
- Beim Vorgehen in der Simulations-Anwendung muss deutlich werden, dass die Kopfarbeit stark dominiert und SW sowie HW nur sekundäre Hilfsmittel sind.
- Generell ist die Simulations-Anwendung in ein Problemlösungsumfeld eingebettet, d.h., die Simulation darf kein Selbstzweck sein, sondern muss auf ein übergeordnetes Vorgehensschema - z.B. Systems Engineering - abgestimmt sein.
- Es fehlen Hilfestellungen zur vorgängigen Aufwandskalkulation bzw. -abschätzung.
- Die Aspekte der Qualitätssicherung bei der Simulations-Anwendung sind unzureichend berücksichtigt.

⁸⁰ Für die verbale Beschreibung des Vorgehens vgl. SHANNON 75, S. 23 ff.

⁸¹ Strategisch steht für die zu untersuchenden Simulations-Varianten inkl. ihrer Reihenfolge, ausgehend von der Fragestellung. Taktisch steht für die Planung der Einzelversuche mit Einlaufs- und Simulations-Zeit sowie für die Anzahl Laufwiederholungen.

Bei der Konzeption der neuen Vorgehensmethode im folgenden Kapitel Nr. 4. werden die Anforderungen und festgestellten Mängel aus diesem Kapitel weitestgehend berücksichtigt.

4. KONZEPTION EINER VORGEHENSMETHODE

Warum ein neues Konzept für eine Vorgehensmethode in der Simulation?

Die langjährige Industrieerfahrung im Umgang mit der Simulation hat gezeigt, dass die den SW-Paketen beigelegten Vorgehensschemata bei grösseren Anwendungen i.d.R. nicht ausreichen oder z.T. sogar versagen. Der Grund dafür liegt in der mangelnden Transparenz, einer schlechten Effizienz, einer unbefriedigenden Qualitätssicherung sowie einem schwer zu planenden Nutzen/Aufwand-Verhältnis.⁸²

In diesem Kapitel wird das Konzept einer auf Erfahrung basierenden und inzwischen vielfach erfolgreich erprobten Vorgehensmethode zur systematischen Anwendung der diskreten Simulation vorgestellt⁸³. Das Konzept ist an die SE-Methodik des BWI der ETH Zürich angelehnt und ihr untergeordnet⁸⁴.

Die SE-Methodik ist eine auf bestimmten Denkmodellen und Grundprinzipien beruhende Wegleitung zur zweckmässigen und zielgerichteten Gestaltung komplexer Systeme. Sie stellt eine systematische Zusammenstellung vielseitiger Einsichten und Erfahrungen zur Lösung von Problemen dar.

Die Grundsätze des Systems Engineering (SE) sind:

- | | |
|-----------------|---|
| - Grundlage | einheitliche Philosophie |
| - Anwendung | SE ist allgemein und nicht problemspezifisch. |
| - Inhalt | Systemgestaltung und Projektmanagement |
| - Vorgehen | vom Groben zum Detail |
| - Prinzip | Denken in Systemvarianten |
| - Unterstützung | Baukasten mit methodischen Hilfsmitteln |

Das SE gliedert einen Prozess der Systemgestaltung im zeitlichen Ablauf. Entsprechend der unterschiedlichen Anforderungen ergeben sich verschiedene Projektlebensphasen⁸⁵. Der Problemlösungszyklus des SE stellt einen Leitfaden zur Lösung von Problemen dar. Er kann für Probleme jeglicher Art angewendet werden und kommt innerhalb jeder

⁸² Siehe dazu das vorhergehende Kapitel 3.3 "Vorgehensmodelle: Beispiele".

Anmerkung: Es ist zu bedenken, dass die computerunterstützte Simulation nicht nur einen möglichen Nutzen bringt, sondern auch einen Aufwand bezüglich Zeit und Geldmittel verursacht.

⁸³ Das Schwergewicht liegt dabei einerseits auf inhaltlich kritischen und andererseits besonders bei grösseren abzubildenden Systemen. Bei kleineren Simulations-Projekten lassen sich Lücken und Fehler eher "überbrücken".

⁸⁴ Vgl. ACÉL 92, S. 47 ff.

⁸⁵ Siehe Bild Nr. 3 "Simulations-Anwendung nach Projektlebensphasen" im Abschnitt Nr. 2.3.1.

Lebensphase mehrmals zur Anwendung. Als Grobgliederung des Problemlösungszyklus kann man folgende Vorgehensabschnitte abgrenzen ⁸⁶:

- Zielsuche Was wollen wir?
- Lösungssuche Welche unterschiedliche Lösungen gibt es?
Welche Eigenschaften weisen die Lösungen auf?
- Auswahl Welche Lösung ist die geeignetste?

Die Simulation unterstützt innerhalb des Problemlösungszyklus primär die Teile Lösungssuche und Auswahl. Den Teil "Lösungssuche" durch Analyse und z.T. durch Unterstützung bei der iterativen Generierung von neuen Lösungsvarianten. Die "Auswahl" durch das Bereitstellen von "konkreten" Entscheidungsdaten für die Phase der Bewertung. Siehe Bild Nr. 10.

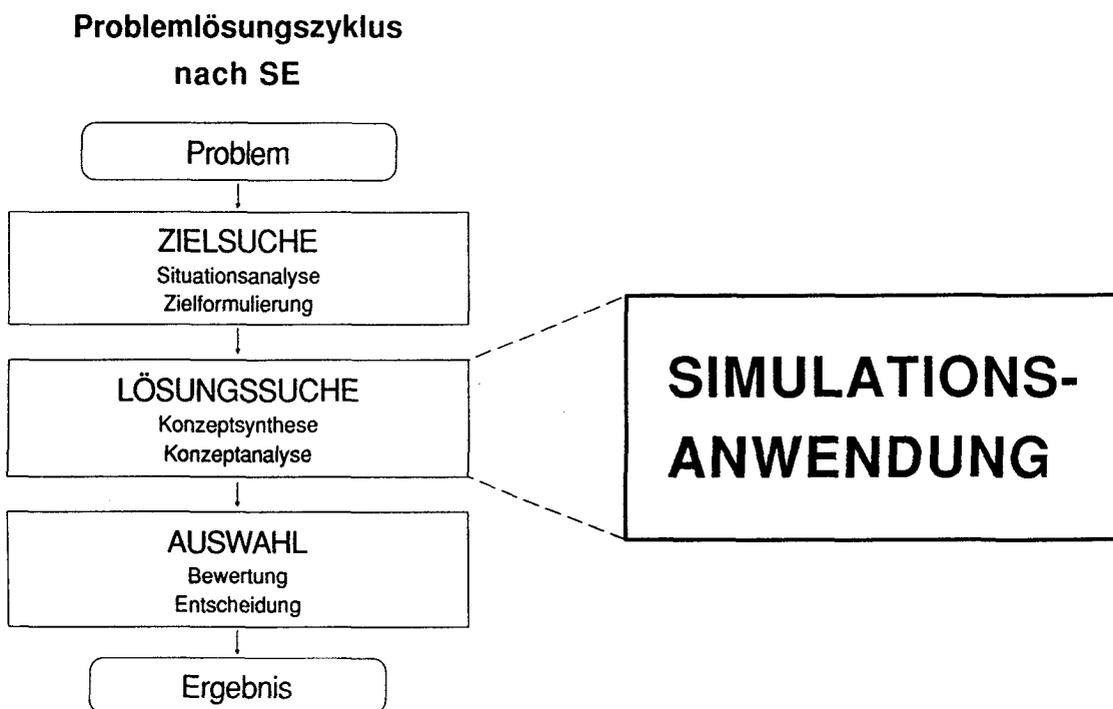


Bild 10: Einordnung der Simulations-Anwendung in das SE

⁸⁶ Zur Vertiefung des SE sei BÜCHEL 90 Teile "Systems Engineering I und II" sowie HABERFELLNER et al 92 empfohlen.

Ist die Simulation in ein grösseres Projekt - das z.B. nach SE bearbeitet wird - eingebettet, so werden einige Schritte im Rahmen des übergeordneten Vorgehens vollzogen. Dabei handelt es sich, mit Ausnahme spezieller Simulations-Aspekte, um die Schritte Situationsanalyse, Zielformulierung und Problemabgrenzung. Das Ergebnis wird dann im Rahmen der Lösungsempfehlung in das übergeordnete Vorgehen übernommen und gegebenenfalls realisiert. Im Rahmen eines umfassenderen Projektes kann der Simulations-Einsatz auch mehrfach und an verschiedenen Stellen erfolgen. Bei wiederholten Einsätzen ergeben sich Synergien, die zu einer Ersparnis führen. Diese ergeben sich primär durch eine vertiefte Kenntnis des Systems und der Umssysteme, der Anforderungen bezüglich der Zielsetzung, der Mehrfachverwendung von Modell-Komponenten und Eingangsdaten.

Das Vorgehen in der Simulations-Anwendung lässt sich in vier Hauptschritte mit mehreren Teilschritten gliedern. Die Gliederung der entwickelten Vorgehensmethode ist in Bild Nr. 11 dargestellt und in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Das detaillierte Vorgehen ist abhängig von der Projektlebensphase sowie der spezifischen Planungsthematik.

4.1 EINSATZDEFINITION

Die Einsatzdefinition enthält Vorabklärungen, die im Hinblick auf einen effizienten Einsatz der Simulation, vor Anwendung einer Software, durchzuführen sind.

Gegebenenfalls erfolgt die Auswahl einer geeigneten Simulations-SW separat zum Vorgehen, entweder parallel zum Hauptschritt "Einsatzdefinition", oder spätestens vor der Verwendung im Teilschritt "Modell-Erstellung".

4.1.1 Situationsanalyse

Der erste Teilschritt bei einer Modell-Konzeption ist das durch die Simulation zu lösende Problem zu definieren, zu formulieren und mit den übrigen Projektbeteiligten abzustimmen⁸⁷. Dabei muss das nähere und weitere Umfeld des Untersuchungsgegenstandes ausgeleuchtet werden. Der Konkretisierungs- und Detaillierungsgrad wird mit fortschreitendem Projektstand stufenweise erhöht, was einem hierarchischen (top down) Vorgehen entspricht. Dazu sind Strukturdaten zu erheben, die zur Problemabgrenzung benötigt werden. Eine umfassende Erhebung der Daten für die Modell-Erstellung bzw. Simulation erfolgt erst später, wenn der Bedarf genau spezifiziert ist.

Ergebnis	- IST-Situation analysiert
	- Problem formuliert
	- Betrachtungsbereich grob geklärt
	- Rahmenbedingungen bekannt

⁸⁷ Problemerkfassung, Aufgabenanalyse, Definition des Untersuchungsgegenstandes.

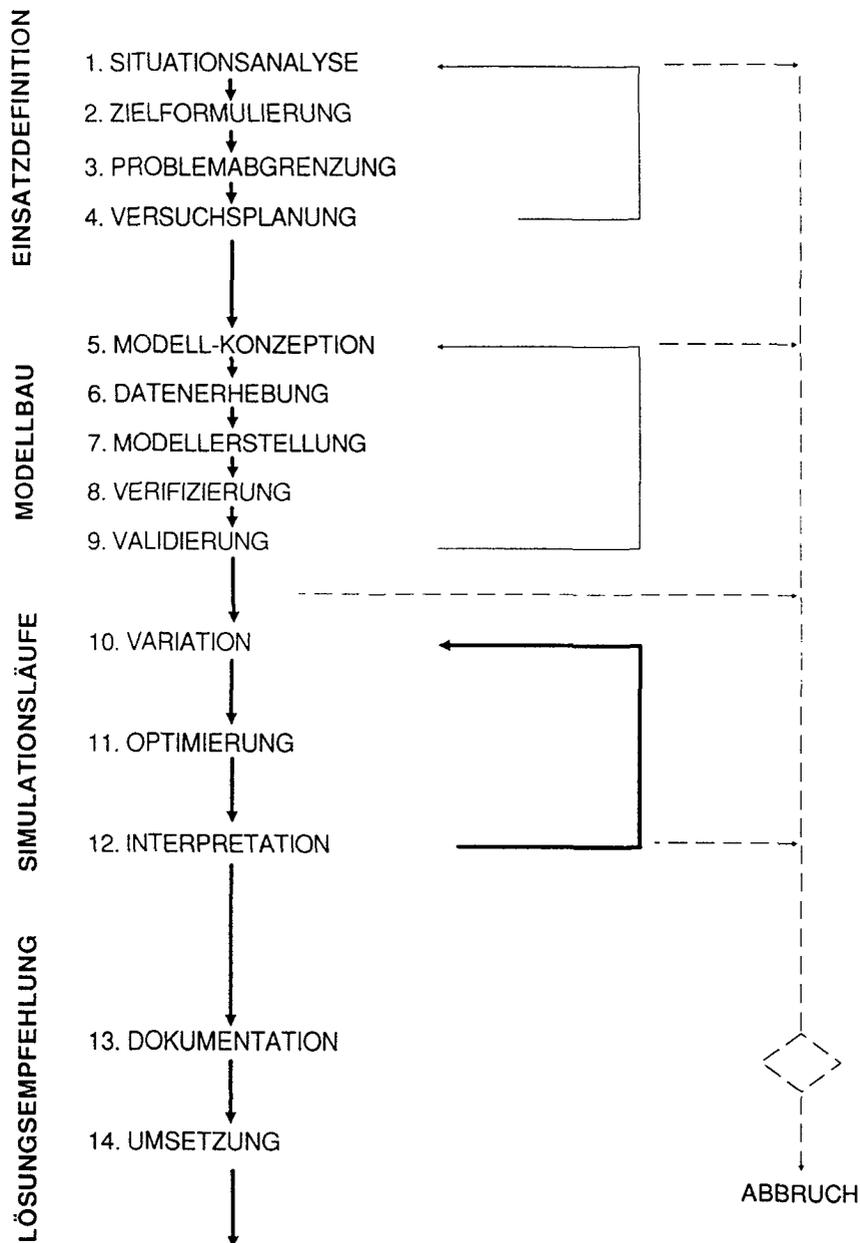


Bild 11: Vorgehen in der Simulations-Anwendung

4.1.2 Zielformullierung

Im Anschluss ist aus der Problemdefinition und den generellen Unternehmenszielen das spezifische Untersuchungsziel für die Simulation abzuleiten und mit dem Auftraggeber abzustimmen. Dieser Teilschritt der Zielformullierung beinhaltet die Definition der relevanten Beurteilungskriterien (Messgrößen) für die Bewertung der Zielerreichung des

Lösungskonzepts. Weiter gehören der erforderliche Detaillierungsgrad⁸⁸ und die zu behandelnden Sonderfälle dazu.

Charakteristische Zielgrößen sind z.B.:

- Durchsatzmengen
- Durchlaufzeiten
- Pufferbestände
- Auslastung von Bedienern und Ausrüstung

Ein grundsätzliches Problem der Simulation, dem trotz seiner weitreichenden Konsequenzen oft nicht genügend Gewicht beigemessen wird, besteht in der Wahl von geeigneten Kenngrößen zur Bewertung der Systemgüte⁸⁹. Deshalb sollten die Ziele zu einer Zielfunktion zusammengefasst werden, auch wenn dazu komplexe Verknüpfungen notwendig sein sollten. Das Bestreben ist, die Zielgrößen als einheitlichen (einen) Massstab zu konzentrieren. Dies kann evtl. auch über Geldwerte erfolgen.⁹⁰

Im Anschluss an die Zielformulierung muss die Zweckmäßigkeit (Machbarkeit) eines Simulations-Einsatzes kritisch beurteilt werden. Dabei ist zu prüfen, ob das gleiche Resultat nicht auch durch alternative, evtl. einfachere, Methoden und Hilfsmittel zu erhalten ist.

- | | |
|----------|--|
| Ergebnis | <ul style="list-style-type: none"> - Simulations-Ziel formuliert - Entscheid Simulation ja/nein - Restriktionen bekannt - Potential und Nutzen ausgewiesen |
|----------|--|

4.1.3 Problemabgrenzung

Das zu untersuchende System, der Betrachtungsbereich, ist abzugrenzen. Die Schnittstellen zum Umsystem (Umwelt), mit denen das System kommuniziert und von denen es Inputs erhält, sind explizit zu definieren. Der zu betrachtende Bereich kann bei Bedarf in weitere Teile (Subsysteme) zerlegt werden.

Der Detaillierungsgrad im Modellinneren, die grobe Struktur sowie die Schlüsselemente sind definitiv festzulegen. Diese Festlegungen hängen direkt mit der Zielsetzung und den geforderten Messgrößen zusammen.

⁸⁸ Detaillierung der Elemente und Auflösung der zeitlichen Inkremente (Diskretisierungsgrad) im Ablauf.

⁸⁹ Systemgüte: Qualität der möglichen Ergebnisse bezogen auf die konkrete Fragestellung bzw. Zielsetzung.

⁹⁰ Eine Gewichtung der Ziele zueinander kann sich gegebenenfalls mit zunehmendem Kenntnisstand im Laufe eines Projektes verändern.

Zur Problemabgrenzung bieten sich zwei dazu ergänzende Wege an ⁹¹:

- a) schrittweises Einengen des Betrachtungsfeldes
- b) Abstraktion bei der Umsetzung in das Modell

Nach diesen Festlegungen muss die Notwendigkeit einer Simulation abermals kritisch anhand der Rahmenbedingungen untersucht werden. Es kann sein,

- dass die Lösung nach einer genauen Betrachtung und guter Strukturierung auf der Hand liegt und sich die Simulation erübrigt
- dass eine Lösung infolge der Komplexität oder der restriktiven Rahmenbedingungen nicht mit einem vertretbaren Aufwand zu finden ist
- oder dass andere Methoden und Hilfsmittel sich besser eignen

Ergebnis - Fokussierung auf den Problembereich

4.1.4 Versuchsplanung mit Versuchsmatrix

Die Simulation dient der Bewertung von Lösungsalternativen. Diese sind ablaufbedingter wie auch struktureller Art. Ein Simulations-Modell ist nicht selbstoptimierend, sondern es erlaubt dem Benutzer durch eine Reihe von Modell-Experimenten die Variante auszuwählen bzw. die Alternative aufzuzeigen, die der Zielsetzung und seinen Vorstellungen am besten entspricht. Dabei liefert die Simulation, auf der Basis von Experimenten, Datenmaterial zur Beurteilung der Varianten bzw. Versuche. Die erhaltenen Daten beziehen sich prinzipiell auf strukturelle (System Design) sowie auf ablaufbedingte (z.B. Materialfluss) Zusammenhänge.

Es ist sinnvoll und notwendig, das experimentelle Vorgehen, soweit absehbar, im voraus durch eine Versuchsplanung (Versuchsmatrix) ⁹² explizit festzulegen. Um gezielt und schnell aussagekräftige Planungsdaten bzw. Ergebnisse zu erhalten, muss eine spezielle Versuchsmatrix über die zu untersuchenden Alternativen, das Vorgehen und die Art des Simulations-Einsatzes erstellt werden (siehe Tabelle Nr. 8). Dabei lassen sich verschiedene Strategien unterscheiden ⁹³. Das Spektrum der Strategien reicht von

⁹¹ Siehe dazu auch Abschnitt Nr. 2.5.2 "Modell-Konzeption".

⁹² In diesem Zusammenhang spricht man auch von einer "strategischen Versuchsplanung" im Gegensatz zu der "taktischen Versuchsplanung", die in dem hier gezeigten Konzept einer Vorgehensmethode Bestandteil der Modell-Verifikation (vgl. Abschnitt Nr. 4.2.4 "Verifikation") ist. Die strategische Versuchsplanung erfolgt vor der Modell-Konzeption und beinhaltet die Reihenfolge der einzelnen Versuche und die Art der Parameter-Variationen unter Berücksichtigung der sich an die Simulations-Läufe anschließenden Auswertung. Die taktische Versuchsplanung erfolgt nach der Modellkonzeption und Umsetzung auf einen Computer. Sie beinhaltet die Festlegung der notwendigen Anzahl Laufwiederholungen, die Länge der Einlaufzeit und die Länge der ergebnisrelevanten Simulations-Laufzeit.

⁹³ Siehe dazu Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode" mit diversen Lösungsangeboten zur strategischen Versuchsplanung.

- der punktuellen Grob-Simulation (viele Varianten), "quick and dirty" als Ueberblick, bis zur
- systematischen Fein-Simulation einiger ausgewählter Varianten mit z.B. verschiedenen Laufparameterwerten.

Bei der Planung von Simulations-Läufen ist darauf zu achten, dass vom Groben (Allgemeinen) zum Detail vorgegangen wird. Alternativen und Sensitivitätstests des Modells werden durch definierte, getrennte Varianten abgedeckt.

Eine spätere gezielte Ausweitung der Experimente ist damit nicht ausgeschlossen. Wird aber keine explizite Versuchsplanung durchgeführt, besteht die Gefahr, dass die Simulation zum zufallsgesteuerten "trial and error" bzw. "Spiel" wird.

- Ergebnis
- Versuchsalternativen
 - Versuchsreihenfolge (Versuchsmatrix)

Input \ Output		Variante I						Variante II					
		3000 Stk		4000 Stk		2000 Stk		3000 Stk		4000 Stk		2000 Stk	
		DLZ	WiA	DLZ	WiA	DLZ	WiA	DLZ	WiA	DLZ	WiA	DLZ	WiA
Losgrößenbegrenzung nach Stückzahl:	maximale Losgröße: 1000 Stk												
	Losgröße: 500 Stk												
Losgrößenbegrenzung nach Arbeitsstunden:	Arbeitsstunden: ≤ 500 h												
	Arbeitsstunden: ≤ 500 h												
Programmfertigung:	Fertigungsrhythmus: 2 Wo												

 Basis
  zu untersuchen
 DLZ: Durchlaufzeit
 WiA: Ware in Arbeit

Tabelle 8: Beispiel für eine Versuchsmatrix ⁹⁴

⁹⁴ Im Beispiel unterscheiden sich die Varianten durch unterschiedliche Dimensionierung. Dabei ist der Variante zwei ein umfangreicheres Teilesortiment zugewiesen. Siehe auch Anhang Abschnitt Nr. 2. "Fallbeispiel: Webmaschinen-Teileproduktion".

4.2 MODELL-BAU

Im zweiten Hauptschritt wird das Modell des zu untersuchenden Systems konzipiert, mittels der Simulations-SW abgebildet und ausgetestet. Die anspruchsvollste Aufgabe bei der Simulation ist der Modellbau, d.h. die Schaffung einer aussagefähigen Nachbildung der Wirklichkeit.⁹⁵

Mit diesem Hauptschritt erhält man zum Schluss ein formal korrektes, fehlerfreies Grundmodell als Basis für die eigentliche Arbeit mit dem Simulations-Modell.

4.2.1 Modell-Konzeption

Ein Modell ist ein Abbild eines Systems zum Zwecke von Untersuchungen. Die Modell-Konzeption (Modellierung) verlangt eine eindeutige Zuordnung der Systemkomponenten zu den Modell-Elementen. Im Hinblick auf die spätere computermässige Modell-Umsetzung unter Einbezug einer Simulations-SW ist es notwendig, strikt nach Elementen und Aktivitäten zu unterscheiden.

Die Modellierung ist eine hoch kreative Tätigkeit. Sie basiert sehr stark auf der generellen Planungserfahrung, der Abstraktionsfähigkeit und der speziellen Erfahrung mit der Simulations-SW. Dabei liegt die Schwierigkeit nicht in der prinzipiellen Machbarkeit, sondern in der Aussagefähigkeit und Transparenz der Lösung im Verhältnis zum Aufwand. Eine Möglichkeit zur Vereinfachung besteht darin, unkritische Bereiche im Modell nicht gleichermassen wie kritische zu detaillieren.⁹⁶

In diesem Vorgehensschritt werden die zulässigen Modell-Vereinfachungen definitiv festgelegt und die zur Modell-Bildung erforderlichen Informationen und Daten festgehalten.

Dieser Teilschritt sollte abgeschlossen sein, bevor gezielt mit der systemrelevanten Datenbeschaffung begonnen wird. Dadurch stellt man die Erfassung der erforderlichen Daten in einem Anlauf sicher, unter Einsparung aller überflüssigen. Ausgenommen sind die Daten für diejenigen Alternativen, die erst während der Simulationsläufe erkennbar werden.

Ergebnis

- Formales, abstraktes Modell

⁹⁵ Siehe Kapitel Nr. 2.5 "Modell-Bildung".

⁹⁶ Eine Einschränkung des notwendigen Datenbedarfs ist am effizientesten durch eine Erhöhung der Abstraktion zu erreichen. Damit nimmt auch die relative Unsicherheit der Eingangsdaten ab bzw. die Auswirkungen von Fehlern lassen sich besser nachvollziehen.

4.2.2 Datenerhebung

Die zu erhebenden Daten umfassen die Beschreibung des Systems mit seinen Elementen, Eigenschaften, Beziehungen und Kenngrößen. Dabei erweist es sich als hilfreich, einen typischen Zustand des Systems als Ausgangsbasis zu definieren. Das erleichtert die Nachvollziehbarkeit der Ausgangsdaten sowie die Validierung. Im besonderen sind die Prozesszeiten und Abläufe zu erfassen. Folgende Datentypen werden erhoben:

- Daten zur allgemeinen Systembeschreibung (z.B. Layout)
- Daten zu den Produkten und Teilen
- Daten zu den Maschinen
- Daten zu den Betriebsmitteln und Vorrichtungen
- Daten zum Personaleinsatz
- Verfügbarkeiten

Sollen verschiedene Modell-Konfigurationen untersucht werden, sind alle dafür notwendigen Daten zu erheben.

Der Aufwand für die Datenerfassung und -bereinigung ist nicht zu unterschätzen⁹⁷. Die Erfahrung zeigt, dass dieser Teilschritt bis zu 50%⁹⁸ der insgesamt benötigten Zeit beanspruchen kann. Man ist dabei auf externe und schwer zu überprüfende Daten sowie z.T. auf plausible Annahmen angewiesen. Durch eine geschickt organisierte Datenerhebung lassen sich viel Zeit und Umtriebe ersparen.

Folgende Organisation zur Datenerhebung wird empfohlen: Ab Projektbeginn sind ohne separate Zeitinvestition Daten ungesichtet parallel zum Projektvorgehen zu sammeln. Erst wenn der Bedarf explizit durch die Modell-Konzeption definiert ist, wird eine gezielte Datenerhebung als Ergänzung zu den bereits vorhandenen Daten eingeleitet. Der Abschluss dieses Teilschrittes erfolgt in der Praxis parallel zur Modell-Erstellung.

Bei der Datenerfassung ist einerseits zu beachten, dass die Ergebnisse der Simulation nicht besser sein können als die zugrunde liegenden Daten. Andererseits kann die Erfassungsgenauigkeit der Daten keine konzeptionellen oder strukturellen Mängel im Modell ausgleichen.

- | | |
|----------|--|
| Ergebnis | - notwendige Ausgangsdaten in Varianten über die Struktur und die zeitverbrauchenden Elemente sowie über die Aktivitäten |
|----------|--|

⁹⁷ Im Vergleich zu einer Planung ohne Simulation haben die Daten zu einem frühen Zeitpunkt konsistent vorzuliegen. Ohne Simulation liegen die "kompletten" Daten erst gegen Ende des Projektes oder erst im Verlauf der Detailplanung vor. Der Gesamtaufwand ist erfahrungsgemäss trotz anderer Verteilung in etwa gleich.

⁹⁸ Vgl. Bild Nr. 5 in Abschnitt Nr. 2.4.1 "Wirtschaftlichkeit und Kosten-Aspekte".

4.2.3 Modell-Erstellung

Das Modell entsteht als computergerechte Uebersetzung der Modell-Konzeption mit Hilfe einer Simulations-Hochsprache (SW). Dieser Teilschritt ist der erste SW- und Rechnerkontakt im Vorgehen. Die Art der Modell-Umsetzung ist sehr stark SW-spezifisch.⁹⁹

Die meisten Simulations-Pakete bieten Hilfestellung an, z.B. durch Objektorientiertheit, Makrotechniken und/oder hierarchische Gliederung sowie Menüführung. Die rein prozedurale Programmierung ist unzeitgemäss und nur noch in älteren, universellen Paketen anzutreffen. Für den gelegentlichen Anwender sind menügeführte Programme am geeignetsten¹⁰⁰. Da die Umsetzung sehr spezifisch ist, wird sie nicht weiter vertieft. Uebri-gens muss ein Simulations-Modell nicht zwingend eine Animation beinhalten.

Gelingt es, die Modell-Konzeption mit ihrer Struktur umzusetzen, ohne sie dabei wesentlich einzuschränken, kann mit der Modell-Verifikation begonnen werden.

Ergebnis

- Simulations-Modell auf Rechner

4.2.4 Verifikation

Das Verifizieren beinhaltet die Konsistenzprüfung der "inneren Logik" sowie der gesetzten Parameterwerte. In diesem Teilschritt wird das Modell auf semantische und syntaktische Fehler überprüft. Im Vergleich zu statischen Berechnungen wird untersucht, ob das Modell ausführbar ist und sich wie beabsichtigt verhält. Manchmal werden für spezielle Aspekte noch zusätzliche manuelle Kontrollrechnungen durchgeführt, z.B. Mittelwerte, Varianzen. Nicht nur das Ergebnis muss auf Plausibilität und Korrektheit des Verhaltens untersucht werden, sondern auch das Modell als Ganzes sowie alle Elemente im einzelnen. Im besonderen sind die Engpasselemente entlang des kritischen Pfades zu überprüfen.

Dieser Teilschritt erfordert einen kritischen, zum Teil manuellen Abgleich zwischen der Zielsetzung, dem Entwurf des Modells und dessen programmtechnischer Umsetzung. Durch eine Aufteilung und/oder Hierarchisierung werden Modellteile gesondert untersucht. Zum Vergleich mit manuellen Berechnungen ist es sinnvoll, stochastische bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen vorübergehend durch Konstanten bzw. Mittelwerte zu ersetzen. Je nach Simulations-Programm sind diverse Hilfen und Plausibilitätstests SW-mässig integriert, z.B. Trace-Funktionen, das Erkennen von unerreichbaren Maschinen oder widersprüchlichen Prioritäten.

⁹⁹ Bei der Verwendung dieses Konzeptes einer Vorgehensmethode werden grundlegende Kenntnisse (Stärken, Grenzen) einer Simulations-SW vorausgesetzt. Sind diese bei der Modell-Konzeption berücksichtigt worden, erleichtert dies die Modell-Umsetzung.

¹⁰⁰ Die computergerechte Umsetzung ist i.d.R., ausser bei Paketen, die eine Variantenprogrammierung beinhalten (erste Ansätze sind am Markt vorhanden), weitgehend manuell auszuführen.

Nicht nachvollziehbare Sachverhalte sind zu klären und zu beheben. Sie ergeben sich oft aus der zu wenig bekannten internen Arbeitsweise der Simulations-SW mit ihrer sequenziellen Abarbeitung der einzelnen Vorgänge.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Verifikation eines Simulations-Modells ist die Festlegung der notwendigen Anzahl Laufwiederholungen, die Länge der Einlaufzeiten und die Längen der ergebnisrelevanten Simulations-Laufzeiten. Dieses ist im Vorgehen erst jetzt möglich, da dazu erste Simulations-Läufe notwendig sind. Dies ergibt sich aus der Sensitivität dieser Festlegungen bezüglich Modell-Konzeption, -Umsetzung und SW. Die konkreten Vorgaben ergeben sich durch die Diskussion der Ergebnisse unter Berücksichtigung statistischer Grundsätze und der geforderten quantitativen Genauigkeit der Ergebnisse.¹⁰¹

Dieser Teil der Verifikation ist Voraussetzung für eine seriöse Validierung.

Ergebnis	<ul style="list-style-type: none">- ausführbares, semantisch und syntaktisch fehlerfreies Rechner-Modell- modellspezifische Randbedingungen, wie Anzahl Laufwiederholungen und die Länge der Simulations-Laufzeit inkl. Einlaufzeit
-----------------	--

4.2.5 Validierung

Während im vorherigen Teilschritt die innere Logik des Modells überprüft wurde, umfasst das Validieren des Modells den "externen Abgleich", d.h. es wird überprüft, ob das Modell die Wirklichkeit hinreichend genau nachbildet (Qualität der Abbildung bzw. Modellierung).

Bei bereits bestehenden Systemen gibt es folgendes Vorgehen: Als erstes wird die Struktur sowie die Arbeitsweise mit dem bestehenden System verglichen. Zweitens werden die Input-, Output-Größen und die kritischen Messgrößen mit den IST-Werten überprüft. Abweichungen kann man durch direkten Vergleich feststellen und mittels Rückgriff auf vorhergehende Schritte beheben.

Bei neu zu entwickelnden Systemen ist die Validierung umständlicher, da ein direkter Vergleich nicht gegeben ist. Eine Validierung ist nur durch Plausibilitätstests durchführbar und deshalb mit vielen Unsicherheiten belastet. In diesem Fall empfiehlt es sich, besonderen Wert auf den Teilschritt "Verifikation" zu legen. Eine weitergehende Beurteilung erfordert grosse Erfahrung mit ähnlichen Systemen und Strukturen. Als Gütemassstab kommen in diesen Fällen nur Resultate durch Quervergleich mit ähnlichen Systemen oder aber Berechnungen und Plausibilitätsüberlegungen in Frage.

¹⁰¹ Dieser Teil der Verifikation wird manchmal auch als "taktische Versuchsplanung" bezeichnet. Vgl. auch Abschnitt 4.1.4 "Versuchsplanung mit Versuchsmatrix".

Bei Unstimmigkeiten muss zu den vorherigen Schritten zurückgekehrt und festgestellt werden, ob die Erfassung und Definition der Messwerte korrekt ist oder ob bei der Abstraktion der Modell-Elemente Fehler unterlaufen sind. In jedem Fall muss sich der Anwender darüber im klaren sein, dass das aufgrund der Modell-Untersuchung erwartete Systemverhalten nicht in jedem Punkt 100% genau der Realität entspricht. Gerade deshalb müssen auf jeden Fall alle Output-Daten äusserst kritisch auf Fehlerquellen und Fehlinterpretationen hinterfragt werden. Die Uebereinstimmung bezüglich der Fragen und Ziele muss, im Gegensatz zu untergeordneten Bereichen, hinreichend sein.

Der Abschluss dieser Tätigkeit bildet den Ausgangszustand und die Basis für die eigentliche Arbeit mit dem Simulations-Modell (Simulation i.e.S.).

- | | |
|----------|---|
| Ergebnis | <ul style="list-style-type: none"> - Uebereinstimmung der Modell-Aussagen mit dem betrachteten realen System - getestetes Basis-Modell für die Versuche |
|----------|---|

4.3 SIMULATIONS-LÄUFE

Die folgenden Teilschritte der Simulation i.e.S. - Variation, Optimierung, Interpretation - sind nicht zu trennen. Diese drei Teilschritte werden solange sequenziell durchlaufen, bis die Versuchsmatrix abgearbeitet ist und eine befriedigende, d.h. "gute" Lösung gefunden ist. Das schliesst gegebenenfalls eine stufenweise Variantenbildung, Optimierung und Auswahl bzw. Ausscheidung ein. Dabei wird vom getesteten Basis-Modell ausgegangen.

Die Teilschritte sind mindestens so lange zu wiederholen, bis sich Varianten finden, welche die Vorgaben ausreichend (optimal) erfüllen. Darüber hinaus haben am Schluss mehrere vergleichbare und realisierbare Varianten zur Auswahl vorzuliegen. Es ist wichtig, dass man sich nicht mit der erstbesten Lösung im Modell zufrieden gibt, sondern sich mit verschiedenen Varianten einen Ueberblick über mögliche Lösungsalternativen verschafft. Dies gilt deshalb im besonderen, da die Simulation mit einer sehr grossen Wahrscheinlichkeit nicht das absolute Lösungsoptimum liefert.¹⁰²

Bieten sich während der Simulation zusätzliche planungsrelevante Alternativen an, so sind diese im Anschluss an die ursprüngliche Versuchsreihe zuerst konzeptionell und dann evtl. mit der Simulation zu überprüfen.

Sind die Varianten unbefriedigend oder ist ihre Zahl nicht ausreichend, so sind gegebenenfalls die Rahmenbedingungen und die Zielsetzungen iterativ zu überprüfen.

Alle Lösungen, welche die Anforderungen erfüllen und auch umsetzbar sind, werden als "gut" im Sinne der Aufgabenstellung bezeichnet.

¹⁰² Dieses gilt für jede Art von Heuristiken zur Suche von Optima in n-dimensionalen Lösungsräumen.

Eine integrale Bewertung verschiedener Varianten erfolgt erst im Rahmen der Entscheidungsphase des übergeordneten Projektes. Die Simulations-Studie liefert dazu die Lösungsempfehlungen.

4.3.1 Variation

In diesem Teilschritt werden die in der Versuchsmatrix (Tabelle Nr. 8) festgelegten Alternativen einzeln simuliert. Ein Versuch entspricht dabei einem Feld in der Versuchsmatrix. Das vorgesehene Vorgehen soll unbedingt eingehalten werden, um nicht in ein "wildes" Spiel abzugleiten. Es kann vorkommen, dass ergänzende Alternativen zu testen sind, die nicht vorherzusehen waren, z.B. bedingt durch zu beseitigende Engpässe.

Ergebnis - SOLL-Entwurf einer Variante der Versuchsmatrix

4.3.2 Optimierung der Lösungsvariante

Ist eine brauchbare Lösungs- bzw. Versuchsvariante gefunden, muss sie vor der definitiven Bewertung in bezug auf die Ziele noch optimiert werden. Warum muss man die Variante überhaupt noch optimieren? Die Optimierung muss durchgeführt werden, um einen ebenbürtigen Vergleich mit den anderen untersuchten Varianten zu erhalten. Wird dieser Teilschritt ausgelassen, so besteht eine erhebliche Gefahr, dass im absoluten Vergleich "bessere Varianten" wegen zufällig ungeschickter Konstellation von untergeordneten Variablen als schlechter verworfen werden. Untergeordnete Variablen sind Größen mit einem zulässigen Wertebereich, die aber nicht im Rahmen der Versuchsmatrix variiert werden.¹⁰³

Die manuelle Durchführung dieses Teilschrittes ist notwendig, da die Simulation nicht selbstoptimierend ist. Bei einem wahlfreien Teile- oder Strategie-Input einen optimalen Output zu erhalten, ist mit der auf dem Markt erhältlichen Simulations-SW nicht möglich.¹⁰⁴

Für ganz spezielle Probleme existieren einige Optimierungs-Verfahren, entweder mathematisch geschlossen (analytisch) oder zunehmend regelbasiert. Eine generelle Lösung auf analytischer Basis gilt auch heute noch wegen der Vielfalt der Anwendungen und Varianten als undenkbar.

In der Anwendung der Simulation gibt es folgende Optimierungsstufen:

¹⁰³ Siehe auch Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode" und Kapitel Nr. 8. "Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche".

¹⁰⁴ Vgl. METZLER, ACÉL 87, S. 238.

- Die Grob-Optimierung erfolgt durch die Anpassung der Primärparameter (Hauptgrösse, entscheidender Projekteinfluss), z.B. Anzahl und Typen der Maschinen. Diese Änderungen sind in der Regel in der Versuchsmatrix festgelegt.
- Die Fein-Optimierung, d.h. die Optimierung der offenen Freiheitsgrade erfolgt durch die Anpassung der untergeordneten Grössen (nicht in der Versuchsmatrix enthalten), z.B. Anzahl zugehöriger Vorrichtungen. In dieser Fein-Optimierung liegt der Schwerpunkt für den Teilschritt "Optimierung der Lösungsvariante".

In der Praxis muss das Vorgehen bei der Optimierung (Fein-Optimierung) als ein zeitraubendes, aus der Erfahrung resultierendes und iteratives Vorgehen bezeichnet werden. Dabei wird das Modell erfahrungsbasiert nach gewissen Kriterien bezüglich Zielwerten (Messgrössen) optimiert. Siehe Bild Nr. 12, "Ausloten des Bodens im trüben Wasser".

Eine Vertiefung dieser Problematik und ein mögliches Such-Konzept folgt im Kapitel Nr. 8. "Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche".

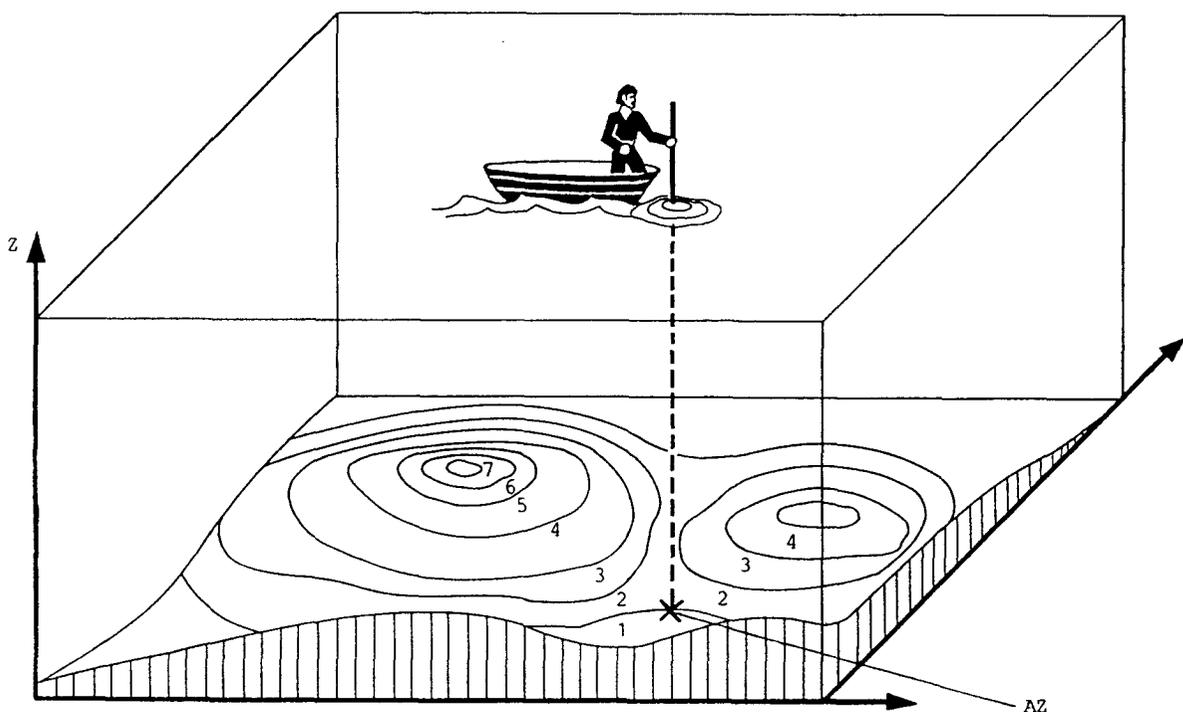


Bild 12: Allgemeine Problematik der Zielwert-Optimierung (Vogt 81, S. 260)

Das Problem der Optimierung wird dadurch erschwert, dass sich bei einer Änderung von beliebigen Parametern auch das Modell verändert. Zudem führt die Ganzzahligkeit einiger

Variablen sowie numerische Effekte ¹⁰⁵ zu Unstetigkeiten bei den Modell-Ergebnissen. Daneben gibt es noch Einflüsse durch komplex ¹⁰⁶ wirkende Parameter.

Unter Optimum sei in diesem Zusammenhang nicht das mathematisch exakte, absolute Optimum verstanden, sondern eine "gute" Lösung, die mit vertretbarem Aufwand zu finden ist, die Randbedingungen erfüllt und umsetzbar ist.

Ergebnis - Zielwert-Optimum einer grundsätzlichen Lösungsvariante

4.3.3 Interpretation

Die Interpretation bzw. die Bewertung erfolgt bezüglich der Zielerfüllung für das gesamte System sowie mindestens für die kritischen Schlüsselkomponenten. Die Auswahl erfolgt primär bezüglich der Machbarkeit in:

- a) technischer
- b) organisatorischer und
- c) ökonomischer Hinsicht

Dabei wird anhand der unter Abschnitt Nr. 4.1.2 "Zielformulierung" festgelegten Ziele gemessen bzw. bewertet. Die eigentliche integrale Bewertung der Varianten erfolgt bei grösseren Vorhaben meistens getrennt im Rahmen einer Entscheidungsphase des übergeordneten Projektes, in das die Simulations-Studie eingebettet ist.

Bieten sich während der Simulation zusätzliche planungsrelevante Alternativen an, dann sind sie im Anschluss an die erste (ursprüngliche) Versuchsreihe durchzuführen. Dieses Vorgehen hat seine Berechtigung, denn durch die intensive Beschäftigung mit dem Modell entsteht eine gute Kenntnis für das Systemverhalten, das auf jeden Fall zu nutzen ist. Zur Durchführung muss auf die vorhergehenden Teilschritte zurückgegangen werden.

Erfüllt nach mehreren Iterationen nur eine nicht ausreichende Anzahl von Varianten die gestellten Anforderungen, so sind die Rahmenbedingungen und die Zielsetzungen zu überprüfen oder gegebenenfalls neue grundsätzliche Konzeptvarianten zu definieren.

Ist eine ausreichende Zahl von "guten" Lösungen vorhanden und sind alle Simulationen gemäss der Versuchsmatrix durchgeführt, so kann mit dem nächsten Hauptschritt fortgefahren werden.

¹⁰⁵ Bedingt durch die Arbeitsweise von Computern.

¹⁰⁶ Als eine komplexe Wirkung wird der gleichzeitige additive oder subtraktive Einfluss verschiedener Parameter bezeichnet. Vgl. Kapitel Nr. 7.2 "Versuchsplanungs-Methode, Definitionen und allgemeine Erklärungen".

Ergebnis - eine zusätzliche, inhaltlich korrekte Lösungsalternative oder die Bereinigung von Fehlannahmen

4.4 LÖSUNGSEMPFEHLUNG

Dieser Hauptschritt bildet den Abschluss oder gegebenenfalls den Zwischenabschluss einer Simulations-Studie.

4.4.1 Dokumentation

Das Problem, der Auslöser für die Anwendung der Simulation, ist mit dem Vorliegen der Ergebnisse noch nicht real gelöst. Die gewählten Varianten müssen so aufbereitet und dokumentiert sein, um einerseits als Entscheidungsgrundlage zu dienen und andererseits eine Lösung real und eindeutig in ein bestehendes oder geplantes System zu implementieren. Die Ergebnisse müssen für Aussenstehende nachvollziehbar sein. Das gilt auch für den Lösungsweg, denn die Transparenz und die Dokumentation des Lösungsweges sind entscheidende Qualitätsmerkmale.

Die Ergebnisdarstellungen in dieser letzten Phase einer Simulation hängen stark von der speziellen Anfrage und den Wünschen der Auftraggeber ab, sie sind deshalb individuell zu wählen.

Ergebnis - entscheidungsfähige Unterlagen mit einer Vorauswahl verschiedener Lösungsvarianten

4.4.2 Umsetzung

In der anschliessend notwendigen Entscheidung über die Annahme der Ergebnisse und deren Umsetzung kann die einmal erstellte Simulation, durch dynamische (bewegte) Animationen ¹⁰⁷ oder sonstige Demonstrationen und Grafiken, hilfreiche Unterstützung liefern.

Bei der Realisierung kann ein einmal erstelltes Modell helfen, Fehler, Missverständnisse und damit Zeitverluste durch dynamische Animationen und/oder Grafiken zu vermeiden. In der Einführung kann man die Simulation evtl. zur Mitarbeiter-Schulung heranziehen.

Im Betrieb kann das einmal erstellte Simulations-Modell zur Ueberprüfung von SOLL zu IST-Werten, zur Detailoptimierung und zum Test von Verbesserungsideen eingesetzt werden. Je nach Simulations-Paket besteht z.T. eine Variante zur direkten Steuerung der Fabrikationsabläufe während der Betriebsphase.

Ergebnis - weitere Verwendung des Simulations-Modells

¹⁰⁷ Es ist zu beachten: Die Animation ist ein wichtiges, aber kein quantitatives Ergebnis.

5. VERSUCHS- UND OPTIMIERUNGS-STRATEGIEN

Dieses fünfte Kapitel dient als Einleitung und stellt einen Bezug der drei nachfolgenden Kapitel Nr. 6. "Parameter-Reduktion", Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode" und Kapitel Nr. 8. "Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche" zueinander her. Weiter enthält dieses Kapitel Anmerkungen zur Sensitivitätsanalyse und Stabilität von Ergebnissen.

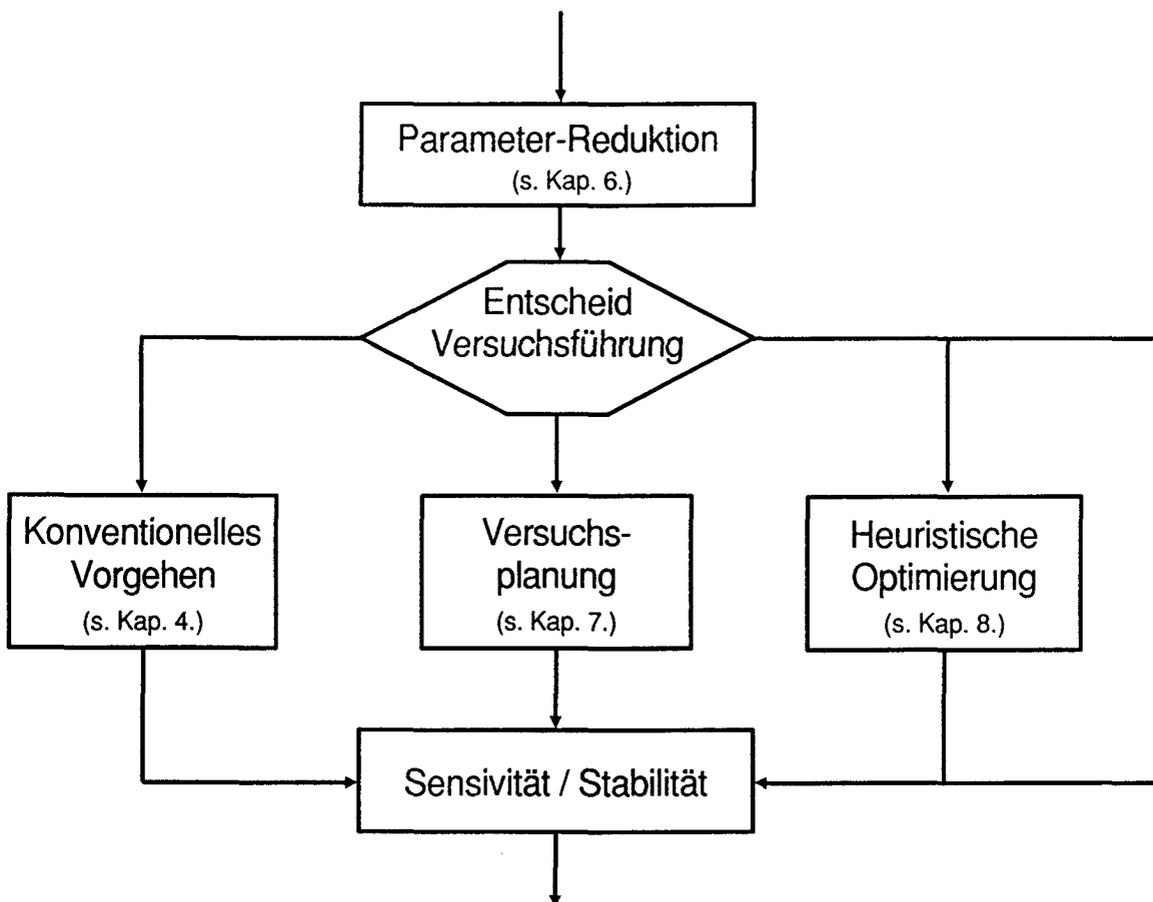


Bild 13: Versuchsführungs-Strategien

Eine Voraussetzung für jede effiziente Simulations-Durchführung ist eine systematische Parameter-Reduktion als Begrenzung des Aufwandes auf das Wesentliche (Vgl. Kapitel Nr. 6. "Parameter-Reduktion").

Die eigentliche Versuchsführung ist abhängig von der angestrebten Zielsetzung der Simulations-Anwendung. Dabei lassen sich diskussionsweise vier Fälle unterscheiden (vgl. auch Bild Nr. 13):

1. Input/Output-Betrachtung (vgl. Kapitel Nr. 4. "Konzeption einer Vorgehensmethode")
2. Parameter-Optimierung (vgl. Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode")
3. Struktur-Optimierung (vgl. Kapitel Nr. 8. "Heuristische Optimierung der Lösungssuche")
4. Sensitivitäts- / Stabilitätsuntersuchung

Folgend eine kurze Erläuterung der genannten Fälle. Die Parameter-Reduktion als Voraussetzung für alle vier Fälle wird als erstes kommentiert.

Parameter-Reduktion

Bei allen Fragestellungen bzw. Versuchsführungs-Strategien muss das Modell aus Effizienzgründen bis auf das zulässige Mass vereinfacht werden. Die Vereinfachung ist als generelle Strategie, wie sie in Kapitel Nr. 6. "Parameter-Reduktion" behandelt ist, sehr allgemein und damit breit in ihrer Anwendung. Das Kapitel beinhaltet bekannte Methoden die für diese Anwendung speziell angepasst und erweitert werden. Es handelt sich um Verfahren zur Erfassung, Einordnung und Reduktion von Parametern bzw. Variablen. Dieses Kapitel beinhaltet auch einen Vorschlag für die Verwendung einer speziell reduzierten Beeinflussungsmatrix ¹⁰⁸.

Anmerkung: Bei allen Versuchs- und Optimierungs-Strategien wird davon ausgegangen, dass für die Optimierung alle relevanten inneren Eigenschaften und externen Einflüsse durch ein Set von n Design-Variablen (Parameter) x_1, x_2, \dots, x_n ($n > 0$) beschrieben werden können. Die Ziel-Grösse, z.B. Systemleistung, ist eine Funktion dieser Design-Variablen. ¹⁰⁹

1. Input/Output-Betrachtung

Das in der Praxis am häufigsten angewendete Verfahren dient der Untersuchung des allgemeinen System-Verhaltens und des System-Verständnisses (Input/Output-Betrachtung). Dieses "konventionelle Vorgehen" hat sich in der Praxis nur für sehr einfache Struktur- und/oder Parameter-Optimierungen bewährt. Die Bearbeitung von komplexen Fragestellungen ist sehr aufwendig und der Erfolg ist nicht absehbar. Auf diese Art der Versuchsführung wird im folgenden nicht weiter eingegangen. ¹¹⁰

¹⁰⁸ In der Literatur auch als Paarwertvergleich oder Papiercomputer bezeichnet.

¹⁰⁹ Vgl. SCHOOF 87, S. 1.1.

¹¹⁰ Vgl. Kapitel Nr. 3.3 "Vorgehensmodelle: Beispiele" und Nr. 4. "Konzeption einer Vorgehensmethode".

2. Parameter-Optimierung

Liegt der Schwerpunkt der Fragestellung in der Identifikation bzw. Exploration und/oder Optimierung der Einflussstärken einzelner Parameter und ihrer Kombinationen (Parameter-Optimierung), so stehen als Strategie meist statistische Versuchsplanungs-Methoden im Vordergrund. Diese Arbeit beinhaltet die Integration einer angepassten faktoriellen Versuchsplanung in die Simulation. Die Integration der faktoriellen Versuchsplanung hat das Ziel, effizient Unterlagen für die Quantifizierung gewisser Gesetzmässigkeiten der Parameter zu ermitteln. ¹¹¹

Die Versuchsplanung ist eine Vorarbeit für die Simulation, welche häufig unterschätzt oder gar vernachlässigt wird. Die Experimente sind nach einem vorbereiteten Versuchsplan durchzuführen, in dem genaue Anweisungen über die Aenderung der Versuchsbedingungen und die Verarbeitung der Ergebnisse enthalten sind ¹¹².

Eine statistische Versuchsplanungs-Methode zur Unterstützung der Parameter-Optimierung ist in Kapitel Nr. 7. bzw. speziell in Kapitel Nr. 7.7 "Versuchs-Strategie basierend auf 2^n+1 -Versuchsreihen" beschrieben.

Anmerkung: Verbleiben trotz Parameter-Reduktion mehr als 8 bis 10 (maximal 15) massgebliche zu variierende Parameter für die Simulations-Untersuchung, dann eignen sich auf Heuristiken basierende Verfahren besser als Methoden der statistischen Versuchsplanung.

3. Struktur-Optimierung

Bei der Optimierung mit Hilfe der Simulation geht es häufig darum, eine System-Struktur zu entwerfen, um die gestellten Anforderungen bezüglich System-Dimensionierung bzw. Ressourcenverwendung besser bzw. optimal zu erfüllen (Struktur-Optimierung). Der Entwurf derartiger Systeme ist ein iterativer Vorgang. Bei Struktur-Optimierungs-Aufgaben ist die Struktur selbst Gegenstand der Untersuchung und Modifikation. Eine Konsequenz daraus ist, dass so geartete mehrdimensionale Problemlösungen in der Regel nicht linear sind ¹¹³. Damit sind geschlossene mathematische Lösungswege nur relativ selten und nur auf spezielle Probleme begrenzt anwendbar.

Den Ausweg bieten Such-Heuristiken auf Iterationsbasis. Die Optimierung ist dabei eine geplante Fortsetzung der Iteration auf ein bestimmtes Ziel hin. Die Such-Heuristiken ¹¹⁴ haben den Vorteil, für ein breites Spektrum an Anwendungen geeignet zu sein.

¹¹¹ Z.B. Suche nach einer guten betrieblichen Parameterkombination zur System-Steuerung, z.B. in Abhängigkeit verschiedener verfügbarer Kapazitäten und Einlastungsprofile bei vorgegebener Systemleistung. Vgl. auch Anhang Abschnitt Nr. 3. "Fallbeispiel: Theodoliten-Marktversorgung".

¹¹² HUBKA 84, S. 138.

¹¹³ Vgl. auch Abschnitt Nr. 4.3.2 "Optimierung der Lösungsvariante".

¹¹⁴ Vgl. bezüglich Definition des Begriffs Heuristik den Abschnitt Nr. 8.2.1. "Optimierungs-Verfahren".

Der Vorschlag für eine neue effiziente Heuristik bezüglich Struktur-Optimierung ist in Kapitel Nr. 8. "Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche", im Anschluss an eine Einleitung, als Idee dargestellt. Diese Lösungs-Suche erfolgt durch die Umkehrung der Suchrichtung kombiniert mit einem orthogonalen Suchschema. Durch die Umkehr der Suchrichtung, d.h. Wahl eines speziellen Startpunktes für die Suche, lässt sich der Iterationsaufwand bei der Optimierung durch die Simulation drastisch senken.

4. Sensitivitäts- / Stabilitätsuntersuchung

Untersuchung der Sensitivität und Stabilität des System-Verhaltens bei definierten Zuständen. Eine Sensitivitätsanalyse erfolgt durch kleine Variationen der wichtigsten Parameter im Umfeld eines Arbeitspunktes oder der gefundenen Ergebniswerte (z.B. Optimums). Dabei dürfen keine überproportionalen Ergebniswertschwankungen auftreten.

Es gilt anzumerken: Die Ergebnisse einer Simulation sind unabhängig von der gewählten Strategie ausnahmslos durch Sensitivitätsanalysen abzusichern. Dabei muss u.a. sicher gestellt werden, dass die Ergebnisse robust und nicht durch zufällige numerische Effekte oder sonstige Fehler beeinflusst sind.¹¹⁵

In Fragestellungen bezüglich Stabilität kann in speziellen Fällen auch die Parameter-Optimierung mittels 2^n+1 -Versuchsplänen verwendet werden. Vgl. Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode". Auf die Thematik Sensitivität und Stabilität wird in dieser Arbeit, abgesehen von einigen Hinweisen, nicht weiter eingegangen.

Weitere allgemeine Anmerkungen und Hinweise zu Versuchs- und Optimierungs-Strategien siehe Kapitel Nr. 6. bis Nr. 8 sowie ACÉL 95.

¹¹⁵ Vgl. Kapitel Nr. 3.2 "Qualitätssicherung", Abschnitt Nr. 3.1.1 "Vorgehensfehler" und Abschnitt Nr. 3.3.3 "Vorgehensschema nach SHANNON".

6. PARAMETER-REDUKTION

In diesem Kapitel wird die Parameter- bzw. Variablen- (Grössen-) Erfassung sowie ihre Reduktion und Auswahl beschrieben. Eine Reduktion der Parameter ist eine generelle Strategie zur Effizienzsteigerung der Simulation und somit Bestandteil jeder Simulations-Anwendung.

Die Simulations-Modelle enthalten Systeme mit Elementen, Eigenschaften und Beziehungen. Jedes Element bzw. jede Eigenschaft und Beziehung bedarf zur Beschreibung einer gewissen Anzahl von verschiedenen Parametern bzw. unabhängiger Variablen. Die Anzahl der in einer Simulation zu berücksichtigenden Grössen kann ohne starke und gezielte Einschränkung ausserordentlich schnell sehr gross werden. Für die Modell-Konzeption ergeben sich aus Erfahrung folgende Grössenordnungen ¹¹⁶:

- sehr kleines Modell bis 30 Grössen
- kleines Modell bis 50 Grössen
- mittleres Modell bis 100 Grössen
- grosses Modell bis 400 Grössen
- sehr grosses Modell ab 400 Grössen

Für die Simulation ergibt sich zwangsläufig, wie bei fast jeder anderen Planungsaufgabe auch, die Notwendigkeit, die Anzahl der primär betrachteten Grössen zu reduzieren. Es gilt, die Datenmenge optimal zu bewirtschaften (Nutzen/Aufwand-Verhältnis). Der Weg dazu führt über eine Reduktion, verbunden mit einer Klassifizierung bzw. Gruppierung der betrachteten Grössen. Eine durchgeführte Parameter-Reduktion verhilft zu mehr Effizienz bei der Zielberücksichtigung im Rahmen der Modell-Abstraktion. Bei der Parameter-Reduktion geht es darum, aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Grössen die Relevanten zu selektieren. Die Parameter-Reduktion wird häufig als Parameter-Definition oder Parameter-Identifikation bezeichnet ¹¹⁷.

Dieses Kapitel ist aufgeteilt in einen Teil mit Grundlagen und einen zweiten Teil mit einer spezifischen Auswahl an Reduktionsverfahren. Dem schliesst sich im dritten Teil ein Vorgehenskonzept zur konkreten Parameter-Reduzierung an. Relevante Parameter lassen sich dabei durch zwei Kriterien erkennen:

1. Einfluss auf das Ziel, vom Modell nach aussen (vgl. Abschnitt Nr. 6.2.2 "Konzept Prioritätsmatrix")
2. Innerer Modell-Zusammenhang (vgl. Abschnitt Nr. 6.2.3 "Beeinflussungsmatrix")

¹¹⁶ Es ist zu beachten, dass ein erfahrener, geübter Simulationsanwender bei zielgerichtetem Vorgehen von vornherein auf eine kleinere Anzahl von "relevanten" Einflussgrössen kommt.

¹¹⁷ Der Grund dafür liegt darin, dass die Parameter-Reduktion die Auswahl (Identifikation), die Festlegung (Definition) der relevanten Parameter beinhaltet. Dies wiederum umfasst eine vorgängige Reduktion bzw. Selektion der Parameter.

Diese zwei Verfahren aus der Literatur werden als drittes durch ein an die Simulation angepasstes eigenes Konzept ergänzt¹¹⁸. Im letzten Teil wird an einem konkreten Beispiel die praktische Anwendung gezeigt.

6.1 GRUNDLAGEN

In den Grundlagen werden notwendige Begriffe und Definitionen und die Parametrisierung erläutert.

6.1.1 Allgemeine Begriffe aus der Literatur

In diesem Abschnitt werden als Einstieg in die Problematik einige allgemeine Begriffe erläutert. Es ist zu beachten, dass sich die Begriffe und deren Inhalte im Zusammenhang mit der Parameter-Reduktion, der statistischen Versuchsplanung und der Parameter-Optimierung sowie der jeweiligen Verwendung (z.B. Mathematik, Landwirtschaft) sehr stark unterscheiden.

Allen in diesem Abschnitt erläuterten Begriffen liegt immer der Blickwinkel der Modellierung und Durchführung von Simulation zugrunde.¹¹⁹

Parameter

Parameter sind unabhängig voneinander und haben in einem Simulations-Modell die Aufgabe, die Merkmale bzw. Elementestruktur des Vorbildes (System) nachzubilden. Deshalb werden sie auch als Design-Größen bezeichnet. Sie sind innerhalb eines Simulations-Laufes - am Anfang gesetzt - konstant, können aber im Rahmen einer Versuchsreihe zwischen den einzelnen Läufen "nur" durch den Benutzer des Modells verändert werden. Sie sind immer Input-Größen (d.h. exogen¹²⁰), die ausserhalb des Modells festzulegen sind. Ein Parameter kann z.B. die Anzahl von Maschinen sein.

Variable

Der Begriff "Variable" lässt sich auf zwei Arten festlegen, einerseits allgemein und andererseits auch in Abhängigkeit ihrer Ausprägung.¹²¹

¹¹⁸ Die Auswahl der Parameter kann methodisch gesehen in zwei Ebenen getrennt betrachtet werden (Konzept- und Simulations-Ebene), vgl. Abschnitt Nr. 2.2.1 "Betrachtungsebenen der Simulation".

¹¹⁹ Vgl. zu den Definitionen auch SHANNON 75, S. 14 f. und S. 151.

¹²⁰ Vgl. auch Definition exogene Variable, weiter unten im Text.

¹²¹ Vgl. auch BEHRENDT 74, S. 164 f. sowie auch die Klassifizierung nach GRUBER 68, S. 45 - 59, speziell Tabelle "Fünf Klassifizierungen der Variablen eines ökonomischen Modells" (S. 55).

Allgemeiner Begriff:

Eine Variable ist eine Veränderliche, die unterschiedliche Werte eines bestimmten Bereichs der Zahlenskala annehmen kann. Sie ist eine Grösse oder Quantität, die variiert. Eine kontinuierliche Variable kann alle Werte in einem bestimmten Bereich annehmen, eine diskrete dagegen nur bestimmte Werte (z.B. nur ganzzahlige). Tritt jeder mögliche Wert mit einer bestimmten Häufigkeit oder Wahrscheinlichkeit auf, so spricht man von einer Zufalls- oder stochastischen Variablen, z.B. Störeinflüsse ¹²².

Variablen sind in einem Simulations-Modell die ablaufbestimmenden Grössen. Die Laufbedingungen/-zustände charakterisieren bzw. kennzeichnen sie durch einen aktuellen Modell-Status, z.B. Puffer belegt: "ja" bzw. "nein" (nicht vorhanden) oder freie Anzahl Pufferplätze.

Definition der Variablen nach Ausprägung (Auswahl):

- Unabhängige Variable Die unabhängigen Variablen werden durch den Benutzer des Modells frei gewählt und so extern von dem Modell vorgegeben. Sie werden verändert, um das Modell unter verschiedenen Bedingungen zu testen, z.B. Anzahl Pufferplätze. Oft werden sie auch als Aktions-Parameter bezeichnet. Bei der Simulation werden sie wie Parameter behandelt.
- Abhängige Variable Ihre Werte verändern sich während eines Simulationslaufes als Folge der Aenderung anderer abhängiger Variablen oder kontrollierbarer Variablen innerhalb des Modells oder in Folge von Parameter-Werten.
- Kontrollierbare Variable Durch den Benutzer können Werte vorgegeben werden. Im Gegensatz zu den unabhängigen können sie auch endogene (dann abhängige) Variable sein, z.B. Startwerte wie Puffervorbelegungen.
- Unkontrollierbare Variable Sie ist eine Untergruppe der abhängigen Variablen. Ihre Werte sind abhängig vom Zustand der Systemumgebung und/oder von den Funktionen und Beziehungen der Subsysteme. Der Benutzer hat nach der Modell-Konzeption keine Einwirkungsmöglichkeiten.
- Exogene Variable Z.T. als vorbestimmte oder präterminierte Variable bezeichnet. Sie ist eine modellextern bestimmte Variable. Nur der Benutzer oder der Zustand der Systemumgebung beeinflusst ihre Werte. (Siehe auch unabhängige Variable.)

¹²² Störeinflüsse wirken auf das Modell/System bzw. die einzelnen Elemente. Eine beaufschlagte Störung ist z.B. ein Maschinenausfall. Eine modellinterne, i.d.R. unbeabsichtigte Störung ergibt sich durch allgemeine Unstetigkeiten bei der diskreten Simulation und durch gemischt ganzzahlige Zusammenhänge.

- Endogene Variable Auch Zustands- oder Status-Variable genannt. Sie charakterisiert den Modell-Zustand zu jedem beliebigen Zeitpunkt und wird in Abhängigkeit der Zeit durch die Funktionen und Beziehungen und/oder den Benutzer (wenn sie gleichzeitig abhängige Variable ist) bestimmt. (Siehe auch abhängige Variable.)
- Quantitative Variable Variablen, die sich durch ihren Wert bzw. ihre Grösse charakterisieren.
- Qualitative Variable Variable mit nur zwei möglichen Werten. Für erfüllt oder zutreffend den Wert "1"; für falsch oder nicht zutreffend den Wert "0".
- Input-Variable Das Modell und sein Zustand haben keinerlei Einfluss auf diese Variablen. Es gibt drei Kategorien von Eingabe-Variablen: 1. Parameter, die Systemcharakteristiken beschreiben, z.B. Anzahl Maschinen. 2. Unabhängige Variable, die Prozessdaten repräsentieren, z.B. einen Operationsplan. 3. Start-Variable.
Siehe auch kontrollierbare Variable.
- Output-Variable Output-Variable sind Abhängige, die das Modell verlassen. Nur das Modell und sein Zustand haben Einfluss auf diese Variablen.
- Beobachtbare Variable Variable, deren Werte gewonnen werden können.
- Verdeckte Variable Sind nicht beobachtbare Variable, die nur computerintern bestehen, z.B. Hilfs-Variable.

Funktionen

Funktionen werden bei der Simulation durch die Verknüpfung der Parameter und Variablen im Modell festgelegt. Die Verknüpfungsarten sind eine wichtige Grundlage zur Parameter-Reduktion, z.B. durch Zusammenfassung. Die Funktionen können sowohl deterministischer wie auch stochastischer Art sein.

Verknüpfungsarten von Variablen sind:

<i>Verknüpfungsart</i>	<i>Beispiele</i>
- zeitabhängig (Zeitverzögerung)	Bearbeitungszeiten an Maschine
- zeitpunktabhängig	Schichtsteuerung (ein/aus)
- zeitunabhängig	
- lineare Verknüpfung	$y = a \cdot x + b$
- potenzierte Verknüpfung	$y = x^a$
- exponentiale Verknüpfung	$y = a^x$
- über Grenz- und Schwellenwerte	Ueberlaufregel eines Puffers
und Kombinationen davon	

Attribute, Schranken, Konditionsglitter

Attribute sind Variable, die Elemente oder Vorgänge und Beziehungen charakterisieren.

Schranken sind durch die Variablen präsentierte Grenz- oder Schwellenwerte. Sie sind einerseits wertmässige Begrenzungen, z.B. verfügbare Arbeitsstunden pro Tag oder maximale Anzahl Vorrichtungen im System. Andererseits bilden Schranken einen Vergleichswert, bei dem sich ein Verhalten (Ausprägung einer Charakteristik) im Modell ändert.

Konstante und Schranken werden auch als Invarianten bezeichnet. Die Summe der Invarianten wird häufig als Konditionsgitter ¹²³ (-rahmen) bezeichnet.

6.1.2 Spezielle Definitionen

Die in diesem Abschnitt zusammengefassten speziellen Definitionen, als Vereinfachung der im vorherigen Abschnitt behandelten allgemeinen Begriffe, bilden eine wesentliche Grundlage für die zwei folgenden Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode" und Nr. 8. "Heuristische Optimierung der Lösungs-Suche".

Durch die Einführung des Begriffs "Grösse" entsteht eine starke Vereinfachung bei den Begriffen, ohne für die Simulation eine funktionale Einbusse zu erhalten.

Grösse

Sammelbegriff für Parameter und/oder Variablen (keine Präferenz)

Nach der Vereinfachung lassen sich Grössen noch in vier Typen (1. - 4.) und in zwei Ausprägungen (a, b) unterscheiden.

1. Stell-Grösse (SG)

Eine Stell-Grösse ist ein Parameter oder eine Variable, die für jeden einzelnen Versuch festzulegen ist, z.B. die Anzahl von parallelen Arbeitsplätzen oder die Losgrössen.

2. Fixe-Grösse (FG)

Eine Fixe-Grösse ist eine Stell-Grösse, die in der jeweiligen Versuchsreihe konstant gehalten wird, die allerdings bei Bedarf jederzeit variiert und in die Versuche einbezogen werden könnte, z.B. Operationsfolge.

¹²³ Vgl. VESTER 76, S. 34.

3. Ziel-Grösse (ZG)

Die Ziel-Grösse ist eine relevante Grösse zur Bewertung der Gesamtkombination bzw. Lösung. Die Ziel-Grösse findet Eingang in der Zielfunktion ¹²⁴. Dabei stellt sich das Problem, die Ziel-Grössen zu den verschiedenen Entscheidungs-Parametern in Beziehung zu setzen. Zielkonflikte sind durch eine Gewichtung zu beheben. Ziel-Grössen sind von den Stell-Grössen abhängige Werte. Mögliche Ziel-Grössen sind z.B. die Durchlaufzeit oder die Bestände. Ziel-Grössen sind Output- bzw. Antwort-Grössen.

4. Kontroll-Grösse (KG)

Die Kontroll-Grösse ist abhängig von den Stell-Grössen. Sie wird während der Simulations-Läufe überwacht. Sie beinhaltet Informationen, wie z.B. Puffer belegt oder Puffer frei (Status-Variable). Weiter sind Kontroll-Grössen Ergebnisse, die überwacht bzw. erfasst werden, aber keinen (direkten) Eingang in die Zielfunktion finden. Als Kontroll-Grössen werden demnach sekundäre Ziele und nicht quantifizierbare Grössen erfasst.

a) Unabhängige Grösse

Eine unabhängige Grösse ist eine ausserhalb des Modells festgelegte und kontrollierte Grösse. Sie ist von allen anderen Grössen innerhalb des Modells unbeeinflusst. Sie ist während eines Simulations-Laufes fix. Unabhängige Grössen sind z.B. Anzahl Förderzeuge, Anzahl Mitarbeiter. Startwerte sind nicht zwingend unabhängige Grössen.

b) Abhängige Grösse

Eine abhängige Grösse wird dadurch gekennzeichnet, dass ihr Wert oder Zustand sich infolge anderer Grössen während eines Simulations-Laufes im Modell oder als Folge daraus ergibt. Ist ihr Zustand oder Wert ausserhalb des Modells sichtbar und von Interesse, so handelt es sich um eine Ziel- oder eine Kontroll-Grösse. Ist der Zustand oder Wert nur innerhalb des Modells vorhanden, so spricht man von einer verdeckten Grösse.

Vergleich von allgemeiner und spezifischer Definition:

Beispiel ¹²⁵: $y = a * x$

- "y" ist: Ziel-Grösse, Variable (abhängige Grösse)
- "a" ist: Fixe-Grösse, Parameter (unabhängige Grösse)
- "x" ist: Stell-Grösse, Variable (unabhängige Grösse)
- "*" ist: Beziehungsart (Funktion).

¹²⁴ Anmerkung: Die Zielfunktion kann auch nur aus einer Ziel-Grösse bestehen.

¹²⁵ Vgl. dazu auch Shannon 75, S. 15.

6.1.3 Parametrisierung

Unter Parametrisierung wird der Prozess der Identifikation der Bestimmungs-Größen (Stell-, Fixe-, Ziel-, Kontroll-Größen) verstanden, d.h. die Umsetzung von Elementen, Beziehungen, Restriktionen und Zielen in Parameter, die dann durch Computer verarbeitbar sind.

Als Vorarbeit zur Parametrisierung muss die Modell-Konzeption abgeschlossen sein und das formale Modell vorliegen. Die computergerechte Beschreibung der Modells erfordert eine Vielzahl von Stell- und Fix-Größen, die einerseits durch das formale Modell vorgegeben sind sowie sich andererseits auch aus simulationstechnischen und SW-Erfordernissen heraus ergeben. Je nach SW-Herkunft und -Schwerpunkt ist die Sprach- bzw. Abbildungslogik unterschiedlich. Diese Kenntnis wird bei einer effizienten Anwendung für die jeweilige Simulations-SW vorausgesetzt.

Die Parametrisierung soll im folgenden beispielhaft gezeigt werden. Die Art der Parametrisierung ist erstens davon abhängig, ob es sich um Elemente, Beziehungen oder Restriktionen handelt; zweitens auch von der jeweiligen Verwendung oder Funktion.

Elemente z.B. gliedern sich in drei Untergruppen:

- | | |
|---------------------------|--|
| - stationäre Elemente | Maschinen, Puffer, Lager etc. |
| - bewegte Elemente | Fertigungsgut als Prozessobjekt, Transportmittel etc. |
| - Schnittstellen-Elemente | Diese Elemente erlauben die Verbindung zwischen dem betrachteten System und der Umwelt (Umsystem), z.B. das Rohmateriallager als Quelle oder der Kunde als Senke |

An folgenden drei gebräuchlichen Elementen wird die Parametrisierung nun konkret aufgezeigt (basiert auf MAP1/TESS ¹²⁶):

- Teil (bewegtes Element: Rohmaterial, Halbzeuge, Fertigprodukte)
- Stationen (stationäres Element: Maschinen)
- Transportmittel (bewegtes Element: Einzelfahrzeuge)

Teil

- Bezeichnung (alphanumerisch)
- Priorität
- Ankunftsintervall
- erste Ankunft im System

¹²⁶ Die exemplarisch gezeigten Beispiele demonstrieren nur einen kleinen Teil der allgemeinen Möglichkeiten. Diesen Beispielen liegt die Simulations-SW MAP1/TESS zugrunde. Die hier gezeigten Elemente mit ihrer Parametrisierung werden im Anhang Abschnitt Nr. 1. als Auszug des MAP1-Handbuches von MINER und ROLSTON 86 detailliert beschrieben (Teil = PART, Station = STATION, Transportmittel = TRANSPORTER).

- Losgrösse
- Soll-Durchlaufzeit ¹²⁷

Station

- Bezeichnung
- Stationsgrösse (Anzahl gleicher Bearbeitungseinheiten)
- Vorpuffergrösse ¹²⁸
- Nachpuffergrösse
- Transportmittel Typ
- Transportmittel-Bezeichnung
- Transport-Losgrösse (Anzahl Teile)
- Ueberlaufregel des Eingangspuffers (blockieren, ausschleusen)
- Schichtnummer ¹²⁹
- Schichtende-Regel ¹³⁰
- Bearbeitungstyp (normal, aufspannen, trennen, fügen ¹³¹)

Transportmittel

- Bezeichnung (der Kategorie)
- Anzahl
- Transportzeit (oder Index für Entfernungstabelle)
- Anfahrtszeit (oder Index für Entfernungstabelle)
- Schichtnummer
- Geschwindigkeit

6.2 VERFAHREN ZUR PARAMETER-REDUKTION

In diesem Kapitel werden nach einer Aufzählung und einer kurzen Charakterisierung allgemeiner Ideen drei ausgewählte Verfahren bzw. Verfahrenskonzepte erläutert. Die Auswahl erfolgte auf Grund der weiteren Verwendung der Verfahren im Kapitel Nr. 6.3 "Vorgehenskonzept Parameter-Reduktion".

¹²⁷ Optionale Stell-Grössen, die als implizite Priorität fungiert, d.h. Steuerung der Teile nach einer spezifischen Soll-Durchlaufzeit.

¹²⁸ Jede Station beinhaltet standardmässig jeweils einen Vor- und einen Nachpuffer.

¹²⁹ Nummer (Bezeichnung) der für die Station gültigen Arbeitsschicht.

¹³⁰ Die Möglichkeiten sind: Bei Schichtende Arbeit unterbrechen; Arbeit über Schichtende hinaus beenden; eine Arbeit, die bis Schichtende nicht fertig wird, erst gar nicht anfangen.

¹³¹ Beim Bearbeitungstyp "Trennen" wird angegeben, in wie viele Teile mit jeweils welcher Bezeichnung zerlegt werden soll. Beim "Fügen" verhält es sich umgekehrt.

6.2.1 Allgemeine Ansätze zur Reduktion

Parameter-Reduktionsverfahren werden auch als Homing In -Techniken ¹³² bezeichnet. In diesem Abschnitt sind einige allgemeine Ideen zur Senkung der Anzahl von Grössen aufgelistet:

- **Beschränkung** Die Grössen werden strikt auf das gemäss Fragestellung Notwendige beschränkt. Die Art der Beschränkung ist subjektiv und der Erfolg ist sehr erfahrungsabhängig.
- **Vereinfachung** Keine untergeordneten Elemente und unnötigen Eigenschaften sowie sekundäre Beziehungen in das Modell einbringen, d.h. Vereinfachung statt Detaillierung.
- **Neue Sammel-Grösse** Dabei werden mehrere zusammenhängende Grössen zu einer neuen Grösse, oder evtl. als Gruppe, zusammengefasst.
- **Repräsentative Grösse** Dabei werden Grössen für ähnliche Aspekte durch die wichtigsten (grösster Beitrag zur Erklärung) repräsentiert, z.B. Stundenaufwand, Stundensatz, Kosten nur durch Stundenaufwand.
- **Priorisierung** Es wird eine Prioritätsliste der Grössen erstellt und davon gemäss einer ABC-Verteilung nur die wichtigsten, z.B. 20%, berücksichtigt. Hilfsmittel dabei sind u.a. die Beeinflussungsmatrix und die Wertanalyse ¹³³.
- **Transformation** Zerlegen und anschliessend neues Zusammenfassen von Zusammenhängen, indem z.B. "y" durch "a * x" ersetzt wird. Dabei genügen häufig einige wenige bekannte empirische Zusammenhänge.
- **Analogieansatz** Oftmals ist nur das Input/Output-Verhalten gefragt. Dann kann der innere Modellaufbau durch Analogien vereinfacht werden.
- **Approximation** Dabei werden Einflüsse höherer Ordnung (sekundäre etc.) vernachlässigt oder linearisiert, z.B. bei Störungen.

Diese allgemeinen Ideen zur Reduktion der Grössen im Rahmen von Simulation werden i.d.R. intuitiv und in verschiedenen Kombinationen angewendet. Eine systematische

¹³² Vgl. KROTTMAIER 91, S. 7 f.

¹³³ Hier werden die Einflussgrössen wertanalytisch bewertet und rangiert. Vgl. auch HUBER 92, S. 99 ff., Abschnitt: "Produktgestaltung durch Wertanalyse".

Reduktion der Grössen ist besonders bei grösseren Simulations-Modellen zu wünschen ¹³⁴.

6.2.2 Konzept Prioritätsmatrix

Mit Hilfe einer Prioritätsmatrix soll eine nachvollziehbare Priorisierung der Stell-Grössen in bezug auf das Hauptziel bzw. die Ziele oder die Zielfunktion erfolgen. Die Priorisierung geschieht durch ein paarweises Rangieren (Aufreihen, Einordnen). Je nach Umfang können evtl. auch Fixe-, Ziel- und Kontroll-Grössen einbezogen werden. Die Prioritätsmatrix ist eine Unterstützung zur Beschränkung der Anzahl der Grössen unter Verminderung der intuitiven Subjektivität. Dieses Konzept basiert auf der Methode des paarweisen Vergleichs mit konstanter Gewichtssumme ¹³⁵.

Folgende zwei Kombinationen einer paarweisen Rangierung sind bei einer Gewichtssumme von zwei zulässig:

1. Möglichkeit 2 für das wichtigere/dominante Kriterium
 0 für das untergeordnete Kriterium
2. Möglichkeit 1,1 bei gleichwertigen Kriterien

Es werden immer beide Paare mit Rangpunkten versehen. Sind nur wenige Grössen zu rangieren, so ist wegen der relativen Fehler eine erhöhte Gewichtssumme von zwei auf vier zu empfehlen. Diese erlaubt eine feinere Abstufung in fünf (0/4, 1/3, 2/2, 3/1, 4/0) statt in drei Stufen (0/2, 2/2, 2/0).

Eine Rangierung der Grössen mit sich selbst entfällt. Die Gesamtsumme aus den x_i und den y_j zeigt die relative Wichtigkeit der Grösse an. Eine hohe Summe deutet dabei die grosse Priorität an. Wie viele Grössen konkret zu vernachlässigen sind, muss von Fall zu Fall festgelegt werden. Nach der 20 : 80 -Regel gelten dann z.B. die 20 % der Grössen mit den höchsten Werten als selektiert. Dieses Verfahren lässt sich einfach auf einen Computer umsetzen. Dies ist besonders bei einer "grossen Vielzahl" von Grössen notwendig und sinnvoll.

Mit der Prioritätsmatrix können keine Aussagen über die Abhängigkeit bzw. Unabhängigkeit gemacht werden, nur über die *relative Wichtigkeit in bezug auf die Ziele*. Mit diesem Vorgehen lassen sich auch keine komplexen ¹³⁶ und mehrstufigen Wirkzusammenhänge aufdecken.

¹³⁴ Eine deduktive Reduzierung wird häufig als eine Einschränkung empfunden und dabei wird nur der momentane Mehraufwand gesehen.

¹³⁵ Vgl. HABERFELLNER et al 92, S. 474 f. Hier wird eine Gewichtssumme von jeweils vier vorgeschlagen, was eine feinere Abstufung erlaubt. Durch die grosse Anzahl an Grössen genügt in dieser Anwendung eine Gewichtssumme von zwei.

¹³⁶ Siehe Kapitel Nr. 7.2 "Versuchsplanungs-Methode, Definitionen und allgemeine Erklärungen" unter komplexe Wirkzusammenhänge.

Zur Erläuterung des Verfahrens ist in der folgenden Tabelle die nachstehende Annahme als Beispiel zugrundegelegt: $V1 < V2 < V3 = V4 < V5$. "Vx" steht für eine beliebige Grösse. Der Vergleich über die "Wichtigkeit" erfolgt paarweise.

V1	y_j	V5	y_j	V2	y_j	V3	y_j	x_i / y_j	Σy_j	Σx_i	$\Sigma x_i \cdot y_j$	Rang
0	2	2	0	0	2	1	1	V4	5	5	5	2 _{ex.}
		2	0	2	0	2	0	V1	0	0	0	5
				0	2	0	2	V5	4	4	8	1
						2	0	V2	0	2	2	4
								V3	5	5	5	2 _{ex.}
0	2	4	0	2	2	5	1	Σx_i				

Tabelle 9: Aufbau des Schemas für die Prioritätsmatrix

Bei widersprüchlichen Zielen sind die SG bezüglich der ZG getrennt zu bewerten (siehe Beispiel in Tabelle Nr. 13 mit zwei Zielen).

6.2.3 Beeinflussungsmatrix

Die Beeinflussungsmatrix wird je nach Literatur häufig als "Papiercomputer", Paarwertvergleich oder auch als Einflussgrössen-Wirkungsmatrix bezeichnet.

Die Parameter-Reduktion mit Hilfe einer Beeinflussungsmatrix ermöglicht eine nachvollziehbare Reduktion durch Kombination von Systematik mit Erfahrung. Sie ist eine universelle Planungsmethode zur Erhöhung des Verständnisses komplexer Systeme und besteht aus der Erstellung eines Sensitivitätsmodelles zur Analyse der Beziehungen zwischen den verschiedenen Systemkomponenten. Ein derartiger Ansatz erfasst die Intensität, mit der sich die am System beteiligten Grössen gegenseitig beeinflussen. Der aus dem Bereich der Biokybernetik von VESTER stammende sogenannte "Papiercomputer" setzt

jede Grösse eines Problems mit jeder anderen in Beziehung und bewertet mit Hilfe einer Skala mit "0" (keine), "1" (schwach), "2" (mittel) und "3" (stark) das Mass der jeweiligen Beeinflussung ¹³⁷. Es können nur (in einem Bereich) statische, einstufige Zusammenhänge ausgewertet werden. Die Grössen des Systems werden als Knoten V1 ... Vi eines Graphen interpretiert und die Stärke der Beeinflussung als die in ihm enthaltenen Pfeile E1 ... Em. Die Sachlage lässt sich dann anhand einer n * n-Matrix wie im folgenden Beispiel darstellen:

Vi / Vj	V1	V2	V3	V4	V5	AS	Q = AS : PS
V1	-	3	3	1	2	9	1,80
V2	0	-	3	1	0	4	0,44
V3	1	1	-	1	2	5	0,63
V4	2	3	1	-	3	9	2,25
V5	2	2	1	1	-	6	0,86
PS	5	9	8	4	7		
P = AS + PS	45	36	40	36	42		

Tabelle 10: Aufbau des Schemas für die Beeinflussungsmatrix

Definitionsgemäss beeinflusst sich eine Grösse nicht selbst, und daher bleiben die Diagonalen leer. Die Werte a_{ij} der Matrix entsprechen den Pfeilen und bedeuten die Beeinflussung von Vj durch Vi.

Die Zeilensummen heissen Aktivsummen (AS) und zeigen an, wie stark die betreffende Grösse alle anderen Grössen absolut beeinflusst. Die Spaltensummen heissen analog dazu Passivsummen (PS) und zeigen an, wie stark die betreffende Grösse von allen anderen Grössen absolut beeinflusst wird. Die Grösse mit dem höchsten Produkt "P" aus AS und PS wird "kritische Grösse" genannt, die mit dem kleinsten Produkt "träge Grösse". Die mit dem höchsten Quotienten "Q" aus AS und PS wird "aktive Grösse" genannt und die mit dem kleinsten Quotienten "passive Grösse". Konkret heisst das ¹³⁸:

- AS = max. beeinflusst alle anderen Grössen am absolut stärksten
- PS = max. ist am stärksten von allen anderen Grössen beeinflusst

¹³⁷ Vgl. GOMEZ, PROBST 87, S. 24 f. BÜCHEL 90 schlägt alternativ eine nicht äquidistante (progressive) Skala (0,1,3,9) vor, siehe Teil Situationsanalyse S. 17 f.

¹³⁸ Vgl. VESTER 76, S. 61 ff.

- | | |
|----------------------|--|
| - aktives Element | $AS / PS = \max.$
beeinflusst alle anderen am relativ stärksten
Wird von ihnen am relativ schwächsten beeinflusst. |
| - passives Element | $AS / PS = \min.$
beeinflusst alle anderen am relativ schwächsten
Wird von ihnen am relativ stärksten beeinflusst. |
| - kritisches Element | $AS * PS = \max.$
beeinflusst alle anderen am relativ stärksten
Wird von ihnen am relativ stärksten beeinflusst. |
| - ruhendes Element | $AS * PS = \min.$
beeinflusst alle anderen am relativ schwächsten
Wird von ihnen am relativ schwächsten beeinflusst. |

Die Simulation (Modellierung/Optimierung) sollte demnach bei der Grösse starten, die möglichst aktiv, aber gleichzeitig möglichst träge ist (im Beispiel V4), da sich in einem entsprechenden Fall eine starke Auswirkung bei gleichzeitiger Stabilisierung des Systems erzielen lässt. Kritische Grössen (im Beispiel V1) hingegen sind mit Vorsicht zu behandeln.

6.2.4 Konzept Abhängigkeitsmatrix

Die vorgeschlagene Abhängigkeitsmatrix basiert auf einer, für den Fall der Parameter-Reduktion, auf das Wesentliche reduzierte Beeinflussungsmatrix unter Beibehaltung der grundsätzlichen Idee. Sie ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur für eine Vorselektion anwendbar, da die Schätzung der Beeinflussungsstärke für das zu optimierende System statisch sowie grob und subjektiv ist¹³⁹. Die Unterschiede zwischen der Beeinflussungsmatrix (Paarwertvergleich) von VESTER und der hier vorgeschlagenen Abhängigkeitsmatrix sind durch die Verwendung gegeben. Die Beeinflussungsmatrix ist eine statische Betrachtung mit dem Ziel, ein möglichst robustes und sich im Gleichgewicht befindliches System zu erhalten. Die Abhängigkeitsmatrix ist eine Vorstufe zu einer dynamischen (zeitabhängigen) Simulation i.e.S. mit dem Ziel, die Vielfalt der Stell-Grössen und evtl. auch Ziel-, Kontroll- oder auch Fixe-Grössen zu reduzieren.

Unterschiede zur konventionellen Beeinflussungsmatrix sind:

- Stell-Grössen (evtl. Fixe-Grössen) werden bidirektional betrachtet, d.h. die Wirkrichtung ist untergeordnet. Dadurch entfallen in diesem Bereich die Hälfte der Betrachtungen. Üblicherweise wird konventionell zweimal je nur die Wirkung "von" "auf" betrachtet (unidirektional). Prinzipiell kann auf die Untersuchung von Fixen-Grössen verzichtet werden.

¹³⁹ Das gilt auch für die vorher beschriebene Beeinflussungsmatrix, trotz höherem Aufwand.

- Die Rekursivität ist zulässig, d.h. für Stell-Grössen (Fixe-Grössen) ist eine verstärkende oder dämpfende Rückwirkung auf sich selbst zugelassen. Begründung: Rückwirkungen auf sich selbst sind sehr entscheidend für mögliche Instabilitäten (aufschaukeln) oder zur Stabilisierung (dämpfen). Immer wieder hängen Simulations-Ziele direkt oder indirekt mit entsprechenden Fragestellungen zusammen. Weiter ist es falsch, in diesem Projektstadium diese Rückwirkungen zu negieren, die i.d.R. erst bei dynamischen Betrachtungen die volle Wirkung zeigen.
- Ziel- und Kontroll-Grösse sind im Modell nur passiv. Der Modell-Betreiber kann sie nicht direkt beeinflussen. Deshalb werden Ziel- und Kontroll-Grössen nur unidirektional untersucht, d.h. die Wirkung "von" Stell- und Fixen-Grössen "auf" Ziel- und Kontroll-Grössen. Der Einbezug der Ziel- und Kontroll-Grössen bestätigt die Auswahl oder hilft bei der Auswahl der einzelnen Grössen.
- Die Auswertung erfolgt ausschliesslich durch Addition der Zeilen und Spalten und Bildung der jeweiligen Gesamtsumme ¹⁴⁰. Die Höhe des Wertes ist ein Mass für die Verbindungsintensivität und so für die Wichtigkeit. Bei der Auswahl der Grössen haben die hohen Werte Vorrang. Es wird nicht zwischen Aktiv- und Passivsumme unterschieden. Die selektive Einzelbetrachtung erfolgt im Rahmen der Simulation dynamisch.
- Es wird eine Skala mit progressiven Abständen für die Intensität der Wirkung verwendet. Verschiedene Tests mit verschiedenen Skalen haben gezeigt, dass eine Skala mit den Werten 0, 1, 2, 5 am besten geeignet ist ¹⁴¹.

Für die bewährte Skala bedeuten die Werte:

- 0 unabhängig, absolut keine Abhängigkeit zu erkennen (indifferent)
- 1 im Zweifelsfall oder bei geringer gegenseitiger bzw. einseitiger Beeinflussung
- 2 mittlere gegenseitige/einseitige Beeinflussung
- 5 starke gegenseitige/einseitige Abhängigkeit/Beeinflussung, evtl. komplexe Wirkung (d.h. gegenläufig oder gegenseitige Unterstützung)

Gründe für eine 0,1,2,5-Stufung sind:

- Durch die progressiven Abstände wird die Bewertung im hohen Skalenbereich selektiver (es wird eine Klassierung angestrebt), während sie im unteren Bereich relativ robust auf Fehlbewertungen bleibt.

¹⁴⁰ Durch Spiegelung der Werte für Stell- und Fixe-Grössen entlang der Diagonalen erhält man durch Addition der Spalten oder Zeilen direkt die Gesamtsumme. Siehe Beispiel in Kapitel Nr. 6.4 "Beispiel für die Parameter-Reduktion".

¹⁴¹ Verglichen wurden folgende Skalierungen: 0,1,2,3 / 0,1,3,9 / 0,1,2,5 / 0,1,2 / 0,1. Die durchgeführten Experimente ergaben, dass die Skalierung 0,1,2,5 am besten geeignet ist.

Erfahrungsgemäss ist es schwer zu unterscheiden, ob ein Einfluss "schwach" oder nicht vorhanden ist bzw. ob ein Einfluss "schwach" oder "mittel" ist. Bei starken Einflüssen ist es einfacher diese zu erkennen. Eine stärkere Steigung am unteren Ende der Skala bewirkt ein Ergebnis, das vermehrt zufällig bzw. fehlerabhängig ist.

- Bei einer rein linearen Skala erhalten mittlere Werte einen zu hohen Einfluss, was zu einer Nivellierung der Ergebnisse auf das Mittelfeld führt. Dies widerspricht dem Selektionswunsch, d.h. bei der Klassierung ist es das Ziel, Unterschiede explizit herauszuarbeiten. Um das zu erreichen, wird statt einer linearen Skala eine Skala mit progressiven Abständen verwendet.

Zur Erklärung: Zwei Bewertungen mit "0" (kein Einfluss, unabhängig) ergeben eine Gesamtbewertung von "0". Zwei Bewertungen mit "1" (schwacher Einfluss, Zweifelsfall) ergeben eine "2". Zweimal die "2" (mittlerer Einfluss) ergibt eine "4". Die "4" entspricht noch keinem starken Einfluss ("5").

Vergleich		bidirektional					unidirektional					Zeil-Sum		
		SG		FG			ZG		KG					
Nr.	Grösse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	SG Losgrössen													
2	SG Anz Masch													
3	SG Anz Personal													
4	SG Arbeits-h/a													
5	SG ...													
6	FG Rüst-Zeiten													
7	FG ...													
8	ZG DLZ													
9	ZG WiA													
10	ZG ...													
11	KG Ausl Masch													
12	KG ...													
Spalten-Summe														
Zeilen-Summe														
Gesamt-Summe														
Rangierung														

Tabelle 11: Aufbau der Abhängigkeitsmatrix

Bei der Abhängigkeitsmatrix werden nur die freien Felder (ohne Strich) ausgefüllt. Für die konkrete Verwendung sei auf das Beispiel in Abschnitt Nr. 6.4.3 "Beispiel: 3. Stufe" verwiesen.

6.3 VORGEHENS KONZEPT PARAMETER-REDUKTION

Die Parameter-Reduktion hat die Aufgabe, für die Simulation die Anzahl der Stell-Grössen (zu variierende Grössen) auf eine überschaubare Menge zu reduzieren. Für die Simulation hat sich eine Anzahl zwischen drei und maximal zwölf, je nach Modell und Fragestellung, bewährt ¹⁴². In diesem Kapitel geht es um eine Reduktion im Vorfeld einer Simulations-Anwendung i.e.S. im Gegensatz zu einer Parameter-Reduktion mit Hilfe der Simulation durch sogenannte Siebexperimente (Screening Experiments).

Siebexperimente im Rahmen der computerunterstützten Simulation werden durchgeführt, um die Anzahl der zu berücksichtigenden Grössen unter Einbezug der dynamischen Effekte zu reduzieren. Sie sind eine mögliche Fragestellung an die Simulation, z.B. um selektiv relevante Steuerparameter für einen Leitstand zu ermitteln. Auch bei der effizienten Durchführung von Siebexperimenten muss das Feld der zu variierenden Parameter im Vorfeld eingeschränkt werden. Siebexperimente werden hier nicht weiter behandelt.

In der vorgeschlagenen Vorgehensmethode (gemäss Kapitel Nr. 4. "Konzeption einer Vorgehensmethode") sind die ersten Ueberlegungen zur Parameter-Reduktion der Zielformulierung zuzuordnen. Die konkrete Durchführung erfolgt parallel zum Iterationszyklus zwischen Versuchsplanung und Modell-Konzeption. ¹⁴³

Das Konzept zur Grössen-Erfassung, -Reduktion und -Auswahl findet in folgenden Stufen statt:

Vorstufe	Die in Frage kommenden Grössen sind als erstes zu erfassen und dann laufend zu ergänzen. Ein Brainstorming und Befragungen haben sich dafür gut bewährt.
1. Stufe	Grobe Vorsortierung der Parameter (manuell) Sind die möglichen Grössen erfasst, sind sie nach der Funktion im Modell und/oder nach der Dimension (z.B. h, Fr., Stück) zu gruppieren bzw. zu klassieren. Weitere flankierende Massnahmen zur Vorselektion siehe Abschnitt Nr. 6.2.1 "Allgemeine Ideen zur Reduktion". Bei grossen Projekten erfolgt, wegen des notwendigen Fachwissens und der Gefahr bezüglich intuitiver Subjektivität, die Vorselektion mit Vorteil in einem qualifizierten Team.

¹⁴² Bei zwölf Stell-Grössen mit je zwei Werten sind theoretisch 2^{12} verschiedene Versuche durchzuführen und auszuwerten, d.h. 4096 Versuche. Vgl. Abschnitt Nr. 7.5.4 "Versuchsplanungs-Methode, Voll- und teilfaktorielle Versuchsplanung".

¹⁴³ Vgl. auch Abschnitt Nr. 2.2.1 "Betrachtungsebenen der Simulation".

Die vier primären Selektions- und Reduktionskriterien sind:

- "theoretischer" Einfluss der Grössen auf die Zielsetzung
- praktische Handhabung und Variationsgrenzen der betrachteten Grössen
- Doppelspurigkeiten beseitigen und dabei Grössen zusammenfassen
- vorhandene Erfahrungen mit den jeweiligen Grössen

2. Stufe	Rangieren der Einflussgrössen mit der Prioritätsmatrix Die Beschreibung der Prioritätsmatrix erfolgte im Abschnitt Nr. 6.2.2.
3. Stufe	Gewichten der Grössen mit der Abhängigkeitsmatrix Die Beschreibung der Abhängigkeitsmatrix erfolgte im Abschnitt Nr. 6.2.4.
Endstufe	Zusammenfassung der verbleibenden Grössen Für die einzelnen Grössen ist es hilfreich, frühzeitig im Hinblick auf die Versuchsplanung, je ein Intervall für die zulässigen Werte (Bereiche) festzulegen.

Bei der Reduktion der Grössen ist es nicht in jeder Reduktionsstufe erforderlich, zwischen Stell- und Fixen-Grössen, wie auch zwischen Ziel- und Kontroll-Grössen zu unterscheiden. Diese Gleichbehandlung resultiert aus der Erfahrung, dass in einem frühen Projektstadium noch Verschiebungen möglich sind. Ein zu schnelles Einschränken könnte Lösungen ausschliessen, die sich vielleicht noch später durch die fortgesetzte intensive Beschäftigung ergeben. Eine Einschränkung kann, in einzelnen Fällen, wegen der "grossen" Zahl von Grössen trotzdem notwendig sein.

Die erzielbare Reduktion hängt in starkem Masse von der Eingrenzung der Problemstellung, der Erfahrung des Anwenders und der geforderten Detaillierung ab. Folgende Reduktionen lassen sich erreichen:

- 1. Stufe: 4 : 1 bis 10 : 1
- 2. Stufe: 2 : 1 bis 5 : 1
- 3. Stufe: 2 : 1 bis 5 : 1

Das Ziel ist es, nach der dritten Stufe noch drei bis höchstens zwölf Stell-Grössen als Ausgang für die Versuchsplanung zu erhalten und den Stellenwert der einzelnen Fixen-Grössen für die Modell-Konzeption zu kennen. Ausgeschiedene Grössen werden entweder

komplett vernachlässigt (d.h. sie sind im Modell nicht abgebildet) oder für die weitere Verwendung gezielt auf einem Wert fixiert (d.h. sie werden zu Fixen-Grössen).

Bei den Stufen zwei und drei ist bei Verwendung des vorgeschlagenen Formulars automatisch eine nachvollziehbare Dokumentation gegeben. Dies ist auch bei einer Implementation auf Computer leicht zu erreichen. Bei der Stufe eins empfiehlt es sich über die vorgenommene Reduktion ein Kurzprotokoll anzufertigen. Durch diese Dokumentationen ist ein weiteres Qualitätskriterium auf dem Weg zur erfolgreichen Simulation erfüllt.

Die Reduktion der relevanten Grössen in drei Stufen hat sich bewährt. Sie gewährleistet ein hohes Mass an Nachvollziehbarkeit¹⁴⁴ und erhöht durch die intensive Beschäftigung das Verständnis für die Problemstellung. Bei sehr kleinen bis mittleren Modellen können gegebenenfalls einzelne Stufen (mit Vorzug die zweite Stufe) übersprungen werden.

6.4 BEISPIEL FÜR DIE PARAMETER-REDUKTION

In diesem Kapitel wird an einem Beispiel die Parameter-Reduktion konkret gezeigt, d.h. Klassierung, Reduktion und Auswahl der relevanten Grössen. Als Beispiel dient eine bestehende mechanische Fertigung aus der Industrie, die nach dem Werkstättenprinzip organisiert war. Das Projekt bestand darin, die bestehende Fabrikation neu nach Teilefamilien in kleinere Einheiten (Inseln) zu gliedern. Die Simulation wurde eingesetzt um bei zwei verschiedenen Inselkonfigurationen unterschiedliche Losgrössen-Strategien auf ihre Auswirkung hin zu untersuchen.

Die aus diesem Beispiel heraus hier exemplarisch verwendeten Grössen sind nicht selbst-erklärend (ganzes Kapitel Nr. 6.4). Das Verständnis dieser Grössen erfordert eine gute Hintergrundkenntnis des betreffenden Unternehmens und des entsprechenden Projektes. Die Darlegung dieser Hintergründe würde den Dissertationsrahmen sprengen, deshalb wurde darauf verzichtet.¹⁴⁵

6.4.1 Beispiel: 1. Stufe (Intuitive Reduktion)

In den Tabellen Nr. 12a bis d ist eine Auswahl der im Rahmen des Projektes gesammelten Grössen mit ihren Dimensionen dargestellt. In der rechten Tabellenhälfte sieht man die Grössen nach der ersten Reduktionsstufe. Alle anzahl- oder stückabhängigen Grössen beziehen sich auf den Zeitraum eines Jahres. Im Anschluss zu jeder Tabelle sind exemplarisch die in der 1. Stufe durchgeführten Reduktionen kurz beschrieben.

¹⁴⁴ Dabei ist die erste Stufe je nach Art der Durchführung evtl. ausgenommen. In der Praxis hat es sich gezeigt, dass als einzige nur die erste Stufe (intuitiv) durchgeführt wird, i.d.R. mit ungenügender Dokumentation.

¹⁴⁵ Zur Vertiefung vgl. SCHMIDHEINY et al 93, S. 90 ff.

Teil a: Stell-Grössen allgemein					
Nr.	Grössen (Ausgangslage)	Dim.	Nr.	Reduzierte Grössen (1. Stufe)	Typ
1	Produkte, Teile	Anz.	1	Produktgruppen	SG
2	Teile ED-Bedarf	Stk.	2	Jahresbedarf	SG
3	Teile Neubedarf	Stk.	-	Jahresbedarf	
4	Losgrössen	Stk.	3	Losgrössen	SG
5	Lose	Anz.	-	Losegrössen, Jahresbedarf	
6	Zwischenankunftszeiten	t	-	Lose, Jahresbedarf	
7	OP-Hauptzeiten	t	4	OP-Merkmale	FG
8	OP-Rüstzeiten	t	-	OP-Merkmale	
9	OP-Schritte	Anz.	-	OP-Merkmale	
...					
13	Personalqualifikation	-	5	Personal	FG
14	Personalzuordnungen	-	-	Personal	
15	Personalbedarf	Anz.	-	Personal, Jahresbedarf	
16	Schichten	Anz.	6	Schichten	SG
17	Schichtlängen	t	7	Schichtlängen	FG
18	Schichtversätze	t	8	Schichtversätze	FG
19	Inselgrösse	-	-	Jahresbedarf, OP-Merkmale	
20	Unterteilung der Insel	-	9	Inselgliederung	SG
...					

Tabelle 12a: Beispiel Grössen-Reduktion, 1. Stufe

Erklärungen zu Tabelle 12a (Verweise auf Zeilennummern)

- 1 Verschiedene Werkstücke (130 Einzelprodukte) werden zu 14 Produktgruppen mit technologisch ähnlichen Abläufen und gleicher Verwendung zusammengefasst.
- 2,3 Der Teilebedarf aus dem Ersatzteil-Dienst (ED) und dem Neugeschäft wird zu einem Jahresbedarf zusammengefasst.¹⁴⁶
- 4 Die Auftragslosgrössen sollen gemäss Aufgabenstellung variiert werden. Die dazu notwendigen Regeln werden bei der Versuchsplanung festgelegt.¹⁴⁷
- 5,6 Aus dem jeweiligen Jahresbedarf und der zulässigen maximalen Losgrösse ergibt sich die notwendige Anzahl Lose pro Jahr und ihre konstante, maximale Zwischenankunftszeit.
- 7-9 Bezüglich der Hauptzeiten, Rüstzeiten und der Operationsschritte sowie der Technologien und der notwendigen Aufspannungen ist im Rahmen der Simulation keine Aenderungsmöglichkeit zugelassen. Deshalb sind diese Grössen unter dem Begriff OP-Merkmale als eine Fixe-Grösse zusammengefasst.

¹⁴⁶ Vgl. auch Tabelle Nr. 8 "Versuchsmatrix" mit 2'000, 3'000 und 4'000 Stück (Stk.) pro Jahr.

¹⁴⁷ Vgl. Tabelle Nr. 8 "Versuchsmatrix".

- 13-15 Der minimale operative Personalbedarf ergibt sich aus den Operations-Plänen und dem Jahresbedarf der gefertigten Teile (vgl. 5, 6). Die Personalqualifikation, -zuordnung und der -bedarf werden in einer Grösse zusammengefasst.
- 16-18 Es ist je Arbeitsplatz ein Ein- oder ein Zweischichtbetrieb zugelassen (keine halben Schichten). Eine Schichtlänge wird auf acht Stunden fixiert. Der jeweilige Schichtbedarf wird auf das Minimum festgelegt und für jeden Simulations-Versuch festgehalten. Der Schichtversatz zwischen Ein- und Zweischichtbetrieb wird generell fixiert.
- 19 Die Inselgrösse (Jahresstunden) für das Simulations-Modell ist nur von der Stundenkapazität abhängig.
- 20 Unter der Inselgliederung werden verschiedene mögliche innere Strukturvarianten verstanden. ¹⁴⁸

Teil b: Stell-Grössen Logistik, Transport-, Hilfsmittel, Vorrichtungen					
Nr.	Grössen (Ausgangslage)	Dim.	Nr.	Reduzierte Grössen (1. Stufe)	Typ
22	Arbeitsprioritäten	-	10	ArbeitsPrio "FIFO"	FG
23	Fertigungslosgrössen	Stk.	11	Einzelfertigung	FG
24	Transportprioritäten	-	12	TransPrio "FIFO (Random)"	FG
25	Transportlosgrössen	Stk.	-	Losgrössen	
26	Pufferprioritäten	-	13	PufferPrio "Systemzeit (OP-Nr.)"	FG
27	Puffer Zuordnungen	-	-	Je Arbeitsplatz einer	
28	Puffergrössen	Stk.	14	Puffergrössen "unbegrenzt"	FG
29	Uebergänge, Beziehungen	Anz.	-	OP-Merkmale	
30	Uebergangszeiten intern	t	15	Uebergangszeiten intern	SG
31	Uebergangszeiten extern	t	16	Uebergangszeiten extern	SG
...					
35	Transporter	Anz.	17	Einheitstransporter	SG
36	Transporter Typen	-	-	Einheitstransporter	
37	Transportkapazitäten	Stk.	-	Losgrössen	
38	Vorrichtungen	Anz.	18	Einheitsvorrichtungen	SG
...					

Tabelle 12b: Beispiel Grössen-Reduktion, 1. Stufe

Erklärungen zu Tabelle 12b (Verweise auf Zeilennummern)

- 22 Die Arbeitsprioritäten für alle Teile sind an allen Maschinen gleich. Die Lose werden vor dem Uebergang zur nächsten Operation komplett bearbeitet.
- 23,25,37 Alle Teile werden losweise transportiert aber auf den Maschinen stückweise (seriell) bearbeitet.

¹⁴⁸ Es wurden zwei unterschiedliche Fälle untersucht. Vgl. Tabelle Nr. 8 "Versuchsmatrix".

- 24 Gleich wie Nr. 22. Stehen zufällig genau gleichzeitig eingetroffene Lose bereit, wird nach dem Zufallsprinzip (random) ausgewählt, welches Los als erstes befördert wird.
- 26 An den Pufferausgängen Richtung Arbeitsplätze/Maschinen werden Lose bevorzugt, die länger im System unterwegs sind. Bei Gleichheit von mehreren Losen wird nach dem FIFO-Prinzip (first in first out), bezogen auf den aktuellen Puffer, verfahren. Diese Regelkombination verhindert, dass sich ein (simuliertes) System durch zuviele Teile selbst blockiert.
- 27,28 Jeder Arbeitsplatz, jede Maschine hat einen Vorpuffer mit quasi unbegrenztem Fassungsvermögen.
- 29 Diese Grösse beschreibt die zulässigen Verbindungen zwischen Arbeitsplätzen, Maschinen und Prozessschritten.
- 30,31 Die Uebergangszeit beinhaltet die Transportzeit inkl. allen Nebenzeiten. Sie wird auf zwei Werte (interner, externer Transport) fixiert.
- 35,36 In der Simulation werden nur einheitliche "Einheitstransporter" verwendet. Ihre Anzahl wird von Variante zu Variante festgelegt.
- 38 Für die Simulation wird nur eine standardisierte "Einheitsvorrichtung" benutzt.

Teil c: Stell-Grössen Maschinen, Anlagen					
Nr.	Grössen (Ausgangslage)	Dim.	Nr.	Reduzierte Grössen (1. Stufe)	Typ
41	BO Kapazitäten	t	-	Jahresbedarf, OP-Merkmale	
42	BO Maschinen	Anz.	-	Jahresbedarf, OP-Merkmale	
43	BO Maschinen Typen	-	-	Sub-Typen vernachlässigt	
44	BZ Kapazitäten	t	-	Jahresbedarf, OP-Merkmale	
...					
68	Trow Kapazitäten	t	19	Zentralkapazität	FG
69	Trow Maschinen	Anz.	-	Zentralkapazität	
70	Trow Maschinen Typen	-	-	Sub-Typen vernachlässigt	
71	Wä Kapazitäten	t	-	Zentralkapazität	
...					

Tabelle 12c: Beispiel Grössen-Reduktion, 1. Stufe

Erklärungen zu Tabelle 12c (Verweise auf Zeilennummern)

- 41,42,44 Die Inselkapazität ergibt zusammen mit den vorgegebenen Teilen, Operationsplänen und dem Jahresbedarf - eine Minimalkonfiguration vorausgesetzt - eindeutige Werte für die Einzelmaschinenkapazitäten und für die notwendige Anzahl der Maschinen. Die Einzelkapazitäten lassen sich somit eindeutig aus dem Jahresbedarf und den OP-Merkmalen ableiten.

43 Für diese Simulation wird nicht zwischen den einzelnen Maschinen gleicher Technologie unterschieden.

68-71 Die Zentralkapazität liegt ausserhalb der Insel in einem "zentralen" Bereich. Für diese Untersuchung wird von einer ständig ausreichend vorhandenen Kapazität ausgegangen. (Weitere Erklärungen siehe 41, 42, 44.)

Teil d: Ziel-Grössen					
Nr.	Grössen (Ausgangslage)	Dim.	Nr.	Reduzierte Grössen (1. Stufe)	Typ
74	DLZ Durchschnitte	t	20	DLZ Durchschnitt	ZG
75	DLZ Streuungen	t	21	DLZ max.	ZG
76	Raumbedarf	m ²	-	Raumbedarf	KG
77	Betriebskostenänderung	Fr.	-	Betriebskostenänderung	KG
78	Investitionsbedarf	Fr.	-	Investitionsbedarf	KG
79	WiA	Stk.	22	WiA	ZG
80	Jahresproduktion	Stk.	23	Jahresproduktion	KG

Tabelle 12d: Beispiel Grössen-Reduktion, 1. Stufe

Erklärungen zu Tabelle 12d (Verweise auf Zeilennummern)

74,75 Die Durchlaufzeit (DLZ) wird summarisch je Produktegruppe mit Durchschnitts- und Extremwerten erfasst.

76-78 Raumbedarf, Betriebskostenänderung und Investitionsbedarf lassen sich nicht direkt aus der Simulation ableiten. Sie können im Anschluss an die Simulation aus den Ergebnissen separat errechnet werden. Aus diesem Grund werden diese Grössen als Kontroll-Grössen deklariert und hier nicht weiter beachtet.

80 Die Jahresproduktion wird nur als Kontroll-Grösse überwacht. Es gilt, dass eine Mindestausstossmenge zu erreichen ist, andererseits aber keine Ueberkapazitäten installiert werden dürfen.

Einzelne Grössen sind im Rahmen dieser Grössen-Reduktion (1. Stufe) umbenannt und/oder umdefiniert worden. Andere Grössen wurden durch die neue Gruppierung zu Abhängigen.

Die Sammlung der Grössen, wie sie oben gezeigt wurde, ist ein gutes Hilfsmittel für ähnliche zukünftige Projekte. Sie erlaubt ein speditives Vorgehen unter Reduktion des Risikos. Auch für unerfahrenere Simulations-Anwender sind die gesammelten Grössen früherer Projekte eine gute Hilfe.

Für das weitere Projekt war diese Liste eine wichtige Dokumentation, die Vereinbarungen und Vereinfachungen in Kurzform prägnant aufzeigt.

6.4.2 Beispiel: 2. Stufe (Prioritätsmatrix)

Für die zweite Reduktionsstufe wird i.d.R. noch nicht zwischen Stell- und Fixen-Grössen unterschieden, um nicht zu früh Lösungsmöglichkeiten auszuschliessen. Hier in diesem Beispiel wird aus Gründen der Uebersichtlichkeit auf die Fixen-Grössen verzichtet.

Die Rangierung der Ziel- und Kontroll-Grössen entfällt in dieser Stufe, da ihre Anzahl bereits befriedigend ist. Die paarweise Rangierung der Grössen erfolgt immer in bezug auf die Ziele oder Zielfunktion. In diesem Beispiel sind das die DLZ sowie die WiA. Für sie wird die Rangierung getrennt vorgenommen.

Für das Verfahren der Rangierung sei auf die Erklärungen in Abschnitt Nr. 6.2.2 "Konzept Prioritätsmatrix" verwiesen.

2	y ₁	3	y ₁	4	y ₁	5	y ₁	6	y ₁	7	y ₁	8	y ₁	9	y ₁	x _i \ y _j	Σ y _j	Σ x _i	Σ x _i y _j	Rang	
1	1	2	0	2	0	1	1	1	1	0	2	0	2	0	2	1	9	10	X	19	4
1	1	2	0	1	1	0	2	1	1	1	1	0	2	0	2	1	11	8	2	21	2
		1	1	1	1	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2	2	10	11	7	28	1
		2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	0	2	3	11	4	6	20	3
				1	1	0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	4	10	4	6	20	3
				0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	0	2	5	7	7	5	19	4
				0	2	2	0	2	0	2	0	2	0	2	6	7	7	5	19	4	
						0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	7	7	5	19	4	
						0	2	1	1	0	2	0	2	0	2	8	5	5	6	16	7
								1	1	0	2	0	2	0	2	9	5	6	16	7	
										1	1	0	2	0	2	7	4	9	17	6	
												0	2	0	2	8	4	9	17	6	
												0	2	0	2	9	4	9	17	6	
												1	1	0	2	8	2	1	0	3	8
												1	1	0	2	9	1	0	3	8	
														0	2	9	X	X	1	1	9
																9	X	X	1	1	9
																Σ x _i					
1	X	3	X	4	X	1	X	2	X	3	X	0	X	0	X						
1	X	4	X	2	X	4	X	4	X	6	X	0	X	1	X						

Bewertung Teilziele:

2
1

 DLZ
WA

Tabelle 13: Beispiel Prioritätsmatrix

Als Beispiel aus Tabelle Nr. 13 wird an zwei Fällen gezeigt, wie die Priorisierung konkret, mit der hier vorgeschlagenen Prioritätsmatrix, im Hinblick auf diverse Ziele erfolgt:

1. Vergleich

Was hat grösseren Einfluss (höhere Priorität) auf das Ziel "Durchlaufzeit" (DLZ): die Produktegruppen oder der Jahresbedarf? ¹⁴⁹ Im Rahmen dieses Industrieprojektes lässt sich keine Priorität festlegen, daraus folgt die Bewertung 1:1.

Für die Ziel-Grösse Ware in Arbeit (WiA) verhält sich die Bewertung analog.

2. Vergleich

Bezüglich beider Ziel-Grössen hat die Losgrösse einen grösseren Einfluss als die Produktegruppen. Daraus folgt zweimal die Bewertung 2:0.

Nr.	Grössen (nach 1. Stufe)	Typ	Dim.	Nr.	Reduzierte Grössen (2. Stufe)	Typ
1	Produktegruppen	SG	Anz.	1	Repräsentanten	SG
2	Jahresbedarf	SG	Anz.	2	Jahresbedarf	SG
3	Losgrössen	SG	Anz.	3	Losgrössen	SG
4	Schichten	SG	Anz.	4	Schichten	SG
5	Inselgliederung	SG	-	5	Inselgliederung	SG
6	Uebergangszeiten intern	SG	t	6	Uebergangszeiten intern	FG
7	Uebergangszeiten extern	SG	t	7	Uebergangszeiten extern	FG
8	Einheitstransporter	SG	Anz.	8	Transporter	vernachlässigt
9	Einheitsvorrichtungen	SG	Anz.	9	Vorrichtungen	vernachlässigt

Tabelle 14: Beispiel Grössen-Reduktion, 2. Stufe

In dieser 2. Stufe erfolgten, gestützt auf die Prioritätsmatrix, folgende Vereinfachungen:

- Aus den Produktegruppen wurden spezifische Repräsentanten für die weitere Untersuchung bestimmt.
- Die internen und externen Uebergangszeiten werden einheitlich auf einen Mittelwert festgelegt.
- Die Transporte erfolgen vor Beginn der Operationsfolge am Arbeitsplatz. Transporthilfsmittel stehen in ausreichendem Mass zur Verfügung. Daraus ergibt sich, dass in diesem speziellen Fall die Transportmittel vernachlässigt werden können.
- Mit den Vorrichtungen verhält es sich analog. Ihre Handhabung ist in den OP-Zeiten eingeschlossen.

6.4.3 Beispiel: 3. Stufe (Abhängigkeitsmatrix)

Hier in der dritten Reduktionsstufe sind nur die Stell- ohne die Fixen-Grössen berücksichtigt. Im allgemeinen sind die Fixen-Grössen, bei denen ein Zweifel besteht, noch miteinzuz-

¹⁴⁹ Produktegruppen und Jahresbedarf sind in der Beschreibung zur Tabelle Nr. 12a definiert.

beziehen. Die Ziel- und Kontroll-Grössen wurden zur Kontrolle in die Untersuchung aufgenommen.

Für das Verfahren sei auf die Erklärungen in Abschnitt Nr. 6.2.4 "Konzept Abhängigkeitsmatrix" verwiesen.

Vergleich			bidirektional					unidirektional			Zeilen- summe
			SG					ZG	KG		
Nr.	Grösse		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	SG	Repräsentanten	0	-	-	-	-	2	2	1	5
2	SG	Jahresbedarf	1	0	-	-	-	2	2	5	10
3	SG	Losgrössen	2	5	1	-	-	5	5	0	18
4	SG	Schichten	0	2	0	0	-	2	1	2	7
5	SG	Inselgliederung	0	2	2	0	0	5	2	2	13
6	ZG	DLZ	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	ZG	WiA	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	KG	Jahresproduktion	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Spaltensumme		3	9	3	0	0	16	12	10	
	Zeilensumme		5	10	18	7	13	-	-	-	
	Summe gesamt		8	19	21	7	13	16	12	10	
	Rangierung		4.	2.	1.	5.	3.	1.	2.	3.	

Tabelle 15: Beispiel, Grössen-Reduktion 3. Stufe

Aus dem Ergebnis der 3. Stufe wurden, nach Rücksprache mit dem Auftraggeber, folgende Schlüsse gezogen:

- Die Losgrössen sind eine sehr entscheidende Stell-Grösse. Sie sind bezüglich ihres Einflusses eingehend mit der Simulation zu untersuchen.
Bei der Stell-Grösse Losgrössen wurde eine schwache Rekursivität des Einflusses in bezug auf das Ziel angenommen. Dieser Einfluss ergibt sich nicht nur aus der Anzahl Teile pro Los, sondern auch aus stark unterschiedlich langen Losbearbeitungszeiten. Dabei haben evtl. kleine Lose einen Nachteil.
In der Simulation sind die Grössen besonders zu beachten, die einen direkten oder indirekten Einfluss auf sich selbst haben, da sie durch ihre Rekursivität unkontrollierbare Instabilitäten, z.B. "Aufschaukelungseffekte", sowohl im Simulations-Modell als auch in der Realität erzeugen können.
- Der Jahresbedarf soll im Rahmen des möglichen realen Bedarfs variiert werden. Die Ueberprüfung der Systemsensitivität soll auch über den Jahresbedarf erfolgen.

- Gemäss Entscheid der Auftraggeber für die Simulations-Studie sollten in einem ersten Durchgang nur zwei definierte Repräsentantenkombinationen (Varianten) untersucht werden.
- Die jeweilige Anzahl der (Arbeits-) Schichten wurde auf das absolut Notwendige festgelegt. Dabei ist jeder Arbeitsplatz bzw. jede Maschine über das gesamte Jahr einheitlich auf eine oder zwei Schichten fixiert. Variierende Schichtfolgen sind ausgeschlossen. So wird diese Grösse zu einer Abhängigen. (Vgl. Beschreibung Nr. 16-18, der Tabelle Nr. 8.)
- Wie Tabelle Nr. 15 gezeigt hat, sind alle Ziel- und Kontroll-Grössen signifikant von den Stell-Grössen abhängig. Keine der Ziel- und Kontroll-Grössen ist unbeeinflusst, d.h. sie sind richtig gewählt.

6.4.4 Beispiel: Ergebnis

Das Ergebnis dieses Beispiels zur Parameter-Reduktion, ausgehend von ursprünglich 80 Grössen ¹⁵⁰, lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Ziel-Grössen	
DLZ (je Repräsentant Durchschnitt, Maximum)	t
WiA (je Repräsentant)	Anz.
Kontroll-Grössen	
Jahresproduktion (je Repräsentant)	Anz.

Tabelle 16a: Beispiel Grössen-Reduktion ZG und KG, Ergebnis

Stell-Grössen	
Losgrössen (Auftrag, Transport)	Anz.
Repräsentanten (Produktgruppen)	Anz.
Jahresbedarf (je Repräsentant an ED- und Neubedarf)	Anz.
Inselgliederung	-

Tabelle 16b: Beispiel Grössen-Reduktion SG, Ergebnis

¹⁵⁰ Vgl. Tabelle Nr. 12a bis d.

Fixe-Grössen	
Uebergangszeiten intern (räumliche Anordnung)	t
Uebergangszeiten extern (räumliche Anordnung)	t
Zentralkapazität (Trow, Wä) ¹⁵¹	t
Puffergrössen (unbegrenzt)	Anz.
Pufferprioritäten (längste Systemzeit, im Zweifelsfall höchste OP-Nr.)	-
Transportprioritäten (FIFO, im Zweifelsfall Random)	-
Arbeitsprioritäten (FIFO)	-
Fertigungslosgrössen (Einzelfertigung)	Anz.
Schichtversätze	t
Schichtlängen	t
Personal	-
OP-Merkmale (Hauptzeiten, Rüstzeiten, Technologien, Aufspannungen etc.)	-

Tabelle 16c: Beispiel Grössen-Reduktion FG, Ergebnis

Alle in der Tabelle Nr. 16a, b, c nicht aufgeführten Grössen sind entweder zu Gruppen zusammengefasst oder durch zusätzliche Rahmenbedingungen und Annahmen zu abhängigen Grössen geworden. Ausnahmen sind Transporter und Vorrichtungen, welche bewusst vernachlässigt worden sind.

Die endgültige Umsetzung der restlichen Grössen in einen Versuchsplan sind in Abschnitt Nr. 4.1.4 "Versuchsplanung mit Versuchsmatrix" Tabelle Nr. 8 "Beispiel für eine Versuchsmatrix" ersichtlich.

¹⁵¹ Bei einer fixen Bearbeitungsmenge pro Zeit ist für die Leistungskapazität nur die Betriebsdauer (t) entscheidend.

7. VERSUCHSPLANUNGS-METHODE

Welcher Art ein Versuch auch ist, in allen Fällen kann man vom Standpunkt der Auswertung aus den Zweck des Versuches folgendermassen charakterisieren: Der Versuch soll bei gegebenem, begrenztem Aufwand zu richtigen und möglichst genauen Ergebnissen führen ¹⁵². Der Plan des Versuches bestimmt die Ergiebigkeit und die Güte der Ergebnisse ¹⁵³!

In Simulations-Versuchen stellt sich neben einem konkreten Ergebnis oft die Frage nach dem spezifischen Einfluss von einzelnen Stell-Grössen (SG) auf die Ziel-Grössen (ZG). *Stell-Grössen werden im Rahmen der statistischen Versuchsplanung üblicherweise als (Stell-) Faktoren bezeichnet.*

Die konventionelle Versuchsdurchführung besteht darin, eine Grösse nach der anderen zu variieren und zu beobachten auf welche Weise sich das Ergebnis verändert. Alle übrigen Grössen werden auf einem bestimmten, meist "willkürlich" gewählten, Wert festgehalten. Damit wird erreicht, dass sich die anderen Stell-Grössen in der Veränderung des Ergebnisses nicht störend auswirken ¹⁵⁴.

Dieses Vorgehen lässt sich folgendermassen charakterisieren: Durch pragmatische Zielverfolgung wird das System abgetastet, bis ein Missstand (z.B. Engpass an einer Maschine) gefunden ist. Nach der Beseitigung (z.B. durch eine zusätzliche Maschine) erfolgt die Suche nach dem nächsten Missstand. Man spricht dabei von "One by One Versuchen" oder von einem Reparaturdienstverhalten ¹⁵⁵. Respektive geht der Anwender, dem "eindimensionalen" Denken verhaftet, bei der Suche nach geeigneten Massnahmen zur Systemverbesserung sehr "zielstrebig", d.h. geradlinig und ohne Verzweigung vor. Alternativen werden nicht erkannt und analysiert. Wie bei einem Anfänger im Schachspiel geschieht die Planung in beiden genannten Fällen ohne eine grosse Linie, d.h. ohne klare Wege zum Ziel ¹⁵⁶.

Wie sich bei der gleichen oder einer kleineren Zahl von Versuchen mehr Ergebnisse mit präziseren Aussagen - und das ohne einen zusätzlichen Versuchsaufwand - ergeben, wird noch gezeigt.

Die statistische Versuchsplanung hat ihren Ursprung um 1920 in der landwirtschaftlichen Forschung durch den englischen Mathematiker R. A. FISHER. Er hat eindrücklich darge-

¹⁵² Vgl. LINDER 55, S. 74.

¹⁵³ LINDER 53, S. 3.

¹⁵⁴ Vgl. LINDER 53, S. 79 und auch ITT 87, S. 1.

¹⁵⁵ "One by One" Versuchsplan: Um auf diese Art eine "gute" Lösung zu finden, sind sehr viele einzelne Versuche notwendig, weil für jeden einzelnen Wert eines Faktors alle anderen einzeln zu variieren sind. Komplexe Wirkzusammenhänge können auf diese Art grundsätzlich nicht erkannt werden (siehe weiter im Text).

¹⁵⁶ Vgl. auch VESTER 80, S. 25 nach DÖRNER D., "Problemlösen als Informationsverarbeitung", Kohlhammer, Stuttgart, 1976.

legt, dass dieses "normale" Vorgehen (konventionelle Versuchsdurchführung) meist unzweckmässig ist. Er befürwortet demgegenüber die Versuchsmethode mit voll- oder teilfaktoriellen Plänen, um die Wirkung der verschiedenen Faktoren (Stell-Grössen) gleichzeitig und in Kombination zu untersuchen. Bei passender Wahl der Faktorwerte werden bei kalkulierbarem (i.d.R. kleinerem) Versuchsaufwand nicht nur erheblich genauere Ergebnisse erzielt, sondern man erhält auch Aufschluss über möglicherweise vorhandene Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Faktoren (sog. Wechselwirkungen).¹⁵⁷

Die statistische Versuchsplanung wurde lange Zeit massgeblich durch R.A. FISHER und F. YATES weiterentwickelt und verbreitet. Die Versuchsplanung war über einen langen Zeitraum Gegenstand der Forschung. In der industriellen Anwendung hatte sie jedoch anfänglich nur eine untergeordnete Bedeutung. Sie fand seit ihrer Entwicklung für die Landwirtschaft auch Eingang in die Biologie und Verfahrenstechnik, in der sie sich inzwischen fest etabliert hat¹⁵⁸. Die Methoden der statistischen Versuchsplanung und Prozessanalyse - Design of Experiment (DOE)-Methoden - erleben im Umfeld der Qualitätssicherung seit einiger Zeit eine weitere Renaissance. Dazu haben in den letzten Jahren besonders die Herren G. TAGUCHI und D. SHAININ beigetragen¹⁵⁹. Der Erfolg der statistischen Versuchsplanungs-Methode liegt in der systematischen Vorbereitung und Auswertung.

Die statistische Versuchsplanung eignet sich, wie noch gezeigt wird, auch ausgezeichnet zur Analyse von Produktions- und Geschäftsprozessen unter Einbezug der Simulation. Die hier vorgestellte und vertiefte Versuchsplanung hat ihren Ursprung in der Statistik.

7.1 NOTWENDIGKEIT DER VERSUCHSPLANUNG

Die Versuchsplanung zur Vorbereitung von Versuchen hat in der Praxis der Simulations-Anwendung nicht das gleiche Gewicht wie die Theorie der Versuchsauswertung im Anschluss an die Durchführung von Experimenten bzw. Versuchen. Die Ursache dafür ist psychologischer Natur. Um einen Versuch optimal zu planen, muss sich der Durchführende hinsichtlich seiner Aufgabenstellung ganz präzise festlegen. Gerade dabei gibt es allgemein grosse Vorbehalte. Der Durchführende lässt sich, falls überhaupt, nach den Versuchen von einem Statistiker beraten, wie er seine Versuchsergebnisse am besten auswerten kann.¹⁶⁰

Dieser Sachverhalt trifft für die Computer-Simulation im besonderen zu; da hier sogar von namhaften Experten behauptet wird, eine vorausgehende Versuchsplanung sei undurch-

¹⁵⁷ Vgl. LINDER 53, S. 79, MÜLLER 92, S. 290 f. und ITT 87, S. 1.

¹⁵⁸ Vgl. auch KLEPPMANN 92, S. 89.

¹⁵⁹ Die Weiterentwicklungen für die Qualitätssicherung von TAGUCHI und SHAININ sind für die Verwendung bei der diskreten Computer-Simulation nicht von Interesse, da sie zu spezifisch in der Anwendung sind.

¹⁶⁰ Vgl. RASCH et al 92, S. 1.

führbar und falls sie doch gemacht wird, schränke sie den Ideenreichtum bei der Lösungssuche nur unnötig ein. Daraus abgeleitet ergibt sich der Schluss, dass die Notwendigkeit für eine Versuchsplanung bei der Simulation heute noch nicht ausreichend erkannt ist. Die Folgeprobleme werden negiert oder leichtfertig als Kreativität im Lösungsprozess bezeichnet. Auch die am Markt verfügbaren Simulations-Pakete unterstützen diesen Trend "fort von der Versuchsplanung". Sie beschränken sich meist auf eine rudimentäre statistische Unterstützung bei der Ergebnisauswertung ¹⁶¹.

Daraus ergibt sich, dass sich noch fast niemand ernsthaft damit befasst hat, die Versuchsplanung in die Simulation-Anwendung zu integrieren. Ausnahmen sind einige wenige Anwendern der Simulation, die langsam feststellen, man "müsste" die Möglichkeiten der statistischen Versuchsplanung bei der Simulation gezielter nutzen. Diese Aussagen beziehen sich auf den methodischen wie auch auf den softwaretechnischen Aspekt.

Das Ziel der statistischen Versuchsplanung in der Simulations-Anwendung ist es, die Ursachen-Wirkungs-Beziehungen zwischen den Faktoren (Stell-Grössen) und den Ziel-Grössen effizient zu analysieren. Dabei gilt es, um den Simulations-Aufwand zu begrenzen, die praktisch möglichen und sinnvollen Parameter-Kombinationen aus einem n-dimensionalen Parameter-Raum ¹⁶² von den theoretisch möglichen abzugrenzen. Der Grundgedanke ist, ein intuitives, spielerisches Experimentieren (heute üblich) durch eine Vorgehensstrategie zu ersetzen und dabei das Nutzen/Aufwand-Verhältnis zu verbessern ¹⁶³. Die Art dieser vorausgehenden Planung bestimmt die Qualität der quantitativen Ergebnisse, indem sie eine definierte Fehleranalyse zulässt und/oder die Versuche entsprechend der geforderten Genauigkeit festlegt. Sie hilft weiter in einem System, die Einflüsse sowie die komplexen Beziehungen und Wirkungen quantitativ zu illustrieren. Auch erlaubt sie, den Aufwand vor Beginn der Simulations-Versuche zu schätzen.

Es bleibt festzuhalten: Für eine seriöse, finanziell (niedrig, wirtschaftlich) kalkulierbare Simulations-Studie bei "optimalem" Nutzen ist eine vorausgehende Versuchsplanung in Uebereinstimmung mit den Zielen unerlässlich. Die Versuchsplanung hat die Aufgabe, dass zur Lösungserreichung nicht mehr Stell-Grössen-Konstellationen simuliert werden als unbedingt notwendig sind ¹⁶⁴. Daraus resultiert, dass die Auftraggeber einer Simulations-Studie immer eine vorausgehende Versuchsplanung als Sicherheit für eine seriöse Durchführung fordern müssten. Ohne eine vorgängige Planung ist es natürlich für den Durchführenden der Simulations-Studie unverbindlicher und damit viel bequemer, da quasi "jede" Aussage wenigstens mit der Zeit dem gewünschten Ergebnis entspricht, falls die

¹⁶¹ Meistens stehen nur Ergebnistabellen, grafische Histogramme und Kurvenverläufe zur Auswahl. Weitere grundlegende Elemente der schliessenden Statistik wie z.B. Median, Streuungen fehlen oft.

¹⁶² Aktive Stell-Grössen werden in der Versuchsplanung als "Faktoren" bezeichnet. Die Faktoren bilden die Achsen, die den sogenannten Untersuchungsraum aufspannen.

¹⁶³ Ein planloses Probieren führt nicht oder nur zufällig zum Ziel!

¹⁶⁴ Vgl. auch SHANNON 75, S. 145.

Studie nicht vorher wegen Erschöpfung der Mittel oder Hoffnungslosigkeit abgebrochen wird. Anders ausgedrückt, mit einer an die Experimente anschliessenden "Uminterpretation" der Simulations-Ziele ist "niemandem" geholfen.

Die statistische Versuchsplanung ist wie die Simulations-Anwendung eine Methode. Will man diese zwei Methoden nutzbringend kombinieren, muss als Voraussetzung der Wunsch für ein klares, effizientes und zielgerichtetes Vorgehen in der Simulations-Anwendung vorliegen.

7.2 DEFINITIONEN UND ALLGEMEINE ERKLÄRUNGEN

Innerhalb des vorliegenden Kapitels werden die "speziellen Definitionen" aus Abschnitt Nr. 6.1.2 vorausgesetzt.

Versuch

Ein Versuch ist die Einflussnahme des Menschen auf einen Teil der objektiven (Plan-) Realität mit dem Ziel, das Ergebnis dieser Einflussnahme zu beobachten. ¹⁶⁵

Versuchsplan

Ein Versuchsplan ist eine Rahmenvorschrift zur Durchführung von Versuchen. ¹⁶⁶

Diese Rahmenvorschrift beinhaltet die Auswahl der Faktoren (Stell-Grössen), die zu untersuchenden Wertebereiche bzw. -stufen und die Versuchsabfolge in der Weise, dass der Durchführende auf effektive und effiziente Weise Informationen zur Beantwortung seiner Fragen erhält. Der Versuchsplan sollte dabei ein Maximum an bereits vorhandenem Wissen berücksichtigen.

Eine raffinierte mathematisch-statistische Analyse kann eine mangelhafte Versuchsplanung nie ganz kompensieren. Die Planung bestimmt den Informationsgehalt der Resultate. ¹⁶⁷

Statistische Versuchsplanung

Unter statistischer Versuchsplanung versteht man das Erarbeiten eines statistischen Versuchsplanes inkl. eines statistischen Modells für die Versuchsauswertung. ¹⁶⁸

¹⁶⁵ Vgl. RASCH et al 92, S. 7 f.

¹⁶⁶ Vgl. auch RASCH et al 92, S. 8.

¹⁶⁷ Vgl. RIPPIN 91, S. 4.3.

¹⁶⁸ RASCH et al 92, S. 8.

Optimale statistische Versuchsplanung

Man spricht von einer optimalen statistischen Versuchsplanung, falls die statistische Versuchsplanung nach einem Optimalitätskriterium vorgenommen wird. ¹⁶⁹

Bei der Simulation geht es dabei neben der Erfüllung der geforderten Genauigkeit auch immer noch darum, die Anzahl der notwendigen Versuche aus Zeit- und Kostengründen auf ein notwendiges Minimum zu beschränken.

Statistische Versuchseinheit

Eine statistische Versuchseinheit ist die kleinste Einheit in einem Versuch, für die Beobachtungswerte als Ergebnisse erfasst werden. ¹⁷⁰

Versuchspunkte

Die in einem Versuchsablauf verwendeten Stufenkombinationen bezeichnet man als Versuchspunkte. ¹⁷¹

Versuchsumfang

Der Versuchsumfang ist die Gesamtanzahl der Versuchspunkte. Werden alle Versuchskombinationen mit allen relevanten Stufen durchgeführt, so spricht man von einem vollständigen Versuchsumfang. ¹⁷²

Faktor

Die aktiven Stell-Größen (unabhängige Variablen und Parameter) werden in der statistischen Versuchsplanung als "Faktoren" (control factor) bezeichnet. Die Faktoren bilden die Achsen, die den sogenannten Versuchsraum (n-dimensionaler Untersuchungsraum) aufspannen. Sie sind die Einfluss-Größen (Merkmale) eines Versuches. Es wird zwischen qualitativen und quantitativen Faktoren unterschieden. ¹⁷³

Bei konstanten Faktoren (einstufig) spricht man von konstanten Größen (Parametern). Sie sind extern oder dem Modell vorgegeben und für alle Versuche unveränderbar. Man spricht daher auch von Versuchsbedingungen.

¹⁶⁹ RASCH et al 92, S. 8.

¹⁷⁰ Vgl. RASCH et al 92, S. 31. Diese Definition ist für die Simulation i.d.R. von untergeordneter Bedeutung, da in der Regel keine Auswertung über mehrere vergleichbare bzw. verschiedene Modelle erfolgt. Eine Ausnahme bilden Modelle mit stochastischen Verteilungsfunktionsvarianten.

¹⁷¹ Vgl. RASCH et al 92, S. 59.

¹⁷² RASCH et al 92, S. 59 bezeichnet diesen Sachverhalt als "Versuchsbereich", Menge der verwendeten Versuchspunkte.

¹⁷³ Vgl. auch RASCH et al 92, S. 31 f. Dort wird auch noch zwischen diskreten und kontinuierlichen Faktoren unterschieden. Qualitative Faktoren haben in der Simulation eine untergeordnete Bedeutung. In der Regel werden sie nur zur kollektiven Beschreibung mehrerer quantitativer Faktoren verwendet.

Faktor-Stufen

Die einzelnen Werte eines Faktors heissen Stufen (sogenannte Wertestufen oder levels). Die Faktor-Stufen sind die diskreten Werte einer unabhängigen Grösse, d.h. die einzelnen untersuchten Werte je Faktor, die in der Versuchsreihe vorkommen. Die Stufen können prinzipiell sowohl quantitativ wie qualitativ sein, z.B. "2,5", "gut" oder "schlecht". Oft sind die Stufen im Rahmen einer Versuchsplanung kodiert, z.B. 1, 2, 3 oder +1, -1 (0 für den mittleren Wert).

Im konkreten bedeutet das z.B. Sicherheitsbestand 1 Woche Kodierung "-1" und 3 Wochen "+1".

Komplexe Wirkzusammenhänge

Als komplexe Wirkzusammenhänge werden verstärkende Wechselwirkungs-Effekte (interactions) ¹⁷⁴ von mehreren Faktoren (Stell-Grössen) auf Ziel- und/oder Kontroll-Grössen verstanden. Die Richtung (+/-) der Verstärkung ist dabei nicht von Bedeutung.

Die Praxis zeigt, Wechselwirkungen sind keine Ausnahmen, sondern eher die Regel. Dabei ist noch nichts über den Grad der Wechselwirkungen ausgesagt. Je geringer das Vorstellungsvermögen dafür ausgeprägt ist, desto grösser ist die Neigung, sie zu vernachlässigen. ¹⁷⁵

Zum besseren Verständnis sei die Verstärkung am folgenden Beispiel erläutert:

- Angenommen, in einem Fertigungsbereich sind zwei Maschinen eingesetzt. Jede dieser Maschinen benötigt in der Produktions- und Rüstphase je einen Arbeiter. Des weiteren sei die Kapazitätsgrenze von 100% erreicht. Aus diesem Grund wird beschlossen eine zusätzliche Maschine anzuschaffen, um die Kapazität um 50% zu erhöhen. Es wird sofort ersichtlich, dass bei gleichen Voraussetzungen zur Kapazitätserhöhung ein zusätzlicher Arbeiter benötigt wird. D.h. die Faktoren Maschine und Mitarbeiter bewirken einzeln erhöht keinen Mehrausstoss (Ziel-Grösse), nur in Kombination kann eine Verbesserung erzielt werden. In diesem Fall spricht man von einem komplexen Wirkzusammenhang von zwei Faktoren. Dieses Beispiel lässt sich leicht durch den Einbezug eines weiteren Faktors, z.B. je eine erforderliche Vorrichtung, zu einem komplexen Wirkzusammenhang von drei Faktoren erweitern. ¹⁷⁶

So geartete komplexe Wirkzusammenhänge treten bei der Simulation von Modellen häufig auf. Obwohl sie schwer zu erkennen sind, üben sie einen massgeblichen Einfluss auf die

¹⁷⁴ Andere Begriffe sind: Wechselwirkungen, Mehrfachwirkung, Mehrfaktorwirkung, Zwei- bzw. Drei-Faktorwirkung.

¹⁷⁵ Vgl. KAPFER 92, S. 65.

¹⁷⁶ Als weiteres Beispiel sei auch der mögliche betragsmässige Unterschied zwischen einer Skalar- und einer Vektor-Addition von zwei Vektoren aufgeführt.

Ergebnisse aus. Für eine effektive Auswertung sind neben den Hauptwirkungen immer auch die komplexen Wirkzusammenhänge zu erfassen.

7.3 VORGEHEN BEI DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Zur Zielsetzung der Versuchsplanung formulierte LINDER (1959), dass u.a. folgende Fragen im voraus beantwortet sein müssen ¹⁷⁷:

- Was will ich wissen?
- Wie genau will ich es wissen?
- Wofür (für welche Gesamtheit) will ich es wissen?

RASCH leitete daraus zwei Thesen für die Versuchsplanung ab ¹⁷⁸:

1. Voraussetzung für eine sinnvolle Versuchsplanung ist das möglichst weitgehende Präzisieren der Versuchsfrage
2. Die Präzisierung der Versuchsfrage muss die Modell-Bildung und die Vorgabe von Genauigkeiten ... umfassen. Es sind Optimalitätskriterien anzugeben.

Unter Berücksichtigung dieser Aussagen lassen sich folgende iterativen Vorgehensschritte und Teilaspekte mit folgenden Fragestellungen zur Versuchsplanung ableiten:

1. Versuchsplanung
 - a) Wahl von Mess-Größen (Ziel- und Kontroll-Größen festlegen)
 - b) Identifikation der Faktoren bzw. Einfluss-Größen (Stell-Größen festlegen, Parameter-Reduktion) ¹⁷⁹
 Welche Faktoren sind relevant? Sollen sie in ihrer ursprünglichen Form betrachtet werden, oder soll man sie transformieren oder kodifizieren? ¹⁸⁰
 Welche Wertebereiche der Faktoren sollen untersucht werden?
 Sind alle oder nur diskrete Zwischenwerte zulässig?
 Wieviel verschiedene Wertestufen je Faktor sollen untersucht werden?
 Sind die Faktoren unabhängig? Wie wird auf Unabhängigkeit getestet? Bei Abhängigkeit, wie sind sie abhängig (Test auf Komplexe-Variablen ¹⁸¹)?
 - c) Versuchsanordnungen festlegen (Modell-Konzeption)

¹⁷⁷ Vgl. RASCH et al 92, S. 5.

¹⁷⁸ RASCH et al 92 S. 5 und 7.

¹⁷⁹ Es ist festzuhalten, dass bei der diskreten Simulation das gesamte Modell durch eine bestimmte Anzahl von Variablen/Parametern beschrieben sein muss. Damit entfällt das Problem, speziell für die Versuchsplanung zusätzliche Größen benennen zu müssen (siehe Kapitel Nr. 6. "Parameter-Reduktion").

¹⁸⁰ Parameter-Reduktion mit Gewichten, Bewerten und Reduzieren der Faktoren.

¹⁸¹ Vgl. Kapitel Nr. 7.2 "Versuchsplanungs-Methode, Definitionen und allgemeine Erklärungen", Teil komplexe Wirkzusammenhänge.

-
- d) **Wahl des erforderlichen Versuchsumfanges**
Welche Kombinationen, Punkte im n -dimensionalen Versuchsraum sollen untersucht werden? ¹⁸²
Sind alle Faktor-Kombinationen relevant?
 - e) **Versuchspläne erstellen**
Welches Versuchsprogramm wird festgelegt?
Mit welcher Taktik wird untersucht? ¹⁸³
- 2. **Versuchsdurchführung**
 - a) **Versuche durchführen**
 - b) **Ergebnisse sammeln**
 - 3. **Versuchsauswertung**
 - a) **Auswertung der Ergebnisse nach primären und komplexen Wirkzusammenhängen**
 - b) **Festlegen der optimalen Faktorkombination oder evtl. weitere Versuche veranlassen**
 - c) **Einen Bestätigungslauf für die optimale Faktorkombination durchführen**
 - 4. **Umsetzung der Ergebnisse**
 - a) **Dokumentieren**
 - b) **Ergebnisse zur Einführung vorschlagen**

Zum 1. Vorgehensschritt, der Versuchsdurchführung, ist folgendes festzuhalten: Teilaspekte a) und b) sind im Rahmen des Kapitels Nr. 6. "Parameter-Reduktion" eingehend behandelt worden. Für den Teilaspekt c) sei auf Kapitel Nr. 2.5 "Modell-Bildung" verwiesen. Die Wahl des erforderlichen Versuchsumfanges (d) hängt stark von dem zu modellierenden Problem (Ziele, Art, Umfang, Detaillierung), den gewünschten Aussagen (Menge und Genauigkeit) sowie von den verwendeten Stochastiken ab. Daraus lässt sich ableiten, dass keine generellen Aussagen bezüglich des Versuchsumfanges erfolgen können. Der Teilaspekt e) bezüglich Taktik von Versuchsplanungen wird in diesem Kapitel im speziellen vertieft. Für das Versuchsprogramm (e) gilt das bereits zu Teilaspekt d) Gesagte.

¹⁸² Bei Modellen mit stochastischen Einflüssen muss die Anzahl der jeweiligen Versuchswiederholungen aus Sicht der Statistik festgelegt werden.

¹⁸³ Reihenfolgeplanung und Priorisierung der Versuchsreihenfolge. Die Randomisierung der Versuchsreihenfolge entfällt, da die Simulation mit einem synthetischen Modell zwingend reproduzierbare Ergebnisse voraussetzt (Qualitätsmerkmal).

Für den 3. Vorgehensschritt gilt: Die Versuchsauswertung ist in starkem Mass vom Versuchsplan abhängig. Deshalb muss bei der Erstellung von Versuchsplänen immer auch die "rationelle" Auswertung mitgeplant werden.

Beim 4. Vorgehensschritt "Umsetzung der Ergebnisse" gilt das Analoge wie beim entsprechenden Schritt "Vorgehensmethode für die Simulation".¹⁸⁴

Gegebenenfalls können aus der Kenntnis der Wirkung der einzelnen Einflussfaktoren die jeweils untersuchten Wertestufen (Intervalle) der Faktoren eingengt oder vergrössert werden, um das Verhalten des Modells gezielt und genauer zu untersuchen. Mit jeder Iteration innerhalb der Versuchsdurchführung wird der Kreislauf auf einem höheren Wissensniveau von neuem durchlaufen. Es ist die Aufgabe des Anwenders, in Abhängigkeit der Anforderungen, das richtige Mass zu finden.

Es bleibt festzuhalten, dass die Versuchsplanung, wie auch die Simulation, ein iteratives Vorgehen beinhaltet und stark erfahrungsbasiert sowie problemspezifisch ist.

7.4 GENERELLE PRINZIPIEN DER VERSUCHSPLANUNG

Jede allgemein zu verwendende systematische Versuchsplanung beinhaltet folgende drei Hauptprinzipien¹⁸⁵:

1. wiederholen
2. randomisieren
3. ausschalten erfassbarer Stör-Grössen (noise factors)

Zur Erläuterung des jeweiligen Hauptprinzips wird nachfolgend deren unterschiedliche Bedeutung im Vergleich dargestellt. Die Ausführungen enthalten Erklärungen zum allgemeinen Hintergrund, gefolgt von der Bedeutung anhand von zwei ausgewählten Beispielen, 1. allgemeine Anwendung von "Feldversuchen in der Agronomie" und 2. spezifische Anwendung aus "Sicht der diskreten Simulation".

Zu 1. "wiederholen"

Allgemeiner Hintergrund:

Die Versuchswiederholung dient dem Ausschalten von Versuchsfehlern bzw. der Versuchsstreuung, welche durch wechselnde äussere Einflüsse entstehen. Erreicht wird dies durch statistische Verarbeitung der in unterschiedlicher Versuchsumgebung

¹⁸⁴ Vgl. Kapitel Nr. 4.4 "Lösungsempfehlung".

¹⁸⁵ Vgl. LINDER 53, S. 8 ff. und RASCH et al 92, S. 12. Bei Simulations-Anwendungen entfallen einige dieser Hauptprinzipien (siehe weiter im Text).

erhaltenen Einzelergebnisse, z.B. durch Mittelwertbildung und Regressionsrechnungen.

Bedeutung für einen Feldversuch in der Agronomie:

Der Versuch muss parallel auf mehreren verschiedenen Feldern durchgeführt werden.

Bedeutung für die diskrete Computer-Simulation:

Die Anwendung dieses Prinzips entfällt für die Simulation. Versuchsergebnisse in den exakten Wissenschaften sind im Prinzip wiederholbar. Stellt man die gleichen Versuchsbedingungen her, erhält man im wesentlichen ein vorher kalkulierbares Ergebnis ¹⁸⁶. Im Gegensatz zu Teilchen-Experimenten in der Atomphysik ¹⁸⁷ unterliegen Simulations-Experimente auf Computern keinen zufälligen, d.h. nicht beabsichtigten, stochastischen äusseren Einflüssen. Ein Computer bearbeitet immer nur sein vorgegebenes Programm ¹⁸⁸. Auch die Stochastik muss eindeutig reproduzierbar ¹⁸⁹ programmiert sein. Die Simulation eines Modells auf Computern unterliegt keinen wechselnden äusseren Einflüssen und hat damit keine dadurch entstandene Versuchssteuerung. Im speziellen Fall der Computer-Simulation entfällt daher die Forderung nach Wiederholung identischer Versuche. Dieser Aspekt ermöglicht eine nur einmalige Versuchsdurchführung von jeder Alternative und vereinfacht damit auch die Versuchsauswertung.

Zu 2. "randomisieren"

Allgemeiner Hintergrund:

Durch das Randomisieren, z.B. durch Zufallszahlen bestimmt, sollen unbekannte störende - evtl. einseitige - Einflüsse möglichst ausgeschaltet werden.

Bedeutung für einen Feldversuch in der Agronomie:

Die Zuteilung der Versuchseinheiten auf die einzelnen Felder und die Versuchsreihenfolge haben randomisiert zu erfolgen.

Bedeutung für die diskrete Computer-Simulation:

Die Versuchsreihenfolge bei der Simulations-Anwendung muss nicht randomisiert sein, da mit einem synthetischen System (Modell) mit reproduzierbaren Ergebnissen

¹⁸⁶ RASCH et al 92, S. V.

¹⁸⁷ Gleiches gilt für prozess- und messbedingte Fehler bzw. Streuungen in der Qualitätssicherung.

¹⁸⁸ Eine Simulation liefert bei absolut identischen Eingaben identische Ergebnisse. Das Wiederholen muss also auf notwendige unterschiedliche Ausgangssituationen (Eingaben) beruhen. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist ein entscheidendes Qualitätsmerkmal und somit eine zwingende Voraussetzung. Streuungen, die sich nicht auf konkrete beabsichtigte stochastische Einflüsse zurückführen lassen, deuten auf gravierende Fehler hin. Treten derartige Unterschiede trotzdem auf, lässt das auf interne Modellfehler oder SW-Instabilitäten schliessen. Vgl. Kapitel Nr. 3.2 "Qualitätssicherung".

¹⁸⁹ Einschränkend gilt dies im strengen Sinn nur bei Verwendung von reproduzierbaren Pseudozufallszahlenreihen, welche Computer-HW unabhängig generiert werden.

experimentiert wird. Dadurch kann die Reihenfolge nur durch den minimalen Veränderungs- und Versuchsaufwand vorgegeben werden.

Weiter gilt, Stell-Grössen die aus Gründen der Unsicherheit oder aus Arbeitersparnis bei der Erhebung mit einer stochastischen Verteilung etc. belegt sind tragen nicht zu einer effizienten Simulations-Anwendung bei. Alle statistischen und stochastischen Einflüsse sind auf ihre Notwendigkeit zu überprüfen und nach Möglichkeit immer zu vermeiden oder zu begrenzen. Jede unnötige künstliche Randomisierung von Stell-Grössen steigert die Anzahl der notwendigen Simulations-Experimente, um aus den Ergebnissen statistisch gesicherte Aussagen als Zusammenfassung zu erhalten und um das stochastische Rauschen statistisch zu entfernen. Eine Randomisierung zur Ausschaltung von Fehlern und nicht erfasster Einflüsse ist in dieser Art der Simulation ohne Bedeutung und entfällt (vgl. auch zu 3. "ausschalten erfassbarer Stör-Grössen"). Viele stochastische Einflüsse lassen sich auf konkrete Versuche zurückführen, die dann für die Simulation konsequent und eindeutig nachvollziehbar sind. In der Regel ist ein Simulations-Lauf mit konstanten Mittelwerten für sehr viele Fragestellungen ausreichend. Eine zusätzliche Simulation einer "Worst Case"-Variante mit Maximal- und/oder Minimal-Werten zur Absicherung gegenüber dem Auftraggeber zeigt anschliessend die Grenzen des Systems auf. Der Gewinn an Erkenntnissen durch die Verwendung von stochastischen Grössen rechtfertigt den zusätzlichen Aufwand (Modell-Bau, statistische Auswertung) nur in Ausnahmefällen.

Zu 3. "ausschalten erfassbarer Stör-Grössen"

Allgemeiner Hintergrund:

Mit diesem Prinzip wird eine Erhöhung der Versuchsempfindlichkeit durch Bildung von Versuchsblöcken angestrebt. Dadurch sollen sich Stör-Grössen möglichst egalisieren und sich die zu untersuchenden Zusammenhänge und Grössen potenzieren.

Bedeutung für einen Feldversuch in der Agronomie:

Es werden bei der Versuchsplanung gleichartige Gruppen (Blöcke) von Feldern definiert. Die Versuchsauswertung erhält dadurch zusätzliche Möglichkeiten.

Bedeutung für die diskrete Computer-Simulation:

Die Anwendung dieses Prinzips entfällt für die Simulation. Die Modell-Aussagegenauigkeit ist primär durch die Reduktion bzw. Rücktransformation der Daten und durch die Wahl der abgebildeten Grössen bedingt. Störende Einflüsse z.B. durch zu geringe oder zu starke Abstraktion des Modells sind in den Vorarbeiten speziell in der Modell-Konzeption zu berücksichtigen und zu beheben ¹⁹⁰.

¹⁹⁰ Siehe dazu Kapitel Nr. 4. "Konzeption einer Vorgehensmethode" Teile Einsatzdefinition und Modell-Bau.

7.5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die diversen Versuchsdurchführungen bzw. Versuchspläne unterscheiden sich durch die Art und Anzahl der Faktoren sowie ihrer Berücksichtigung. Faktoren lassen sich auf drei Arten verwenden:

1. Sie werden konstant gehalten und sind damit Bestandteil des experimentellen Rahmens.
2. Sie werden frei (stochastisch) variiert und sind damit Teil des Versuchsfehlers.
3. Sie werden extern vom Modell kontrolliert.

Aus diesen Möglichkeiten haben sich im Laufe der Zeit diverse Methoden für die Versuchsdurchführung etabliert. Versuche können u.a. nach folgenden Mustern geplant werden ¹⁹¹:

- Trial and Error-Vorgehen
- One by One-Versuche
- Ein-Faktor-Versuch mit Stochastik
- voll- und teilfaktorielle Versuche

7.5.1 Trial and Error-Vorgehen

Dieser empirische, intuitive Ansatz ist sehr verbreitet. Seine Anwendung erfordert "keine" speziellen methodischen Vorkenntnisse. Der Ansatz ist aber nur mit sehr guter Problemerkennung des Anwenders bei einem relativ grossen Auswertungsaufwand, und da auch nur in Ausnahmefällen, "erfolgreich" ¹⁹². Subjektives Vorgehen enthält die Gefahr von subjektiven und schlecht dokumentierten Lösungen.

- | | |
|---------------|--|
| Kurzbewertung | <ul style="list-style-type: none"> + keine Vorkenntnisse + schnelle erste Ergebnisse - geringe Erkenntnisse über Zusammenhänge - praktisch keine Optimierungs-Chance - schlechte Reproduzierbarkeit |
|---------------|--|

¹⁹¹ Neben den hier erwähnten Versuchsvorgehen gibt es in vielen Bereichen noch eine Vielzahl weiterer Konzepte. Es wäre interessant, deren Adaptierbarkeit für die Simulation zu untersuchen, z.B. ein Vorgehen auf der Basis der Frequenzanalyse.

Die Methoden der Kombinatorik können zur Eingrenzung der zu untersuchenden Varianten im Rahmen der Simulation für unsere Fragestellung zur Effizienzsteigerung der Simulation nichts beitragen. Die Idee wird deshalb in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

¹⁹² Die Zielsuche erfolgt in einem n-dimensionalen Ergebnisraum. Die Chance, ein Problem mit Haupt- und Nebenoptima zu optimieren, ist daher auch vom Zufall abhängig. Der n-dimensionale Ergebnisraum wird durch die "n" Faktoren (Variablen) aufgespannt.

7.5.2 One by One-Versuchsplan

Die klassische, systematische Methode zur Untersuchung der Wirkung mehrerer Einflussfaktoren besteht darin, nur einen Faktor zu variieren und die anderen dabei konstant zu halten. Dieses Vorgehen führt zu einer Abgrenzung aller Faktoren untereinander. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem fortgesetzten Ein-Faktoren-Versuch (One by One). Es handelt sich um eine Systematik mit Vorbehalten. Dadurch, dass nach Abschluss der One by One-Versuche alle Faktoren auf ihre optimale Einstellung aus den Einzelversuchsergebnissen eingestellt werden, ist man der Meinung, das Maximum zu erzielen¹⁹³. Gerade das ist aber auf diese Art, in einem n-dimensionalen Versuchsraum, praktisch unmöglich. Diese Methode ist einerseits relativ aufwendig, andererseits können damit komplexe Wirkzusammenhänge (Wechselwirkungen) zwischen den Faktoren nicht analysiert werden.

Kurzbewertung	+ bekanntes Verfahren ¹⁹⁴
	+ schnelle erste Ergebnisse
	- keine Erkenntnisse über Wechselwirkungen
	- geringe Chance für Parameter-Optimierung
	- wenig Effizienz

7.5.3 Ein-Faktor-Versuch mit Stochastik

Eine weitere Möglichkeit besteht darin alle Faktoren, bis auf den zu untersuchenden, stochastisch zu variieren. Der entsprechende Faktor wird dabei nacheinander auf konkrete Wertestufen gesetzt. Als Ergebnis erhält man für jede Stufe des Faktors ein Intervall bzw. eine Bandbreite. Im Anschluss an die Simulations-Läufe werden diese Bandbreiten, jeweils einzeln, einer statistischen Fehleranalyse unterzogen. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, gedanklich leicht nachvollziehbar zu sein. Als Nachteil muss die grosse Anzahl der erforderlichen Simulations-Läufe betrachtet werden, um die relativ anspruchsvolle statistische Fehlerbetrachtung durchzuführen und die erhaltenen Ergebnisse richtig zu interpretieren.¹⁹⁵

Kurzbewertung	+ gutes Verfahren bei einer interessierenden Stell-Grösse
	+ summarische Berücksichtigung der Wechselwirkungen

¹⁹³ Diese Methode wurde lange Zeit als die allein richtige und als einzige für die Forschung zulässige angesehen. Vgl. auch QUENTIN 89, S. 230.

¹⁹⁴ Dieses Verfahren ist sehr gut geeignet, um bekannte, einfache Zusammenhänge an Aussenstehende zu vermitteln, d.h. als didaktisches Lehrmittel.

¹⁹⁵ Diese Methode ist für durchschnittliche Simulations-Anwender wegen der erforderlichen statistischen Kenntnisse nicht geeignet. Auch im Hinblick auf eine Minimierung der Anzahl der Simulations-Läufe ist dieses Vorgehen nicht zu empfehlen.

- erfordert gute Statistikkenntnisse
- Ergebnis schlecht in die Praxis umzusetzen
- geringe Effizienz

7.5.4 Voll- und teilfaktorielles Versuchsplanung

Aus Gründen der oben genannten Defizite wurde die Grundidee zur Theorie faktorieller Versuche bzw. Mehrfaktoren-Versuche entwickelt. Bei diesen Versuchen wird die Wirkung mehrerer Faktoren gleichzeitig untersucht.¹⁹⁶

In der Theorie faktorieller Versuche geht es u.a. um die günstigste Wahl von Faktorstufen und Stufenkombinationen (Versuchspunkten), so dass die interessierenden Grössen (Ziel-, Kontroll-Grössen) geschätzt werden können. Daher betrachtet man in diesem Zusammenhang nur konkrete numerische (quantitative) und boolesche (qualitative) Einflussfaktoren (Stell-Grössen), also Faktoren mit vorgegebenen (nicht zufälligen, stochastischen) Stufen.¹⁹⁷

Versuchspläne, bei denen mehrere Faktoren je Versuch verändert werden, haben im Vergleich zu One by One-Versuchen folgende Vorteile¹⁹⁸:

- Die Schätzung einer Wirkung bei Versuchen mit mehreren Faktoren ist über den ganzen Bereich für alle Kombinationen mit sämtlichen Wirkungen gültig. Bei One by One-Versuchen gilt die Wirkung nur bei jeweils einer einzigen Stufe der anderen Faktoren.
- Nur die Methode für mehrere Faktoren zeigt die Wechselwirkungen auf.
- Für die gleiche Genauigkeit bei Aussagen zu den einzelnen Wirkungen lässt sich bei fehlerbehafteten Modellen zeigen, dass derartige Pläne weniger Versuche benötigen als zum Vergleich mit der One by One-Methode nötig sind.

Kurzbewertung	<ul style="list-style-type: none"> + etabliertes Verfahren in diversen Einsatzgebieten + explizite Berücksichtigung der Wechselwirkungen + gut reproduzierbar + gute Chance für Parameter-Optimierung + sehr gute Effizienz bei teilfaktoriellen Versuchsplänen
---------------	--

Der Entwurf von Versuchsplänen mit mehreren Faktoren zeigt klare Vorteile, die mit der Anzahl der Faktoren noch zunehmen. Durch eine orthogonale Systematik der Versuchspläne lässt sich erreichen, dass jeder Versuchspunkt zum Berechnen aller Wirkun-

¹⁹⁶ Vgl. RASCH et al 92, S. 45.

¹⁹⁷ Vgl. RASCH et al 92, S. 46.

¹⁹⁸ Vgl. RIPPIN 91, S. 4.12 f.

gen benutzt wird. Diese mehrfache Nutzung aller Ergebnisse erzielt bei gegebenem Aufwand die bestmögliche statistische Absicherung der Ergebnisse. ¹⁹⁹

Orthogonale Versuchsanordnungen

Bei statistischen Versuchsplänen basiert die Versuchsanordnung der Faktorstufen auf den Tafeln von YATES und ist orthogonal ²⁰⁰, das bedeutet, die Anzahl der Stufenkombinationen (+1, -1) ist in jeder Spalte des Plans gleich oft angeordnet, und das Produkt von je zwei Spalten ergibt immer 0. Eine entsprechende Anordnung ist folglich immer im paarweisen Gleichgewicht. Man spricht auch von ausbalancierten oder ausgewogenen Versuchsplänen. Diese Eigenschaft ermöglicht es, die Auswirkung jedes Faktors und jeder berücksichtigten Wechselwirkung in gleicher Weise zu analysieren, dies unabhängig davon, ob es sich um voll- oder teilfaktorielle ²⁰¹ Versuchspläne handelt. ²⁰²

Neben den oben erwähnten Arten zur Versuchsdurchführung gibt es noch eine Vielzahl spezieller Verfahren bzw. Versuchspläne, auf die hier nicht eingegangen wird.

Im folgenden Kapitel wird die voll- und teilfaktorielle Versuchsplanung in orthogonalen Anordnungen am Beispiel von Faktoren mit je zwei Stufen vertieft und für die Integration in die Simulations-Anwendung angepasst. Durch den Wegfall gewisser Hauptprinzipien der statistischen Versuchsplanung ²⁰³ vereinfachen sich die Versuchspläne enorm. Erhalten bleibt primär die Systematik der Versuchsplanung und die darauf basierende Auswertungsmethodik.

7.6 2ⁿ-VERSUCHSPLAN

2ⁿ-Versuchsplan (2ⁿ-Design) ist eine klassische und weit verbreitete Methode zur Festlegung der erforderlichen Experimente in der statistischen Versuchsführung. Diese Methode geht, wie bereits geschildert, auf R. A. FISHER zurück. Sie ist ein Spezialfall der allgemeinen faktoriellen Versuchsplanung.

Die Eigenheit dieser Methode liegt darin, dass alle relevanten Variablen (Faktoren) im einfachsten Fall je zwei Stufen (zu untersuchende Werte) haben, die einen Bereich

¹⁹⁹ Vgl. KLEPPMANN 92, S. 90 nach BOX G.E.P., HUNTER W.G., HUNTER J.S. aus "Statistics for Experiments", John Wiley & Sons, New York, 1979.

²⁰⁰ Der Begriff der Orthogonalität stammt aus der Matrizenrechnung. Zwei Vektoren eines euklidischen Vektorraumes heißen "orthogonal" genau dann, wenn das Skalarprodukt Null ist. Ein Orthogonalsystem von Vektoren liegt genau dann vor, wenn der Nullvektor nicht enthalten ist und die Vektoren paarweise orthogonal sind. Vgl. BRONSTEIN I.N., SEMENDJAJEW K.A. "Taschenbuch der Mathematik", 21. Auflage, Frankfurt, 1981 S. 155.

²⁰¹ Vgl. auch Abschnitt Nr. 7.6.3 "Reduktion und Vermengung von Versuchsplänen".

²⁰² Vgl. auch BRUNNER 89, S. 340.

²⁰³ Vgl. Kapitel Nr. 7.4 "Generelle Prinzipien der Versuchsplanung".

(Intervall) abdecken bzw. abgrenzen. Diese Vereinfachung geht von einer linearen Abhängigkeit zwischen einer Ziel-Grösse und den jeweils zwei Faktorwerten aus²⁰⁴. Werden für alle n Faktoren zwei Stufen untersucht, so spricht man von einem vollständigen Versuchsplan mit 2^n Versuchen. Daraus lassen sich Einflüsse für die Faktoren und die Faktorkombinationen ableiten. Bei vollständigen Versuchsplänen verdoppelt sich bei je zwei Faktorstufen die Anzahl der notwendigen Versuche mit jedem zusätzlichen Faktor.

Das 2^n -Design ist eine effiziente Methode, um²⁰⁵

- Faktoren nach ihrem Einfluss zu selektieren,
- Wechselwirkungen aufzuzeigen, sowie um
- Aussagen über Betrag und Wirkrichtung von Faktoren innerhalb eines Intervalls zu erhalten (Trend).

7.6.1 Aufbau von vollständigen 2^n -Versuchsplänen

Bei faktoriellen Versuchsplänen handelt es sich um quadratische Matrizen von der Grösse $2^n \cdot 2^n$. Die Zeilen werden von oben nach unten fortlaufend numeriert. Sie entsprechen den einzelnen Versuchspunkten. Die Spalten enthalten die Einstell-Faktoren und deren Komplexe²⁰⁶.

Für die Spalten werden, angefangen von links nach der Basis, einzeln die Bezeichnungen der Faktoren aufgetragen. Doppelt auftretende Faktoren sind im Vorfeld zu eliminieren. Die Basis ergibt nach der Durchführung den Bezugspunkt (Arbeitspunkt) für die Ergebnisse. In der Literatur wird die Basis häufig weggelassen, dadurch ist die Matrix nicht mehr quadratisch. Das Fehlen der Basis ergibt Schwierigkeiten, wenn nachträglich zusätzliche Faktoren beaufschlagt werden und in die bestehenden Versuche integriert werden sollen (erfolgt durch Matrizenmultiplikation).

Die zwei Stufen eines jeden Faktors werden in der Matrix durch "+1" (1) bzw. "-1" repräsentiert²⁰⁷. Welcher Wert wie zugeordnet wird, ist nicht von Relevanz, da es sich um

²⁰⁴ Um nichtlineare Zusammenhänge aufzuzeigen, bedarf es zusätzlicher Versuche innerhalb des Intervalls. Diese können bei Bedarf punktuell durchgeführt werden. Von einer generellen Verwendung von m^n -Versuchsplänen mit "m" grösser gleich "3" wird im Zusammenhang mit der Simulation, wie sie hier behandelt ist, abgeraten. Siehe auch Abschnitt Nr. 7.6.2 "Null-Versuch".

²⁰⁵ Vgl. auch ITT 87, S. 1.

²⁰⁶ In der Matrix haben die komplexen Grössen keinen direkten Einfluss auf die Faktoren des Versuchs. Sie dienen "nur" der Auswertung (siehe Abschnitt 7.6.2 "Null-Versuch").

²⁰⁷ In manchen Fällen sind die Stufen auch durch die Zahlen "1" für "-1" (niedrig) und "2" für "+1" (hoch) repräsentiert. Diese Art der Benennung ist ohne inhaltliche Bedeutung.

einen symmetrischen Versuchsaufbau handelt ²⁰⁸. Wichtig ist es, die Matrix so zu füllen, dass alle Kombinationen vorkommen und keine doppelt ist.

Die Wechselwirkung zweier und mehrerer Effekte (Faktoren) wird rechts, anschliessend an die singulären Faktoren, in den Spalten eingetragen. Die Wechselwirkung zweier Effekte ergibt sich aus dem formalen Produkt der einzelnen Repräsentanten der Faktorstufen, den Faktoren.

Es bleibt festzuhalten: Komplexe Einflüsse ab drei und mehr Faktoren sind grafisch nicht mehr darstellbar und auch gedanklich nur schwer nachzuvollziehen.

Jede Zeile des unten abgebildeten Versuchsplanes stellt eine konkrete Versuchsanordnung bzw. -kombination mit den entsprechenden Faktoreinstellungen dar. Das Einzelergebnis (engl. Yield) ist der dabei erhaltene Wert. Es können bei jeder Versuchsdurchführung parallel verschiedene Reihen von Einzel-Ergebnissen (Y1 bis Yn) erfasst und anschliessend separat ausgewertet werden. ²⁰⁹

	Faktoren			Komplexe					Einzel-Ergebnis
Nr.	Basis	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Y1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	
5	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	

Tabelle 17: Vollständiger Versuchsplan 2^n ($n = 3$)

7.6.2 "Null" -Versuch

Der Null-Versuch untersucht die Mitte eines 2^n -Versuchsfeldes. Die Faktorstufen sind in diesem Fall alle genau in der Mitte zwischen der Stufe "-1" und der Stufe "+1" angeordnet

²⁰⁸ In der Regel wird wegen der Uebersichtlichkeit der grössere Wert "+1" und der kleinere "-1" zugeordnet.

²⁰⁹ Ein gutes Beispiel zur allgemeinen Vertiefung der 2^n -Versuche mit ausführlicher Diskussion findet sich in LINDER 53, S. 79 - 86.

(Symmetrie ist Voraussetzung). Ist der Null-Versuch fester Bestandteil der Versuche, so spricht man auch von 2^{n+1} -Versuchsplänen.

Der Null-Versuch erlaubt folgende zusätzliche Vereinfachungen und Erkenntnisse:

- Versuchsreihen mit jeweils drei Wertestufen (3^n -Versuche) können, wenn die Faktoren zum mittleren Wert symmetrisch sind, gut durch 2^{n+1} -Versuche angenähert werden. Daraus ergibt sich eine wesentliche Reduktion der notwendigen Versuche im Vergleich zu 3^n -Versuchen. Diese Reduktion ist mit einem kleinen Verlust an Erkenntnissen verbunden und dient der Effizienzsteigerung der Simulations-Anwendung.
- Ein 2^n -Versuch (ohne Null-Versuch) interpretiert alle Beziehungen als Geraden. Der Null-Versuch stellt fest ob die Zielfläche (vgl. Bild Nr. 15) eine Wölbung aufweist. Durch die Ergebnisdifferenz des Mittelwertes der Einzelversuche einer Versuchsreihe mit dem Ergebnis des Null-Versuches ergeben sich Aussagen über die Wölbung ²¹⁰ der Zielfläche im Raum. Sind alle signifikanten Einflüsse nur Hauptwirkungen der Faktoren, so ist die Zielfläche eben evtl. windschief und damit die Differenz (Wölbung) vernachlässigbar. Andererseits deutet eine signifikante Differenz auf Wechselwirkungen (komplexe Wirkzusammenhänge) hin ²¹¹.
- Im Zusammenhang mit der Ermittlung einer optimalen Parameter-Kombination hilft der Null-Versuch die Suchrichtung festzulegen und/oder den Suchbereich einzuzugrenzen. Konkret geschieht dies durch die Halbierung der Faktor-Stufen und der damit verbundenen Möglichkeit, rechnerisch durch Differenzbildung zusätzliche und feiner segmentierte Steigungsabschnitte zu erhalten. Der Einbezug des Null-Versuches verkürzt somit die Zeit der Suche nach den Parameter-Optima.

Die Information über die partielle Steigung und Wölbung ist ein ausschlaggebendes Kriterium bezüglich der Fortsetzung von Versuchen mit anderen Wertestufen z.B. zur genaueren Diagnose der Wölbung. Die Weiterführung kann eine Unterteilung oder eine Ausweitung des untersuchten Intervalls beinhalten.

Aus den oben geschilderten Vorteilen des Null-Versuches sollte dieser, bei der faktoriellen 2^n -Versuchsplanung für die Simulation, immer integriert sein.

Anwender, die nur Versuche mit weniger als 5 Faktoren bearbeiten werden, können den folgenden Abschnitt über Reduktion und Vermengung übergehen. Dies hat für das Verständnis folgender Abschnitte und Kapitel keine Auswirkung.

²¹⁰ Eine Wölbung bedeutet, dass auch nicht lineare Wirkungen vorhanden sind.

²¹¹ Vgl. ITT 87, S. 17.

7.6.3 Reduktion und Vermengung von Versuchsplänen

Bei einer grossen Anzahl von Faktoren ist es oft unmöglich oder nicht sinnvoll, alle Stufenkombinationen eines Versuchsplanes zu überprüfen. Bei mehr als 4 oder 5 Faktoren wird üblicherweise mit reduzierten Versuchsplänen gearbeitet. Als Beispiel wären bei acht Faktoren mit je zwei Stufen für einen Vollversuch $2^8 = 256$ Einzelversuche notwendig. Reduzierte Versuchspläne entstehen, indem im Versuchsplan komplexe, zu vernachlässigende Faktorkombinationen (Wechselwirkungen) spezifisch durch weitere, neue unabhängige Faktoren (auch mit je zwei Stufen) ersetzt werden²¹². Mit jedem Ersetzen halbiert sich die Anzahl der Versuche. Dieses Ersetzen ist notwendig, da in einer bestimmten 2^n -Matrix einer vorgegebenen Dimension (d.h. Anzahl der Versuche) keine Spalten mehr für zusätzliche Faktoren angeführt werden können, welche von (zu) den bestehenden linear unabhängig (orthogonal) sind.

Dabei wird zugunsten der geringeren notwendigen Anzahl von Versuchen eine Ungenauigkeit in Kauf genommen. Es entsteht eine sogenannte Vermengung (confounding), die zu Fehlern in den Ergebnissen führt. Unter Vermengung versteht man, dass im Versuchsplan vorhandene Komplexe durch zusätzliche Faktoren ersetzt werden. Dabei bleiben die betroffenen Spalteninhalte bestehen. Als Konsequenz steht die betroffene Spalte gleichzeitig für den neuen Faktor sowie für die ursprüngliche Komplexe, d.h. Ergebnisse können nicht mehr eindeutig zugeordnet werden (Fehler). Durch die Logik (Verknüpfung) eines faktoriellen Versuchsplanes entstehen auch bei weiteren Spalten (indirekt betroffen) zusätzliche Vermengungen. Zur weiteren Erklärung sei auf das Beispiel weiter unten im Text verwiesen.

In einem "vermengten Versuchsplan" verlieren alle ausgewiesenen Effekte an Eindeutigkeit, das bedeutet, je mehr Faktoren in einen Plan gepackt werden, um so vieldeutiger sind die ausgewiesenen Effekte. Damit steigt die Möglichkeit von Fehldeutungen²¹³. Durch gute Kenntnis der Theorie lässt es sich teilweise steuern, wo diese Fehler (Ungenauigkeiten) auftreten sollen bzw. dürfen. Allgemein wird als Rechtfertigung für eine gezielte Reduktion des Versuchsumfanges (kleinere Anzahl Versuche) angeführt, dass der erfassbare Aussagewert von höheren komplexen Wirkzusammenhängen (grösser, gleich drei) gering ist²¹⁴. Tatsächlich sind i.d.R. die Stärken der Einflüsse höherer Wechselwirkungen eher klein. Weiter sind sie gedanklich und anschaulich schwer zu erfassen. Ihre Wirkstärken (und Richtungen) haben einen direkten, linearen Einfluss auf die sich erge-

²¹² Das Ersetzen von Faktorkombinationen ist nicht unproblematisch. Trotz guter Kenntnis der Praxis werden Wechselwirkungen oftmals verkannt. Es ist besser, die Anzahl der Ausgangs-Variablen, wie in Kapitel 6. "Parameter-Reduktion" beschrieben, weitestgehend im Vorfeld zu reduzieren. Eine mögliche Vermengung kann aus der Abhängigkeitsmatrix (Abschnitt Nr. 6.2.4) abgeleitet werden.

²¹³ Vgl. KAPFER 92, S. 65.

²¹⁴ Vgl. auch LINDER 53, S. 104 und S. 125.

benden absoluten Fehler. Für eine Signifikanz des relativen Fehlers ist eine statistische Ueberprüfung notwendig ²¹⁵.

Zusammenfassend gilt: Durch die Reduktion des Versuchsplanes sind gewisse Aussagen bzw. Ergebnisse mit einem Fehler behaftet.

	Faktoren			Komplexe					Einzel-Ergebnis
Nr.	Basis	A	B	C	D	E	BC	BE	Y1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	
5	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	
Null-V.	1	0	0	0	0	0	0	0	

Tabelle 18: Beispiel eines reduzierten Versuchsplanes 2^{n-k} mit Null-Versuch ($n = 5, k = 2$)

Anhand eines Beispiels (vgl. Tabelle Nr. 18) soll dem Leser gezeigt werden, wie man Vermengungen identifiziert. Dabei wird von dem Versuchsplan in Tabelle Nr. 17 ausgegangen. Die Faktoren und Komplexe der Tabelle sind in der ersten Spalte der Tabelle Nr. 19 zu finden. Ausgehend davon sollen zwei Komplexe (z.B. AB und AC) mit den zusätzlichen Faktoren "D" und "E" vermengt werden. Im Beispiel ist das Ergebnis von "D" unter anderem mit dem komplexen Einfluss von "AB" vermengt. Ein Vergleich der Spalte "AB" von Tabelle Nr. 17 (ursprünglicher Versuchsplan) mit der Spalte "D" Tabelle Nr. 18 (reduzierter Versuchsplan) zeigt, dass die Spalten identisch sind.

²¹⁵ Für die Simulations-Anwendung ist diese Signifikanz, bedingt durch die Planungs- und Modellierungs-Qualität, von untergeordneter Bedeutung. Als Vertiefungsbeispiel vgl. LINDER 53, S. 126 ff.

gem. Tab. Nr. 17	1. Substitution	2. Substitution	
Spalte + Zeile	1. Generator ABD	2. Generator ACE	Generatorprodukt ABD * ACE = BCDE
A	BD	CE	ABCDE
B	AD	ABCE	CDE
C	ABCD	AE	BDE
AB	D	BCE	ACDE
AC	BCD	E	ABDE
BC	ACD	ABE	DE
ABC	CD	BE	ADE

Tabelle 19: Identifikation der Vermengung am Beispiel eines reduzierten Versuchsplanes 2^{n-k} ($n = 5, k = 2$)

Die erste Spalte in Tabelle Nr. 19 entspricht den Bezeichnungen in Tabelle Nr. 17. Die markierten Faktoren bzw. Faktorkombinationen finden sich nach der Vermengung in Tabelle Nr. 18.²¹⁶

Vorgehen zur Identifikation von Vermengungen, anhand der Tabelle Nr. 19:

1. Die ursprünglichen Faktoren und ihre Komplexe, gemäss Tabelle Nr. 17 werden in der ersten Spalte aufgetragen ($2^3, n = 3 \rightarrow A B C$, Faktoren mit ihren Komplexen).
2. Wir legen fest, dass als erstes "AB" durch "D" ersetzt werden soll. Daraus lässt sich der 1. Generator als "ABD" bilden. Die Bedingung dafür ist, dass "AB" (die Zeile) * dem 1. Generator = "D" ist. Quadratische Terme ($-1^2, +1^2$) sind immer 1 und fallen dabei weg. $\rightarrow A B \cdot A B D = A^2 B^2 D^1 = D$.
3. Anschliessend lassen sich mit dem 1. Generator, durch Multiplikation der restlichen Glieder der ersten Spalte, alle fehlenden Faktoren und Faktorkombinationen der zweiten Spalte berechnen. Quadratische Terme fallen wie oben für die weitere Betrachtung weg.
4. Als nächstes soll z.B. "AC" durch "E" ersetzt werden. Der Ablauf ist analog wie für "D".

²¹⁶ Die Vermengung hat nicht nur direkte Auswirkungen in den Kolonnen in denen neue Faktoren eingebracht werden, sondern alle Kolonnen mit Faktoren und Komplexen sind wegen des wechselseitigen Verbundes betroffen (vgl. Tabelle Nr. 19, Spalten 2 - 4).

5. Zum Schluss sind die Generatoren miteinander zu multiplizieren. Im Beispiel der 1. mit dem 2. Generator. Dann wird jedes Element der ersten Spalte mit dem Generatorprodukt multipliziert, um auch die indirekt entstandenen Vermengungen zu erhalten.

Bei drei Generatoren sollten analog folgende Produkte gebildet werden: $1. * 2.$, $1. * 3.$, $2. * 3.$ und $1. * 2. * 3.$. Dabei müssen jeweils alle Generatoren und auch ihre Produkte verschieden (linearunabhängig) von den bereits existierenden sein. Um das zu erreichen, müssen immer alle möglichen Produkte gebildet werden, bevor ein zusätzlicher Generator gebildet bzw. hinzugefügt wird.

Im gezeigten Beispiel ist $k = 2$, d.h., dass 4-mal (2^2) mehr Versuche für einen vollständigen Versuchsplan nötig wären. Daraus folgt, jeder ausgewiesene Faktor repräsentiert insgesamt vier Faktoren bzw. Kombinationen. Die Aussagen aus einem entsprechend reduzierten Versuch sind durch einen nicht quantifizierbaren Fehler behaftet.

In unserem Beispiel treten somit folgende Vermengungen auf:

Faktor "A"	beinhaltet die Wirkungen von	"A	BD	CE	ABCDE"
Faktor "B"	beinhaltet die Wirkungen von	"B	AD	ABCE	CDE"
Faktor "C"	beinhaltet die Wirkungen von	"C	ABCD	AE	BDE"
Faktor "D"	beinhaltet die Wirkungen von	"AB	D	BCE	ACDE"
Faktor "E"	beinhaltet die Wirkungen von	"AC	BCD	E	ABDE"
Faktor "BC"	beinhaltet die Wirkungen von	"BC	ACD	ABE	DE"
Faktor "BE"	beinhaltet die Wirkungen von	"ABC	CD	BE	ADE"

Soll nur eine Faktorkombination durch einen zusätzlichen Faktor ersetzt werden, so empfiehlt es sich, die Komplexe mit den meisten Faktoren zu ersetzen. Dadurch wird z.B. bei einem 2^{4-1} -Versuchsplan erreicht, dass primäre Faktoren nur mit vierfach kombinierten Komplexen vermengt sind. Dabei sind die zweifachen mit den dreifachen Komplexen vermengt. Eine derartige Versuchsanordnung führt i.d.R. zu einer Fehlerminimierung für die primären Faktoren. Diese Empfehlung gilt nur für diesen Spezialfall. Weitere Fälle sind spezifisch zu untersuchen ²¹⁷.

²¹⁷ Sollen mehrere Spalten optimal durch zusätzliche Faktoren ersetzt werden, so erfordert dies ein gründliches Studium der konkreten Fragestellung und der Versuchsplanung. Als Unterstützung dazu sei der Zeitschriftenartikel "Hilfen für die statistische Versuchsplanung", Teil 3 von NEDESS C. und HOLST G. (in *Qualität und Zuverlässigkeit* Jahrgang 37, Heft 3, Carl Hanser-Verlag, München, 1992, S. 202 - 204) empfohlen.

7.6.4 Auswertung von 2^n -Versuchen

Das der Auswertung zugrunde liegende Beispiel ist in Anhang Abschnitt Nr. 3. kurz beschrieben.²¹⁸

Die Auswertung erfolgt bei vollständigen und reduzierten Versuchsplänen im Prinzip analog.²¹⁹

Für die Interpretation des Null-Versuches (Null-V.) siehe den Abschnitt Nr. 7.6.2 "Null-Versuch".

Nr.	Faktoren			Komplexe					Einzel-Ergebnis
	Basis	A	B	C	D	E	BC	BE	Y1 ...
1	1	1	1	1	1	1	1	1	100 %
2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	98 %
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	96 %
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	86 %
5	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	99 %
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	100 %
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	69 %
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	96 %
Ergeb.	93.0	2.0	6.3	2.0	2.3	5.0	2.3	4.3	(**)
Null-V.	1	0	0	0	0	0	0	0	100 %

Tabelle 20: Beispiel eines reduzierten Versuchsplanes 2^{n-k} mit Ergebnissen und Null-Versuch ($n = 5$, $k = 2$)

Die Ergebniszeile errechnet sich wie folgt (**) (Beispiel siehe Tabelle Nr. 20): Die Einzel-Ergebnis-Spalte (Y1) wird mit der jeweiligen Faktor- bzw. Komplexe-Spalte zeilenweise multipliziert. In der jetzt erhaltenen Spalte werden die Zeilen addiert und die Summe durch die Versuchszahl dividiert (Durchschnittsbildung). Als weitere Vereinfachung kann der

²¹⁸ Zur Vertiefung vgl. SCHMIDHEINY et al 93, S. 22 ff.

²¹⁹ Die Aussagen sind aber bei den reduzierten Versuchsplänen mit Fehlern behaftet (siehe Abschnitt Nr. 7.6.3 "Reduktion und Vermengung von Versuchsplänen").

absolute Betrag aus den errechneten Spalten-Durchschnitten in der Ergebniszeile festgehalten werden ²²⁰.

Das Ergebnis in der Basisspalte ist der Durchschnitt aus den Einzel-Ergebnissen (Y1) und markiert den Arbeitspunkt bzw. Untersuchungspunkt der Versuchsreihe. Die anderen Ergebnisse zeigen den relativen Einfluss bzw. Trend (Steigung), bezogen auf die Mitte des Versuchsfeldes und das durchschnittliche Einzel-Ergebnis (Untersuchungspunkt). Je grösser diese Werte sind, desto stärker ist der Einfluss des betroffenen Faktors. Dieses gilt analog auch für die komplexen Faktoren.

Die absoluten Ergebnisse je Faktor bzw. Faktorkombination (mittlere Steigung bezogen auf die Basis) sollten einer ABC-Analyse unterzogen werden, um die Verwendung auf die entscheidenden Schlüsselfaktoren zu konzentrieren. Die Rangfolge zeigt dabei die abnehmende Signifikanz auf die jeweilige Ziel-Grösse und hilft dadurch, wesentliche von unwesentlichen Faktoren (Stell-Grössen) zu trennen.

In einem Versuch können mehrere Einzel-Mess-Ergebnisreihen Y1 auch Y2 bis Yn parallel erfasst werden. Ebenso sind mit der Auswertung von 2^n -Versuchen keine bestimmten Messreihen verknüpft, so dass die parallel erfassten Ergebnisreihen (ohne Zusatzversuche) unabhängig voneinander auswertbar sind!

Der volle Versuch wurde im Rahmen eines Projektes durchgeführt. Siehe Modell-Beschreibung im Anhang Abschnitt Nr. 3. unter der Rubrik "Theodoliten-Marktversorgung". Dort befindet sich zum Vergleich mit Tabelle Nr. 20 der vollständige Versuchsplan mit $2^n = 32$ Versuchen inkl. der Auswertung aller komplexen Wirkungen, ohne die sich durch die Reduktion ergebenden Fehler. Als konkreten Vergleich für die Fehler, die sich aus einer Vermengung ergeben, sind zum oben behandelten Beispiel die Ergebnisse für den vollen Versuchsplan in Tabelle Nr. 21 angegeben.

Wie aus der folgenden Tabelle ersichtlich ist, ergeben sich markante Fehler für "A" (Multiplikand 2,5) durch den Einfluss von "BD" und "CE" sowie für "BC" (Multiplikand 2,1) bedingt durch "DE".

²²⁰ Die Ergebnisse sind, da die Wertepaare frei "+1" und "-1" zugeordnet werden, immer als absolute Grössen ohne Vorzeichen zu betrachten. Für die im Zusammenhang mit dieser Arbeit gemachten Betrachtungen sind die Absolutwerte ausreichend. Andere spezielle Auswertungsarten, die in dieser Arbeit nicht näher behandelt werden, erfordern eine Ergebnisdarstellung unter Berücksichtigung der Vorzeichen.

Faktor	vermengter Versuchsplan	voller Versuchsplan
A	2,0	0,8
B	6,3	5,8
C	2,0	1,8
D	2,3	1,8
E	5,0	5,3
BC	2,3	1,1
BE	4,3	4,3
Basis	93,0	93,1

Tabelle 21: Ergebnisvergleich zwischen zweifach vermengtem und vollem Versuchsplan

Es ist zu beachten, dass alle Versuchsergebnisse immer fehlerbehaftet sind, sei es durch Messfehler, Randbedingungen, Vernachlässigungen (Modell-Reduktion) oder durch reduzierte oder falsche Versuchspläne.

7.6.5 Ergebnisdarstellung

Die Ergebniszahlen der einzelnen Faktoren und Komplexe zeigen ihren mittleren Einfluss auf das Ergebnis im Intervall $[-1,+1]$, d.h. die mittlere Steigung der Zielfläche im n-dimensionalen Parameterraum, bezogen auf die Basis (Mitte des Intervalls).

Es ist sinnvoll, die jeweiligen zwei Stufen eines Faktors symmetrisch zu einem Ursprung (Nullpunkt) anzuordnen. Wird dann als 2^n -plus-erster Versuch mit den Faktoren im Ursprung (Null-Versuch) ein Ergebnis ermittelt, lassen sich zusätzliche Aussagen über die partiellen Wölbungen (Änderung der Steigung) der Zielfläche im Raum gewinnen.

Ist der Basiswert (Durchschnittswert) identisch mit dem Wert des Null-Versuches, so handelt es sich um eine windschiefe, ebene Fläche (ohne Wölbung), d.h. die mittlere Steigung entspricht der tatsächlichen Steigung im untersuchten Intervall.

Eine 2D (dimensionale) -Darstellung von einzelnen Versuchsergebnissen ist im Bild Nr. 14 dargestellt. Zu sehen sind die mittlere Steigung von "B" und "E" sowie "BE Komplex" im Versuchsintervall. Hier im Beispiel beziehen sich die Werte auf die Lieferfähigkeit (in %) einer Distribution.

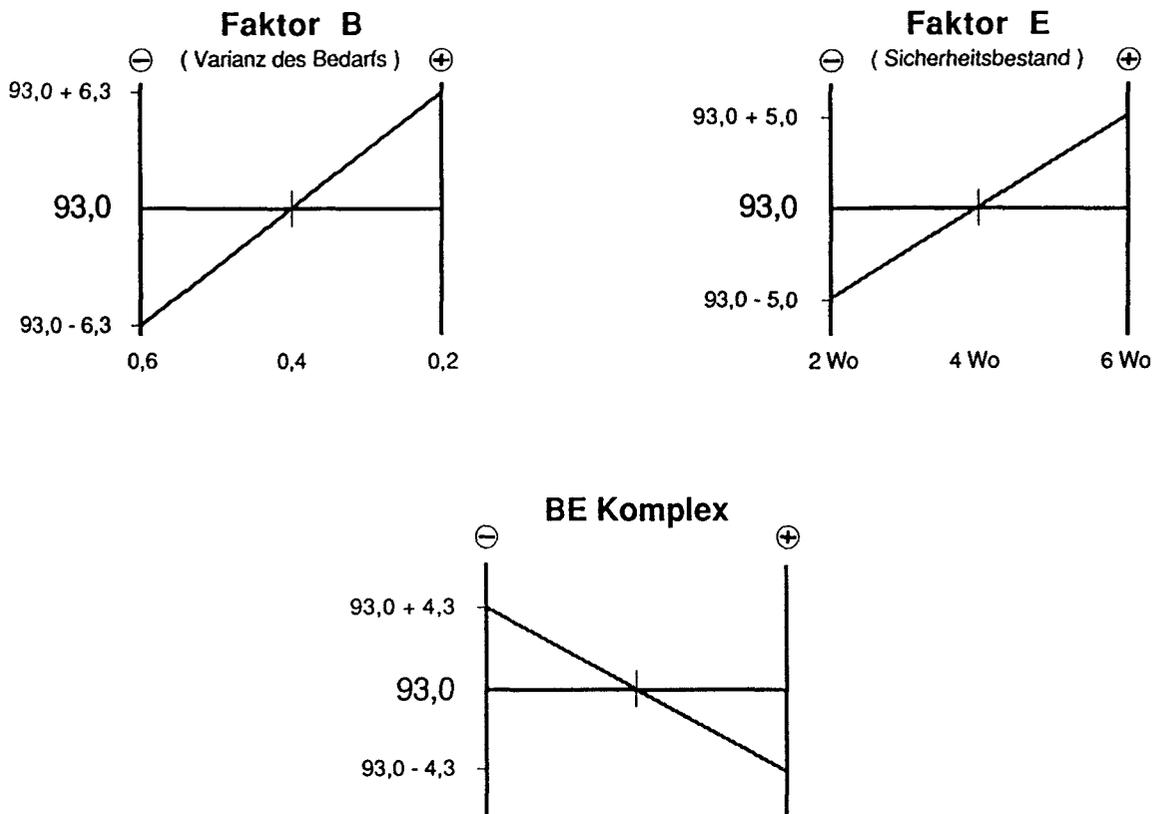


Bild 14: 2D-Darstellung der 2^n -Versuchsergebnisse für "B" mit "E" (vgl. Tabelle Nr. 20)

Zur Erstellung einer 3D-Darstellung von zwei Faktoren und des von ihnen abhängigen Ergebnisses gibt es zwei Möglichkeiten:

1. über die gefundenen Steigungen. (Dazu würden die Einflussstärken inkl. Vorzeichen benötigt. Sie wurden im vorgängigen Abschnitt bewusst weggelassen).
2. oder über die Einzelergebnisse, welche Eckpunkte des untersuchten Teils des Lösungsraumes darstellen.

Hier in dieser Arbeit wird die zweite Möglichkeit als die einfachere und anschaulichere von beiden beschrieben. Im folgenden wird direkt die Wertermittlung der Eckpunkte gezeigt²²¹. Für das Vorgehen ist es dabei nicht von Belang, ob die Anzahl der Versuche reduziert wurde oder nicht.

²²¹ I.d.R. besitzen Simulations-Anwender nicht die erforderlichen statistischen Kenntnisse. Deshalb wird in diesem Abschnitt ein gangbarer Weg zwischen den zwei Extremen vorgeschlagen.

Als erstes sind alle Spalten ausser den zwei darzustellenden Faktoren und den Einzelergebnissen zu löschen. Anschliessend sind die Zeilen nach identischen Faktorkombinationen zu sortieren. Die vier Eckpunkte für die Darstellung ergeben sich aus dem Durchschnitt der jeweiligen Einzelergebnisse. Die Abweichung der Einzelergebnisse vom Durchschnitt ist ein Mass für die Streuung in Abhängigkeit der nicht dargestellten Faktoren. Der Null-Versuch liefert einen zusätzlichen Wert und damit die Wölbung der Ergebnisfläche.

Als Beispiel wird die modifizierte Tabelle Nr. 20 und die grafische Umsetzung in Bild Nr. 15 gezeigt.

Zeilen Nr.	Faktoren		Einzelergebnisse	Durchschnitt
	B	E		
1 + 6	1	1	100 % + 100 %	100,0 %
2 + 5	1	-1	98 % + 99 %	98,5 %
3 + 8	-1	1	96 % + 96 %	96,0 %
4 + 7	-1	-1	86 % + 69 %	77,5 %
Null-Vers.	0	0	100 %	100,0 %

Tabelle 22: Beispiel eines modifizierten Versuchsplanes als Vorarbeit zu einer 3D-Darstellung

Das Bild Nr. 15 zeigt den gleichen Ausschnitt von Ergebnissen wie das vorhergehende Bild Nr. 14. Durch die 3D-Darstellung unter Einbezug des Null-Versuches ist die Wölbung der Ergebnisfläche gut sichtbar. Es ist z.B. ersichtlich, dass die theoretische Lieferfähigkeit - im gezeigten Beispiel - ab einem gewissen Bereich trotz Erhöhung des Sicherheitsbestandes nicht mehr steigt. ²²²

²²² Die komplexe Faktorkombination der zwei dargestellten Faktoren (B, E) ist in einer 3D-Darstellung enthalten. In der ersten Möglichkeit wird sie direkt verwendet, um die Steigungen zu konstruieren. Bei der zweiten, hier gezeigten einfacheren Variante findet die Steigung der komplexen Faktorkombination nur implizit Eingang.

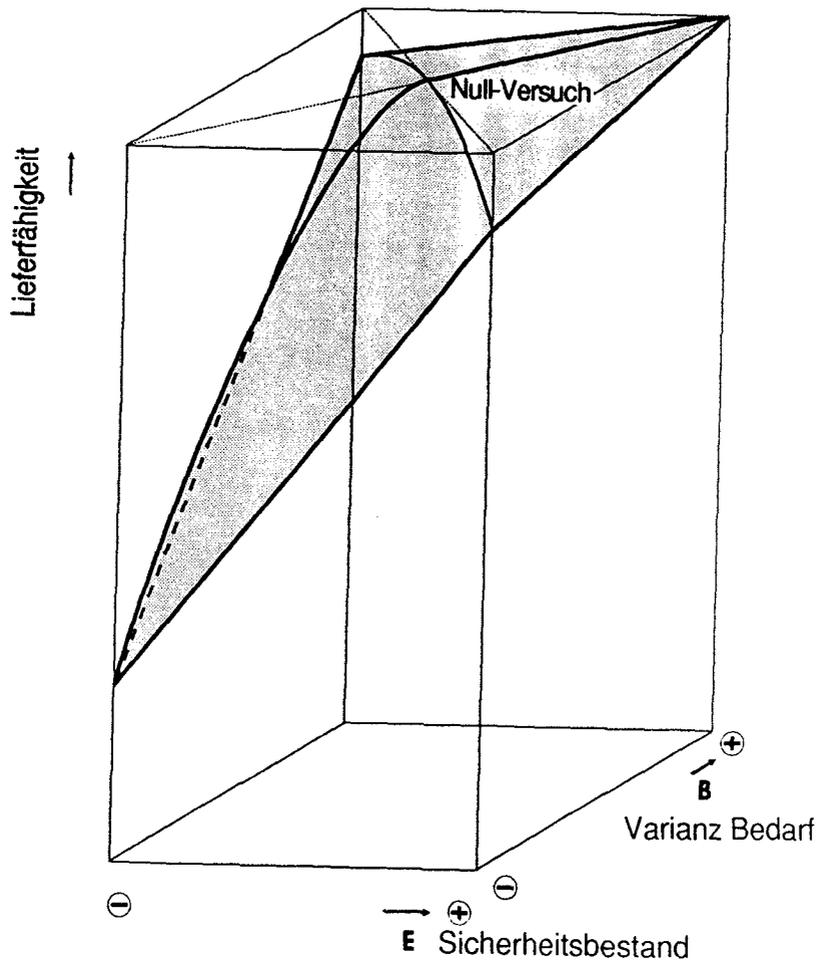


Bild 15: 3D-Darstellung von den 2^{n+1} -Versuchsergebnissen für "B" mit "E"

Neben den oben ausführlich beschriebenen 2^n -Versuchsplänen mit je zwei Faktorwerten bzw. -stufen sind auch Pläne mit mehreren Stufen möglich. Vier oder acht Stufen lassen sich auf zwei bzw. vier 2^n -Versuchspläne zurückführen. Drei Faktorstufen können oft auf einen 2^{n+1} -Versuchsplan (siehe Abschnitt Nr. 7.6.2 "Null-Versuch") reduziert werden. Allgemeine Beispiele dazu finden sich in LINDER 53, S. 91 - 104.

Für die Interpretation der realen Ergebnisse vgl. Kapitel Nr. 5. "Versuchs- und Optimierungs-Strategien" und Anhang Abschnitt Nr. 3. "Fallbeispiel: Theodoliten-Marktversorgung" sowie SCHMIDHEINY et al 93 und SCHMID 95.

7.7 VERSUCHS-STRATEGIE FÜR 2^{n+1} -VERSUCHSREIHEN

Die Versuchs-Strategie basierend auf 2^{n+1} -Versuchsreihen ist nur eine von mehreren möglichen Versuchs- und Optimierungs-Strategien zur Verbesserung von Systemen bzw. Modellen auf ein Ziel hin (z.B. Einstellwerte für Parameter).²²³

In diesem Abschnitt wird eine Integration in eine Versuchs-Strategie zu der in Kapitel Nr. 7.6 behandelten statistischen Versuchsplanung mit 2^{n+1} -Plänen aufgezeigt.

Das Vorgehen bei der Anwendung von faktoriellen Versuchsplänen in der Simulation wird im folgenden Bild dargestellt und anschliessend kommentiert.²²⁴

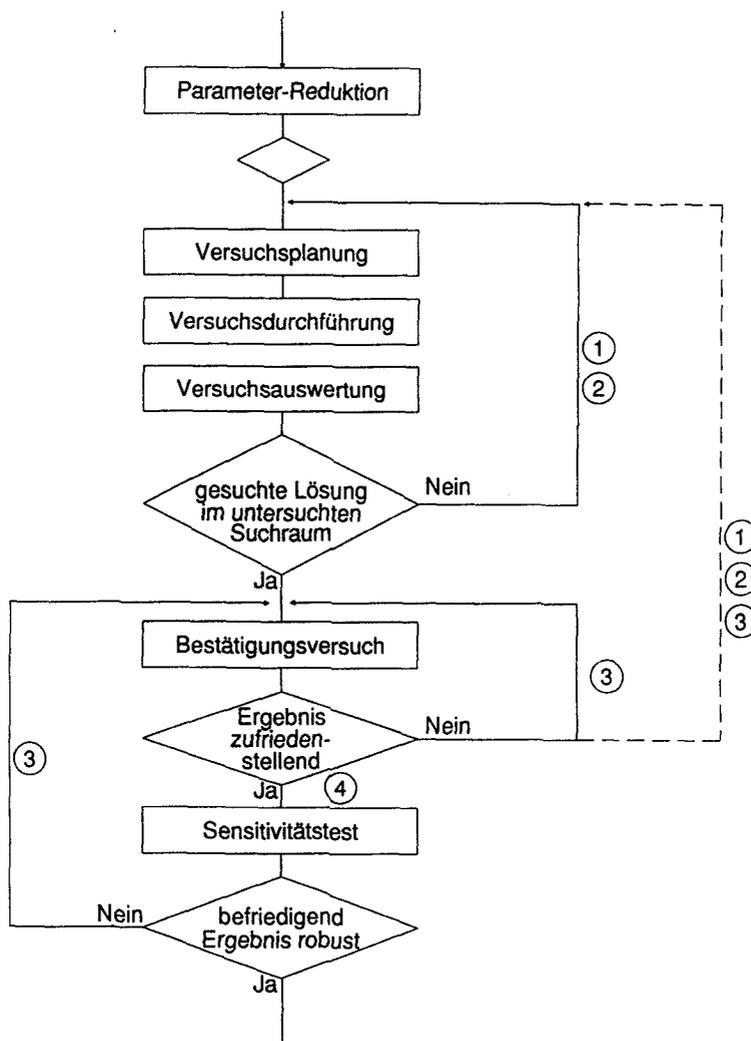


Bild 16: Versuchs-Strategie für 2^{n+1} -Versuchsreihen

²²³ Vgl. auch Kapitel Nr. 5. "Versuchs- und Optimierungs-Strategien", sowie Abschnitt Nr. 4.3.2 "Optimierung der Lösungsvariante".

²²⁴ Vgl. auch Kapitel Nr. 7.3 "Vorgehen bei der Versuchsdurchführung".

Erklärungen zu Bild Nr. 16 Versuchs-Strategie für 2^{n+1} -Versuchsreihen (Ziffern entsprechen denen im Bild):

- 1 **Stellt man nach Abschluss der Versuchs-Auswertung fest, dass der zu untersuchende Lösungsraum für eine Versuchsreihe zu klein bzw. zu gross gewählt wurde, dann muss eine weitere Versuchsreihe definiert und durchgeführt werden.
Werden bei symmetrischen 2^n -Versuchsanordnungen die Abstände vom Null-Punkt halbiert oder verdoppelt, dann erhält man aus den zwei 2^n -Versuchsanordnungen eine 4^n -Versuchsreihe.**
- 2 **Falls der untersuchte Ausschnitt des Lösungsraumes falsch plaziert wurde oder die falschen Parameter variiert wurden, muss die Versuchsreihe wiederholt werden.**
- 3 **Zur Wahl der Parameter-Werte für den Bestätigungs-Versuch gilt festzuhalten, dass mit einer zunehmenden Zahl von variierten Parametern die Lokalisierung eines "guten" Betriebspunktes für das Modell immer schwerer wird. Die Ursache liegt im mangelnden Vorstellungsvermögen von n-dimensionalen Räumen höherer Ordnung.**
- 4 **Es ist wichtig, dass für jede mit einer diskreten Simulation gefundenen Lösung Sensitivitätstests durchgeführt werden.** ²²⁵

Bei Bedarf lassen sich einzelne Faktoren - im Anschluss zur 2^n -Versuchsreihe - gemäss dem konventionellen Vorgehen (One by One) über zusätzliche Wertestufen simulieren, um z.B. eine spezifische Nichtlinearität (Wölbung) oder eine Sensitivität der Lösungsebene genauer zu erfassen.

Die im Bild Nr. 16 gezeigte Versuchsstrategie - bezüglich Vorgehen und Ueberlegung - gilt analog auch für andere Arten von Versuchsplanungen.

²²⁵ Vgl. Kapitel Nr. 3.2 "Qualitätssicherung".

8. HEURISTISCHE OPTIMIERUNG DER LÖSUNGSSUCHE

Dieses Kapitel behandelt die heuristische Optimierung der Lösungs-Suche mit Hilfe der Simulation. Bei der hier behandelten heuristischen Optimum-Suche stehen die Simulations-Methode, -Effizienz der Anwendung und die Qualität der Aussagen im Vordergrund. Dieses Kapitel bildet neben dem Kapitel Nr. 4. "Konzeption einer Vorgehensmethode" und dem Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode" einen weiteren Baustein zur Steigerung der Simulations-Effizienz.

Für das Verständnis wird das Kapitel Nr. 6. "Parameter-Reduktion", inkl. Definitionen vorausgesetzt.

Die ersten Ausarbeitungen (1989/90) zu dem im Kapitel Nr. 8. beschriebenen Such-Konzept erfolgten im Rahmen einer unveröffentlichten studentischen ABB-Studie, die unter dem Titel "Methode zur schnellen Optimierung bei der digitalen Simulation" erstellt wurde ²²⁶. Einzelne Teile des Textes wurden daraus entnommen.

8.1 PROBLEMSTELLUNG

Die Methoden des Operations Research (OR), die bei verschiedensten Entscheidungsfindungen eine wertvolle Hilfe leisten, umfassen nicht nur mathematisch exakte Optimierungsalgorithmen, sondern bedienen sich in Anbetracht der steigenden Komplexität der Systeme (mit Randbedingungen) und Entscheidungssituationen auch zunehmend sub-optimierender Methoden, wie z.B. Heuristiken. Dank der grossen Fortschritte auf dem Gebiet der Computertechnologie bieten Lösungsverfahren auf heuristischer Basis folgende Vorteile:

- Eignung zur Lösung unstetiger Probleme
- gutes Kosten/Nutzen-Verhältnis
- hohe Akzeptanz bei den Entscheidungsträgern

Eine Bedingung des OR für die Optimierungsstrategie durch Heuristiken sagt aus: Jeder Versuch muss mindestens besser oder gleich gut wie sein Vorgänger sein.

Wäre das so einfach möglich, würde das Finden eines Optimums mit Hilfe der Simulation eine reine Frage der Anzahl der Versuche, und man müsste dazu auch keine speziellen (Such-) Strategien entwickeln. Dem ist leider nicht so.

Unvollständige Informationen über die komplizierten Zusammenhänge und Wechselwirkungen von z.B. dynamischen Produktionsprozessen erschweren die Suche nach einem

²²⁶ Vgl. WINTERGERST 91.

Optimum. Daher bedient man sich gezwungenermassen vermehrt einer Black Box-Betrachtungsweise ²²⁷, die sich als hilfreich erwiesen hat.

Dieser Ansatz, der im Bereich der empirischen Wissenschaften eine lange Tradition hat, entspricht dem experimentellen Charakter der Simulation in hervorragender Weise. Dabei besteht nun nicht die Absicht, ein vollständiges Bild des Systems zu erhalten. Vielmehr beschränkt sich das Interesse auf die Parameter-Konstellationen, die das mehrdimensionale Zielsystem (Zielfunktion oder -raum) massgeblich beeinflussen.

Um die Zahl der Simulations-Läufe auf der Suche nach dem Optimum minimal zu halten, muss das Verfahren selbst möglichst effizient gestaltet, d.h. optimiert werden. Daraus resultiert die Forderung nach einer Hilfe zur Minimierung der Iterationsschritte und damit zur Verkürzung der Zielfindungszeit sowie einer Effizienzsteigerung der Simulation.

Dabei unterscheidet man in der Regel zwei Schritte: Die Bestimmung eines geeigneten Startpunktes für die Suche und die Festlegung der jeweils nächsten Suchrichtung ²²⁸ mit der jeweiligen Schrittweite für die einzelnen Parameter (Stell-Grössen).

Bei der Festlegung eines guten Startpunktes sind alle vorhandenen Informationen über das System so gut wie möglich auszunutzen, wobei auch die Erfahrungen ²²⁹ des Anwenders einfließen sollten.

Die sich daran anschliessende Extremwertsuche gestaltet sich oft sehr schwierig: Während man bei den sogenannten Glas Box-Problemen gute Kenntnisse über die Struktur des Systems und die Form der Zielfunktion besitzt, die das Festlegen einer neuen Suchrichtung und einer sinnvollen Schrittweite erleichtern, gewinnen bei den Black Box-Verfahren heuristische Suchstrategien zur Auswertung der Zielfunktion stärker an Bedeutung. Da es sich bei der Optimierung mit der Simulation um eine Mischform aus Black und Glas Box-Problemen handelt, wird eine optimale Suchmethode Elemente aus beiden Klassen von Lösungsverfahren enthalten.

Abgesehen von einigen Spezialfällen ²³⁰ existieren bisher keine selbstoptimierende Simulations-Verfahren. Die heute auf dem Markt erhältlichen Simulations-Pakete sind nicht selbstoptimierend, d.h., um bei wahlfreien Stell-Grössen (Input) ein "optimales" Planungsergebnis (Output) zu erhalten, ist gegenwärtig ein zeitraubender, aus der Erfahrung resultierender, iterativer Vorgang nötig.

²²⁷ Ein nicht vollständig bekanntes System wird als eine Black Box betrachtet und analysiert, indem man den Input variiert, die Veränderung des Outputs beobachtet und aus dessen Verhalten Rückschlüsse auf das System zieht. Vgl. auch WILDE 64, S. 1 ff.

²²⁸ Vgl. WERLING 90, S. 93 ff.

²²⁹ Erfahrung äussert sich in zwei Formen: Wiedererkennen von ähnlichen Sachverhalten und durch Verallgemeinerung. Gewonnen wird die Erfahrung durch die Durchführung selbständiger oder durch Dialog vermittelter Sachverhalte.

²³⁰ D.h. nur kleiner manipulierbarer Parametersatz (Stell-Grössen) mit festen Zulässigkeitsbereichen. Zudem beziehen sich die angebotenen Stell-Grössen i.d.R. ausschliesslich auf die Steuerung bzw. den Fluss und nicht auf Systemstrukturen (z.B. Anzahl oder Typus einer Maschine).

Da Optimierungs-Probleme hinsichtlich Struktur und Informationsgehalt sehr unterschiedlich sein können, müssen Optimierungs-Verfahren für die Simulations-Anwendung prinzipiell universell anwendbar sein und dabei eine gute Effizienz besitzen. Universelle Anwendbarkeit bedeutet, dass weder Einschränkungen an die Form und Gestalt des Suchraums noch an die Existenz und Form von Restriktionen bestehen ²³¹.

Basierend auf den möglichen Fragestellungen und Anwendungsbereichen ergeben sich Anforderungen an geeignete Optimierungs-Verfahren. Zunächst sollten sie direkte Verfahren sein, also allein auf der Basis von Parametervektoren und den zugehörigen Zielfunktionswerten arbeiten. Ferner sollten es globale Verfahren sein, die ein Auffinden globaler Optima wenigstens prinzipiell gewährleisten. Schliesslich sollte das Verfahren für beliebige Dimensionalitäten anwendbar sein und Restriktionen berücksichtigen. Zudem sollte das Verfahren einfach in der Handhabung sein.

Wie ein Vergleich gezeigt hat, scheitern viele der bekannten Optimierungs-Verfahren an diesen Anforderungen. ²³²

8.2 DISKRETE OPTIMIERUNG

Ein Standardproblem der Betriebswirtschaftslehre ist die Suche nach möglichst effizienten Produktionsabläufen. Wegen der Vielzahl der zu betrachtenden Parameter sowie des oft unstetigen Verlaufes der Produktion lässt sich das Problem nicht mit einfachen mathematischen Hilfsmitteln lösen, sondern erfordert den Einsatz höher entwickelter Methoden. Dabei sind in der Praxis häufig Aufgaben zu lösen, die von der Art und dem Umfang keine exakte Lösung erlauben. Man ist in der diskreten Optimierung gezwungen - falls überhaupt möglich - sich mit einer zulässigen Näherungslösung (mathematisch z.B. durch Linearisierung) oder Heuristik (mit Verfahrensregeln) zu begnügen. Die diskrete, ereignisorientierte Simulation ist in diesem Sinn eine Heuristik.

Geschlossene mathematische Optimierungs-Verfahren erfordern die Kenntnis einer Zielfunktion mit ihren analytischen Ableitungen. I.d.R. sind nur Zielfunktionswerte, nicht aber die Zielfunktion an sich, in ihrer analytischen Form bekannt ²³³. Das Herleiten einer Zielfunktion ist nur bei sehr begrenzten und häufig wiederkehrenden Problemen sinnvoll. Dies erfordert ein Mass an mathematischen Kenntnissen, die gegenwärtig in der Industrie nur noch spärlich vorhanden sind. Mathematisch geschlossene Optimierungs-Verfahren sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

²³¹ Vgl. CHEN 91, S. 202.

²³² Vgl. BÄCK HAMMEL SCHWEFEL 93, S. 51.

²³³ Vgl. SCHLOSSER 79, S. 56.

8.2.1 Optimierungs-Verfahren

Optimierungs-Verfahren lassen sich nach statischen und dynamischen Verfahren unterteilen. Werden bei einer Optimierung während eines Simulations-Laufes alle Stell-Grössen (SG) konstant gehalten, so spricht man von einer statischen Optimierung. Dynamische Optimierungs-Verfahren für die Simulation sind derzeit erst in den forschungsmässigen Anfängen. Bei ihnen wird ein optimaler Zustand über sich zeitlich ändernde Stell-Grössen angestrebt. Die Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung statischer Optimierungs-Verfahren.

Bei praktischen Problemen mit einem entsprechenden Schwierigkeitsgrad ist es sinnvoll, entweder eine optimale "fast zulässige" oder eine zulässige "fast optimale" Lösung zu suchen.²³⁴

Eine Gegenüberstellung der Begriffe "Algorithmus" und "Heuristik"²³⁵:

- Algorithmus Ein Verfahren, das die exakte Lösung (Optimum) eines gut strukturierten Problems in einer endlichen Anzahl von Schritten garantiert, wenn für das Problem eine Lösung existiert.
- Heuristik Die Anwendung von Strategien, Näherungsregeln sowie anderen Regeln, welche die Suche in grossen oder in schlecht strukturierten Lösungsräumen stark einschränken und so eine mögliche (zulässige) Lösung aufzeigen. Eine Heuristik kann auch als ein "intelligentes Herumprobieren" bezeichnet werden. Die eingeschränkte Suche garantiert keine Optimallösung. In multimodalen Lösungsräumen kann es sich bei der gefundenen Lösung auch um ein Suboptimum handeln.

Bei den methodischen Lösungsansätzen zur Optimierung zeigen die Forschungstrends heute praktisch ausschliesslich in Richtung Näherungsverfahren und Heuristiken. Mathematisch exakte Verfahren sind nur für ganz spezielle Fälle bekannt²³⁶. Bei mathematisch inexakten Verfahren besteht in der praktischen Anwendung das Problem, dass der Nachweis über "Optimalität" (Güte) sehr schwer oder auch gar nicht möglich ist. Diese Aussage gilt im besonderen für Näherungsverfahren und Heuristiken.

²³⁴ Vgl. RICHTER, BACHMANN, DEMPE 88, S. 73.

²³⁵ Vgl. BIBERSCHICK 74, S. 18.

²³⁶ Da eine allgemeine analytische Lösung derartiger Fragestellungen wegen der Vielfalt der Modell-Varianten ausscheidet und die durch Parameter-Variationen induzierten Modell-Änderungen Unstetigkeiten bei den Modell-Ergebnissen bewirken, müssen die einzelnen Verfahren jeweils spezifisch auf ihre prinzipielle Eignung hin untersucht werden. Modell-Änderungen sind immer durch Parameter realisiert. Es gilt zu beachten, dass Parameter-Änderungen im Ergebnisverlauf Unstetigkeiten verursachen können.

In der praktischen Anwendung wird bei kleinen und überschaubaren Problemen, aus pragmatischen Überlegungen heraus, oftmals eine volle Enumeration zur Optimierung vorgeschlagen.²³⁷

Eine Auswahl anwendbarer heuristischer Verfahren bzw. Näherungsverfahren zur Lösungs-Optimierung mit der Simulation sind nachfolgend aufgelistet. Sie sind gruppiert nach ihrer primären Methode, d.h. Such- oder zufallsbasierte sowie sonstige Verfahren.

Such-Verfahren:

- probieren (erfahrungsbasiertes Trial and Error)
- eindimensionale Suche²³⁸
- mehrdimensionale Suche (experimentelles Gradienten-Verfahren, Hill Climbing -Strategie²³⁹)
- hierarchische Suche (Tiefen- oder Pfadsuche, Breiten- oder Volumensuche)
- regelbasierte Suche (Expertensysteme)
- . . .

Zufallsbasierte Verfahren²⁴⁰:

- Random-Verfahren (nur Zufall²⁴¹)
- Complex-Algorithmus²⁴²
- Krechel-Mohr-Verfahren (modifizierter, erweiterter Complex-Algorithmus²⁴³)
- Boxmod-Verfahren (modifiziertes Krechel-Mohr-Verfahren²⁴⁴)
- Evolutions-Verfahren (Zufallsprinzip mit anschließender Selektion²⁴⁵)

²³⁷ Die Zahl der denkbaren "Wege" liegt wegen der kombinatorischen "Explosion" schnell um Größenordnungen über den, im Rahmen einer Computer-Simulation, vollständig enumerierbaren (numerisch zu berechnenden) Fällen. Es müssen daher fast immer Denk- bzw. Suchregeln (Heuristiken) gesucht werden, welche die Zahl der Möglichkeiten stark einschränken und somit ein Optimum (gute Lösung) auffinden lassen. Diese Art der Optimierung wird in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

²³⁸ Vgl. Abschnitt Nr. 8.2.3 "Eindimensionale Suche".

²³⁹ Dieser Kategorie von Verfahren liegt die Auffassung zugrunde, dass bei einer Suche der künftige Verlauf der Zielfläche aus den bisher bekannten Zielwerten in die nähere Umgebung extrapoliert werden kann. Vgl. auch SCHLOSSER 79, S. 56.

²⁴⁰ Zufallsbasierte bzw. stochastische Verfahren benutzen i.d.R. Pseudozufallszahlen.

²⁴¹ Die Folge der Versuchspunkte ist voneinander völlig unabhängig. Ein reines randombasiertes Verfahren ist z.B. das Monte Carlo-Verfahren.

²⁴² Nach BOX M.J. 1965. Es handelt sich um eine Modifikation des Simplex-Verfahrens (constrained simplex), das ursprünglich für die experimentelle Optimierung entwickelt wurde. Die Modifikation besteht in der Möglichkeit, Nebenbedingungen zu berücksichtigen. Trotz der Namensgleichheit hat dieses Konzept nichts mit dem Simplexverfahren der linearen Optimierung von DANTZIG zu tun. Vgl. dazu CHEN 90, S. 125.

²⁴³ Nach KRECHEL-MOHR K.-J. 1984/85, Studienarbeit (Grundlagen) und Diplomarbeit (Vertiefung) an der TH Darmstadt.

²⁴⁴ Eine Entwicklung von DÖRNHÖFER K. (Diplomarbeit) an der Universität Erlangen bei Prof. Schmidt, 1985. Das Boxmod-Verfahren ist quasi ein modifiziertes und erweitertes Krechel-Mohr-Verfahren, d.h. eine Kombination von Complex-Algorithmus nach BOX und dem Nelder-Mead-Algorithmus.

²⁴⁵ Nach SCHWEFEL 77. Ausgehend von einem Startpunkt (Vorfahre) werden weitere zwei bis drei Punkte (Nachkommen) erzeugt. Ihre Komponenten unterscheiden sich durch zufällige, unabhängige Abweichun-

- generische Verfahren (Zufallsvariation mit anschliessender Rekombination ²⁴⁶)

- ...

Sonstige Verfahren:

- Simulated Annealing-Verfahren ²⁴⁷
- Reduktion des Suchraumes durch systematische Rasterung (sequenzielle Enumeration, faktorielle Versuchsplanung ²⁴⁸)

- ...

Der heutige Forschungstrend bezüglich der aufgeführten Verfahren liegt einerseits bei randombasierten Verfahren ²⁴⁹, z.B. den Evolutions- und generischen Verfahren, sowie andererseits bei regelbasierten Heuristiken und beim Simulated Annealing-Verfahren.

Heuristiken sind immer dann notwendig, wenn in dieser Projektphase die Modell-Komponenten noch nicht definitiv festgelegt sind ²⁵⁰. Zudem soll die Optimierung, wie sie in dieser Arbeit behandelt wird, für die verschiedensten Einsatzgebiete mit den unterschiedlichsten Fragen geeignet sein. Um der allgemeinen Verwendung (Problemunabhängigkeit) in der Optimierung mit der Simulation nicht im Weg zu stehen, werden im Anschluss nur noch Heuristiken weiterbehandelt, die auf einer Suchstrategie (Suche) basieren.

Eine grobe Uebersicht bekannter Optimierungs-Verfahren ist im Buch von NOCHE 90, S. 35 ff. zusammengestellt. Eine weitere, sehr gute Kurzübersicht über prinzipiell mögliche Optimierungs-Strategien für Simulations-Modelle mit weiteren Literaturhinweisen findet sich bei CHEN 91, S. 202 bis S. 206. ²⁵¹

gen vom Parametervektor des Ausgangspunktes. Dem Selektionsprinzip entsprechend wird der Punkt zum Ausgang einer neuen Iteration (Mutation) gewählt, der im Sinne des Zieles am besten ist; alle anderen Punkte werden verworfen. Treten nur noch kleine Verbesserungen auf, wird das Vorgehen abgebrochen. Man unterscheidet weiter zwischen ein-, zwei- und mehrgliedrigen Evolutionsstrategien. Vgl. SCHLOSSER 79, S. 59.

²⁴⁶ Nach der Ermittlung einer ersten Versuchsreihe durch zufälliges Auswählen der Versuchspunkte aus dem zulässigen Variationsbereich sind die besten Punkte bezüglich der Zielsetzung auszuwählen. Von diesen Punkten werden nun zufällige Paarungspartner bestimmt. Die Rekombination erfolgt nach jeweils spezifischen "genetischen" Regeln. Es entsteht eine neue, bessere Population. Diese Population wird mit einer kleinen Zufallswahrscheinlichkeit verändert (Mutation). Das Vorgehen wird fortgesetzt, bis sich die Population nur noch um ein bestimmtes Mass verbessert.

²⁴⁷ Simulated Annealing ist ein heuristisches Verfahren. Der Heuristik liegt der Fahrplan für die Erniedrigung der Temperatur (vom Groben zum Detail) bis zum "simulierten Erstarren bzw. Kristallisieren" zugrunde. Die Temperatur steht z.B. bei einem Travelling Salesman-Problem stellvertretend für die Distanzen.

²⁴⁸ Vgl. Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode".

²⁴⁹ Diese Denkhaltung entlastet den Anwender von einem methodischen Vorgehen (seriöse Vorarbeiten) und der Versuchsplanung, da der Zufall dominiert und Fehler im Modell und im Vorgehen ausgleicht. Weiter ist der Lerneffekt für weitere Varianten bei diesem Vorgehen nicht gegeben, vor allem nicht bei automatisierter Abarbeitung.

²⁵⁰ Vgl. auch Abschnitt Nr. 4.1.4 "Versuchsplanung mit Versuchsmatrix".

²⁵¹ Für eine vertiefte Uebersicht und als Einstieg in die Thematik sind die Bücher von CHEN 90, S. 108 ff. und SCHWEFEL 77 zu empfehlen.

8.2.2 Heuristische Suchstrategien

Suchstrategien lassen sich in zwei verschiedene Klassen unterteilen, in parallele und sequentielle.

Bei ersteren wird die Reihenfolge der Experimente festgelegt, bevor irgendwelche Resultate vorliegen, während bei letzteren die bereits früher gewonnenen Ergebnisse zur Festlegung der weiteren Experimente herangezogen werden können. Da nachweisbar sequentielle Verfahren in der Regel wesentlich effizienter sind als parallele Verfahren und erstere sich für den Einsatz in der Simulation gut eignen, wurden sie für die weitere Untersuchung ausgewählt ²⁵².

8.2.3 Eindimensionale Suche

Das heute weitgehend angewendete Verfahren zur Optimierung von mehrdimensionalen Problemen beruht auf dem Prinzip der eindimensionalen Suche. Hier wird das grundsätzliche Vorgehen einer Dimensionierung als eine Art statische Optimierung beschrieben. Stell-Grösse nach Stell-Grösse wird verändert bzw. optimiert, d.h. z.B. die sukzessive Elimination von Engpässen in einem System. ²⁵³

Anhand einer statischen Rechnung wird eine Ausgangslösung ermittelt. Diese Ausgangslösung ist i.d.R. weit von der Vorgabe entfernt und berücksichtigt keine dynamischen Einwirkungen. Die für die statische Rechnung zur Verfügung stehenden Daten bestehen aus Arbeitsplänen, Beschreibungen der Systemkomponenten etc., auf deren Grundlage Durchlaufzeiten und Systemdurchsatz vorkalkuliert werden. Das angestrebte Ziel ist es in aller Regel, entweder die Durchlaufzeit oder die Bestände zu minimieren. In einem ersten Simulations-Experiment wird dann untersucht, welche Komponente die höchste Auslastung aufweist. Hierbei handelt es sich meistens um eine Engpass-Station. Gemäss allgemeiner Theorie bedürfen die Engpässe einer besonderen Betrachtung. Sie sind durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- der Vorpuffer ist hoch ausgelastet
- der Nachpuffer ist nur wenig ausgelastet
- die Station ist hoch ausgelastet
- die Station selbst ist selten blockiert
- der Solldurchsatz wird nicht erreicht

Die Kapazität dieser Engpasskomponente wird dann um "eins" erhöht und ein neues Experiment gestartet. Stehen zwei oder mehr Komponenten als Verbesserungskandidaten zur Verfügung, wird zuerst die Kapazität der extern vorpriorisierten Komponente erhöht.

²⁵² Vgl. WILDE 64, S. 5 und auch Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode".

²⁵³ Vgl. auch Abschnitt Nr. 7.5.2 "One by One Versuchsplan".

Da Engpässe im System sowohl zu lokalen Ueberlastungen als auch zu lokalen Unterlastungen führen können, muss eine Optimierung Kapazitätsanpassungen nach oben und unten zulassen. Auf iterative Weise wird versucht die Ziel-Grösse (ZG) soweit anzupassen, bis ein Sollwert erreicht ist.

Kennzeichnend für diese Art der Optimierung der Engpässe ist die Tatsache, dass im System jeweils nur wenige Aenderungen auf einmal vorgenommen werden, weil sonst die Auswirkungen den Ursachen nicht mehr zugeordnet werden können.

Die statische Optimierung bei der diskreten Simulation ist heute Gegenstand vieler Forschungsbemühungen. Die Optimierung erfolgt dabei meistens regelunterstützt oder stochastisch. Es gibt starke Bemühungen, die gefundenen Vorgehensvorschriften autonom mit Hilfe von Computern anzuwenden. Anzumerken bleibt, dass eine statische Optimierung wegen möglicher Suboptima im Lösungsraum mit mehreren Startwert-Kombinationen durchzuführen ist.²⁵⁴

Bei diesem Verfahren besteht die prinzipielle Gefahr, in einem Kreislauf von Massnahmen und Gegenmassnahmen hängenzubleiben, der dann manuell aufzulösen ist.

Die eindimensionale Optimierung von mehrdimensionalen Problemen hat sich als eine wenig effiziente Methode erwiesen²⁵⁵.

Ausgehend von einem frei gewählten (zufälligen) Startpunkt wird auf der Suche nach dem Optimum ein Parameter nach dem anderen variiert. Aufgrund der Interdependenzen zwischen den einzelnen Systemkomponenten (komplexe Wirkungen) kann ein derartiges Verfahren allerdings nicht sehr effizient sein. Systemtheoretische Untersuchungen haben darüber hinaus ergeben, dass eine rein sequentielle eindimensionale Optimierung gewisser Modell-Konstellationen sogar irreführende Ergebnisse zur Folge haben kann. Dabei ist ein gefundenes Ergebnis unabhängig von dem tatsächlichen Optimum.

8.2.4 Mehrdimensionale Suche

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln dieser Arbeit gezeigt wurde, hängen bei einer Planung die Ziel-Grössen von einer Vielzahl von Variablen ab. Da sich in vielen Fällen die Beziehungen in dem zu optimierenden System mathematisch nicht oder nur sehr schwer darstellen lassen, bietet sich die geometrische Analyse als Lösungsweg an.

Die Darstellung funktioneller Zusammenhänge in kartesischen Koordinatensystemen veranschaulicht die Beziehungen zwischen den unabhängigen Variablen und einer Ziel-

²⁵⁴ Aus forschungstechnischer Sicht ist die Computerleistung und die Anzahl der Läufe nicht von Bedeutung, sondern nur die gefundene Lösung. Aus Publikationen ist zu entnehmen, dass je nach Problemstellung 200 - 3'000 oder mehr Simulations-Läufe notwendig sind. Damit ist die Eignung eines iterativen Verfahrens mit mehreren Startpunkten für die praktische Anwendung ausserhalb von Hochschulen zur Zeit noch fraglich.

²⁵⁵ Vgl. z.B. das Beispiel von WILDE 64, S. 60 f.

Grösse und erlaubt Rückschlüsse aufgrund von ähnlichen Kurvenverläufen, die bereits einmal untersucht wurden. Leider versagt die Anschaulichkeit der geometrischen Darstellung, sobald mehr als zwei unabhängige Variable vorliegen. Bei mehrdimensionalen Problemen bedient man sich daher algebraischer Methoden, die am 3-dimensionalen Fall entwickelt und dann für den n -dimensionalen Fall verallgemeinert werden.

Ein erprobtes Verfahren zur Darstellung räumlicher Flächen besteht in der isometrischen Projektion, wobei die Zielfunktion als y -Wert in der Vertikalen und die beiden unabhängigen Variablen x_1 und x_2 in der Horizontalen aufgetragen werden. Diese Art einer Darstellung wird in der Literatur häufig als Antwortfläche bezeichnet. Im n -dimensionalen Fall spricht man von einer Hyperantwortfläche im Hyperraum ²⁵⁶.

Das folgende Beispiel (vgl. Bild Nr. 17) dient zur Veranschaulichung des Vorgehens im 2-dimensionalen Fall. Die 3.-Dimension beinhaltet den Grad der Zielerreichung.

Man stelle sich einen Bergsteiger bei dem Versuch vor, auf möglichst kurzem Weg den Gipfel eines Berges zu ersteigen, der im Nebel liegt. Da sich der Mann wegen des Nebels kein Bild von der Gestalt bzw. Oberfläche des Berges machen kann, muss er nach einem geeigneten Verfahren suchen, mit Hilfe dessen er die jeweils günstigste Aufstiegsrichtung feststellen kann. Unter Ausnützung seiner nur beschränkten Rundschau wird er um sich blicken, um festzustellen, in welcher Richtung das Gelände am steilsten ansteigt. Dann wird er diese Richtung einschlagen, und durch ständige Wiederholung dieses Vorgangs wird es ihm gelingen, beständig an Höhe zu gewinnen bis er einen Gipfel erreicht hat.

Dieses Verfahren bedingt, dass er jede Richtung einschlagen kann, also die beiden Variablen x_1 und x_2 gleichzeitig ändern kann. Wäre er hingegen gezwungen sich nur in den beiden Achsrichtungen weiterzubewegen, wäre sein Weg ein Zickzackkurs und infolgedessen viel länger. Im ungünstigsten Fall könnte er den Gipfel nie erreichen. Trifft er nämlich auf eine Kammlinie, die nicht in Achsrichtung verläuft, kommt er mit seinem Verfahren nicht weiter, da das Gelände in diesem Fall in den zulässigen Richtungen abfällt, statt anzusteigen ²⁵⁷.

Das beschriebene Verfahren ist in der Fachliteratur unter der Bezeichnung "Verfahren des steilsten Anstieges" (experimentelles Gradientenverfahren) oder auch als Hill Climbing -Strategie bekannt.

Der Anstieg in einem beliebigen Punkt im Lösungsraum ist die Steigung der Tangente an der Antwortfläche, d.h. die erste Ableitung der Tangentengleichung in diesem Punkt. Ist nun die Antwortfläche und somit die Tangente nicht bekannt oder mathematisch nicht darstellbar, kann man die Steigung experimentell aus dem Abstand zu einem benachbarten Punkt sowie aus der festgestellten Höhendifferenz zwischen den beiden Punkten ablei-

²⁵⁶ Vgl. WILDE 64, S. 54 ff.

²⁵⁷ Vgl. WILDE 64, S. 124 f.

ten²⁵⁸. Der gleiche Weg bietet sich für die Optimierung eines diskreten Problems an und ist im folgenden kurz beschrieben.

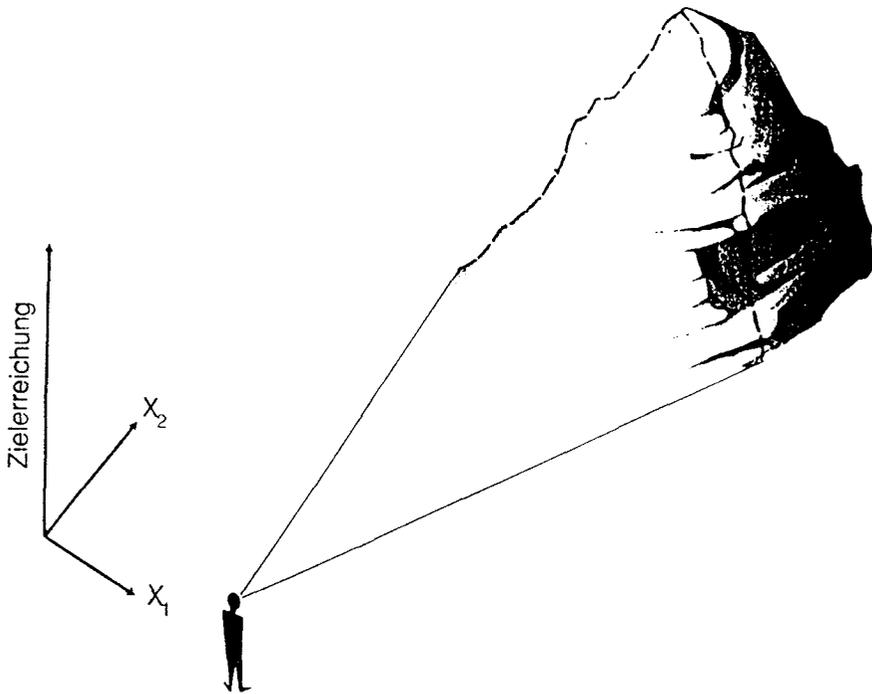


Bild 17: Mann am Berg
(nach WILDE 64, S. 127)

Ausgehend von einem frei wählbaren Startpunkt als Mittelpunkt wird ein Quadrat mit ebenfalls frei wählbaren Seitenlängen definiert, in dessen Eckpunkten und/oder Seitenmitten zusätzliche Experimente angestellt werden. Der Punkt mit dem höchsten Zielfunktionswert bildet den Mittelpunkt eines neuen, ebenso gearteten Quadrates, mit dem in gleicher Weise verfahren wird. Fällt der Mittelpunkt eines neuen Quadrates mit einem bereits früher untersuchten Punkt zusammen, weicht man statt dessen auf den Punkt mit dem nächst niedrigeren Zielfunktionswert aus. Auf diese Art und Weise bestimmt man schliesslich das Optimum²⁵⁹.

Das Verfahren des steilsten Anstieges ist prinzipiell gut. Es besteht aber je nach Startpunkt das Risiko auf einem Nebengipfel (Nebenoptimum) zu landen. Um dies zu verhin-

²⁵⁸ Dabei wird das Problem der vorhandenen Unstetigkeit der Ergebnisse umgangen. Deshalb spricht man im Unterschied zu mathematischen Gradienten-Verfahren von experimentellen Gradienten-Verfahren. Die Unstetigkeiten sind u.a. durch die Ganzzahligkeit von einigen Modell-Parametern bedingt.

²⁵⁹ Vgl. PERRY, HOOVER, FREEMAN 84, S. 349 ff. und auch Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode".

dem, muss das Verfahren mit verschiedenen, z.B. randombasierten Startpunkten durchgeführt werden.

8.3 SUCH-KONZEPT, STARTWERT-PROBLEM

In diesem Kapitel wird das Konzept für die Festlegung eines guten Startwertes und die daran anschließende Suche nach dem Optimum beschrieben.

Ganz allgemein betrachtet gibt es zwei Wege des Handelns und Denkens ²⁶⁰:

- vergangenheitsbestimmt, logisch-kausales (vorwärtsverkettetes) lineares Ursache-Wirkungs-Denken; handeln, nachdem ein Problem aufgetreten ist.
Die Lösung entspricht einer Korrektur. Die Freiheitsgrade sind sehr beschränkt.
- zukunftsorientiert (rückwärtsverkettet), von einem erwünschten oder unerwünschten zukünftigen Ereignis (Ziel) tastet man sich zur heutigen Situation zurück. Dabei sind mehrere Freiheitsgrade und Alternativen offen.

Die zukunftsorientierte Betrachtungsweise liegt dem hier gezeigten Such-Konzept zugrunde.

Das hier vorgestellte Konzept basiert auf der Aufteilung des Suchvorgangs in zwei Schritte:

1. Festlegung des Startwertes, von wo aus mit der Suche begonnen wird (Startwert-Problem)
2. Suche des Optimums (Heuristik) evtl. mit der Simulation

Obwohl die vorher beschriebenen Verfahren in vielen Fällen in Abhängigkeit des Startwertes zum Erfolg führen, ist zu beachten, dass sie nur für Spezialfälle oder nur für unimodale Problemstellungen "eindeutig" anwendbar sind. Ein heuristisches Such-Verfahren droht immer dann zu versagen, wenn das "Gebirgsmassiv" neben dem "Hauptgipfel" noch einen oder mehrere "Nebengipfel" besitzt, d.h. multimodal ist.

Bei dem vorgeschlagenen Vorgehen wird die Suchrichtung (Variation der Parameter) nicht von einem beliebigen, zufälligen Startpunkt in Richtung möglicher Optima durchgeführt, sondern von einem theoretischen, quasi statischen Maximum in Richtung einer realisierbaren Lösungsvariante. Dabei ist die Suchrichtung im Gegensatz zu anderen Verfahren implizit vorgegeben.

Bei dem auf diesem Such-Konzept basierenden Vorgehen gilt es, das vorhandene Modell- bzw. Systemwissen, das in jedem Fall schon für die Modell-Konzeption erforderlich ist,

²⁶⁰ Vgl. VESTER 80, S. 89. Analogie mit regelbasierter SW oder der Netzplanung.

maximal auszunützen und durch Aggregation (statische Berechnungen) zu hilfreichen Erkenntnissen zu gelangen. Anhand einer statischen Rechnung wird eine spezielle Ausgangslösung ermittelt, deren Kapazitäten so aufeinander abgestimmt sind, dass eine möglichst gleichmässige, harmonische Auslastung aller Komponenten gewährleistet ist und neben den geforderten Zielwerten auch ein vorgegebener Durchsatz erreicht wird.

Der Grundgedanke ist, einen idealen Startwert ausserhalb des praktisch möglichen Lösungsbereichs festzulegen. Die Optimierung erfolgt durch die stufenweise Annäherung des theoretischen Optimums an das real umsetzbare Optimum. Bei diesem Ansatz ist das Suchfeld für die Parameter von vornherein in Richtung und Umfang eingeschränkt. Durch die Umkehrung der Suchrichtung (analog einer Umkehrfunktion) wird aus der Suche nach dem besten Maximum (Optimum) die Suche nach dem kleinsten, praktisch noch zu realisierenden Minimum in der Umgebung des Startwertes.²⁶¹

Die Simulation ist dabei das entscheidende Hilfsmittel, da sie es ermöglicht, auch praktisch nicht umsetzbare Ideen darzustellen (Simulation von Ersatzproblemen).

Nach Festlegung des ersten Startwertes erfolgt die Suche des Optimums stufenweise unter Anwendung der Simulation auf Ersatzprobleme. Das Ergebnis einer Stufe bildet jeweils den Startwert für die nächste Stufe. Damit ist der Startwert und die eingeschränkte Suchrichtung klar vorgegeben. Die Ersatzprobleme sind so gewählt, dass sie sich stufenweise der realen Problematik annähern. Bei Erreichen ist die Suche (theoretisch) beendet.

Ein anschauliches Erklärungsbild zum Vorgehen in der Simulation wird im folgenden Abschnitt beschrieben. Dabei ist das Vorgehen auf zwei Stufen beschränkt: Ersatzproblem (in der Luft) und Realproblem (auf der Bergoberfläche).

8.3.1 Erklärungsbilder "Suche von oben"

In diesem Abschnitt wird die Such-Konzeption illustriert. Die Suche von oben könnte auch als die Suche im "Sinkflug" beschrieben werden. Die Beschreibung der konkreten Umsetzung dieses Konzeptes erfolgt im Abschnitt Nr. 8.3.2 "Konkrete Beschreibung des Such-Konzeptes".

Bei der Umkehrung der Experimentier- bzw. Suchrichtung muss ein grundsätzlich neuer Blickwinkel eingenommen werden.

Anhand des normalen Vorgehens (vgl. Bild Nr. 18) von unten nach oben zum Gipfel (der Zielwert entspricht der Bergspitze) wird klar, dass dieses Verfahren dann zu versagen droht, wenn das Gebirgsmassiv neben dem Hauptgipfel noch einen oder mehrere Nebengipfel besitzt. Gerät der Bergsteiger unglücklicherweise auf einen Nebengipfel, muss er

²⁶¹ Die hier gezeigte Startwertfestlegung verbessert auch für andere Optimierungs-Verfahren, wie z.B. in Abschnitt Nr. 8.2.4 "Mehrdimensionale Suche" beschrieben, die Aussicht auf Erfolg.

wegen des von diesem Punkt aus nach allen Seiten abfallenden Geländes annehmen, er befinde sich bereits auf dem Hauptgipfel. Infolge Nebels (Unkenntnis der Umgebung) ist er auch nicht in der Lage, seinen Irrtum "per Augenschein" zu erkennen.

Zum Nebel ist zu sagen, dass der "Gipfelstürmer" (Simulations-Anwender) nur diese Punkte im Gebirge (im Suchraum) kennt, die er bereits einmal betreten hat. Die restlichen kann er bestenfalls grob erahnen.

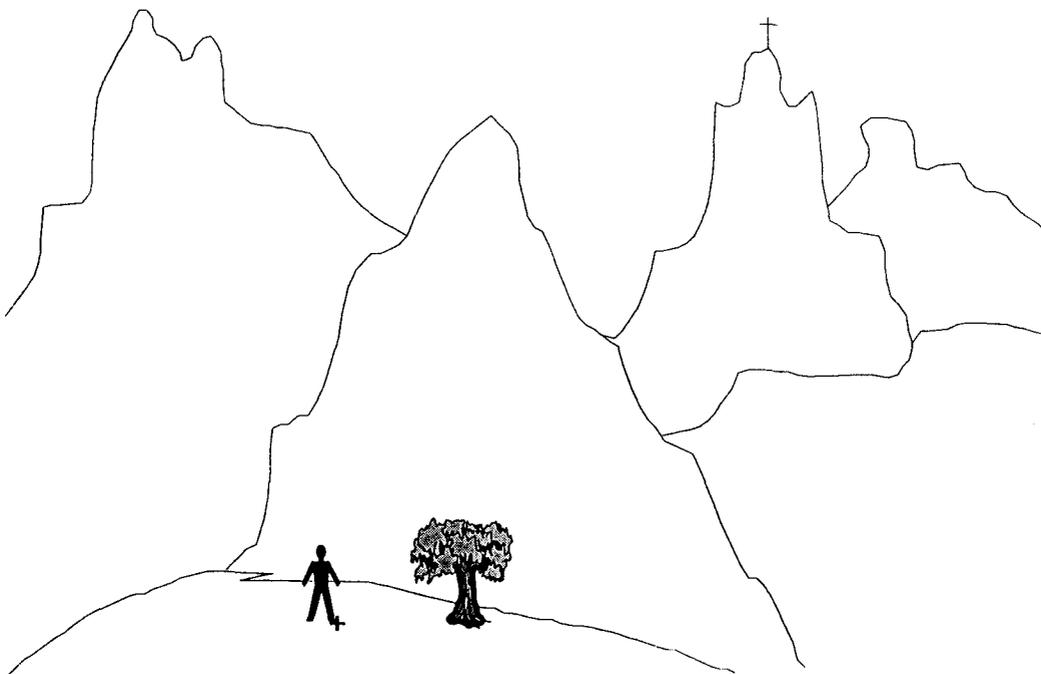


Bild 18: Konventionelles Vorgehen (bottom up)

Theoretisch kann durch eine Vielzahl von Experimenten eine Karte der Landschaft erstellt werden.

Was wird dabei konkret gemacht? Es wird versucht, eine Simulation durch eine vereinfachte Abbildung (Simulation) zu optimieren. Dieses Vorgehen kann theoretisch beliebig fortgesetzt werden. ²⁶²

Es stellt sich die Frage: Warum wird nicht von Anfang an ein Modell abstrahiert, welches beherrschbar ist, anstatt die Simulation zu "simulieren" und dabei umständlich über mehrere Stufen zu abstrahieren?

²⁶² Dies ist der Optimierungs- und Automatisierungsansatz, der an diversen Forschungseinrichtungen verfolgt und derzeit meist regelbasiert und/oder bei eingeschränkten Anwendungen - zum kleinen Teil mathematisch geschlossen - praktiziert wird.

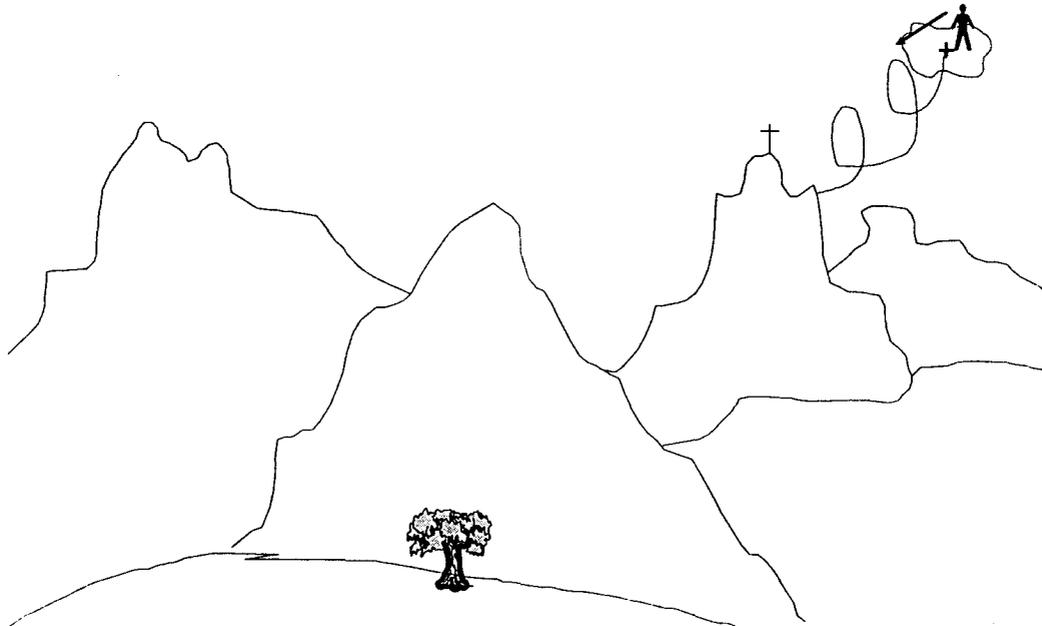


Bild 19: Such-Konzept (top down vom theoretischen Ziel)

Zurück zum Such-Konzept (vgl. Bild Nr. 19):

Der "Gipfelstürmer" sucht sich ein theoretisches, statisches Ziel, sprich eine Zielwolke. Das gewählte Ziel berücksichtigt keinen dynamischen Schlupf und keine daraus resultierenden Verluste. Von dort sucht er sich kreisend durch den Nebel nach unten, bis er Kontakt mit dem Berg hat. Dabei geht er wegen des Nebels nach einem Schema vor, um sich nicht zu verirren und möglichst weit oben, nahe dem Gipfel, auf den Berg zu treffen. Das ist wegen den evtl. vorhandenen Nebengipfeln äusserst wichtig. Einmal auf der Bergoberfläche angekommen, muss er (gemäss konventioneller mehrdimensionaler Suche) versuchen, den Rest entlang der Oberfläche in Richtung Gipfel zu steigen.

Angewendet auf allgemeine Probleme stellt sich die Frage: Gibt es eine (theoretische) obere Grenze (Wolke) für den Zielfunktionswert? Kann ein entsprechender Wert ermittelt werden, lässt sich das Optimum mit dem Verfahren des "flachsten Gefälles" in Analogie zum Verfahren des "steilsten Anstiegs" (experimentelles Gradienten-Verfahren) bestimmen? ²⁶³

²⁶³ Anmerkung: Umkehrung des Gradienten-Verfahrens. Es ist zu beachten: Das experimentelle Gradienten-Verfahren ist wegen der Unstetigkeiten immer nur als eine Näherung zu verwenden.

8.3.2 Konkrete Beschreibung des Such-Konzeptes

Ausgehend vom "Expected Value Model" (EVM) ²⁶⁴ und dem vorhergehend beschriebenen Such-Konzept (Suche von oben) erweist es sich als sinnvoll, diese zu kombinieren. Da bei der statischen Betrachtungsweise gewissermassen ein idealer, d.h. reibungsloser und störungsfreier Zustand analysiert wird, bilden die daraus gewonnenen Ergebnisse obere Schranken für den Zielwert, die sich in dem entsprechenden realen System in der Regel nicht erreichen lassen. Bei der statischen Rechnung wird das reale System bezüglich der in ihm vorhandenen Engpässe untersucht und der maximal mögliche Teiledurchsatz berechnet. Ausgehend von einem angestrebten Solldurchsatz sowie einer zulässigen Auslastung aller Systemkomponenten (z.B. der Maschinen oder des Personales) von 100% wird jede Komponente so lange vervielfacht, bis die Gesamtkapazität aller parallel arbeitenden Komponenten den Solldurchsatz knapp übertrifft oder ihm zumindest entspricht.

Die jeweilige Losgrösse liefert auch Mindestwerte für die Dimensionierung der Vor- und Nachpuffer (z.B. je ein Los), deren Grösse stark von der Zahl der gleichzeitig zu bearbeitenden bzw. zu transportierenden Teile abhängt.

Die Optimierung verläuft in Stufen. Gestartet wird ausgehend von einer statischen Betrachtung (Startwerte). Dann wird daraus ein Computer-Modell erstellt, das die statische Variante nachbildet (Umsetzung). Als zweites folgt eine stufenweise Annäherung an die mögliche Realität (Optimierung i.e.S.).

In der ersten Stufe der Suche werden u.a. die Transportzeiten auf Null gesetzt, um transportbedingte Stauungen (dynamischer Effekt) zu vermeiden. Der zulässige Ausnutzungsgrad beträgt für alle Komponenten theoretische 100%. Durch diese Vereinfachungen kann bei einem einfachen Modell annähernd ein statischer Zustand nachgebildet werden. Ist dies der Fall, so ist auf einfache Weise gleichzeitig die erste Modell-Validierung erfolgt.

Durch ein n-dimensionales Such-Verfahren, das die n wirksamsten Parameter ²⁶⁵ des Systems variiert, wird der Zielwert (aus der Zielfunktion) so lange minimiert, als z.B. der Durchsatz den Solldurchsatz nicht unterschreitet. Falls es sich dabei herausstellt, dass infolge unzureichender Kapazitäten einzelner Puffer der Durchsatz limitiert ist, werden diese Kapazitäten im notwendigen Umfang erhöht.

Wenn sich die Ziel-Grösse (ZG) auf diesem Weg nicht mehr weiter verbessern lässt, beginnt die zweite Stufe der Optimierung, in der die echten Transportzeiten des realen Systems eingesetzt werden. Unter Berücksichtigung des zusätzlichen Transportzeitbedarfs muss unter Umständen in einer nachfolgenden Stufe die Zahl der Bediener erhöht werden. Ausserdem werden realistische Obergrenzen für die Auslastungsgrade der ver-

²⁶⁴ Theoretischer Erwartungswert (EVM) für den Zielwert, vgl. PERRY, HOOVER, FREEMAN, 84, S. 351 und auch Abschnitt Nr. 8.2.4 "Mehrdimensionale Suche".

²⁶⁵ Vgl. Kapitel Nr. 6. "Parameter-Reduktion".

schiedenen Komponenten eingesetzt, die z.B. beim Personal 90% nicht überschreiten dürfen, da sonst erfahrungsgemäss die Effizienz stark sinkt. Unter diesen Voraussetzungen wird die Zielfunktion erneut minimiert.

Es ist unter Umständen sinnvoll, zuerst gewisse Grössenverhältnisse, wie z.B. die Kapazitäten von verschiedenen potentiellen Engpass-Stationen, zu variieren und zu optimieren, und erst danach die Werte der Grössen selbst zu bestimmen. Auf diese Weise erreicht man, dass n keine zu grossen Werte annehmen kann und die Anzahl der notwendigen Versuche nicht ausufert (Ausscheiden von Alternativen).

Da ein n -dimensionaler "Würfel" 2^n Ecken hat, nimmt die Anzahl der zu untersuchenden Punkte mit steigendem n exponential zu.

Als Hilfestellung für die oben erfolgten Erklärungen soll das folgende Bild eine gewisse schematische Vorstellung geben.

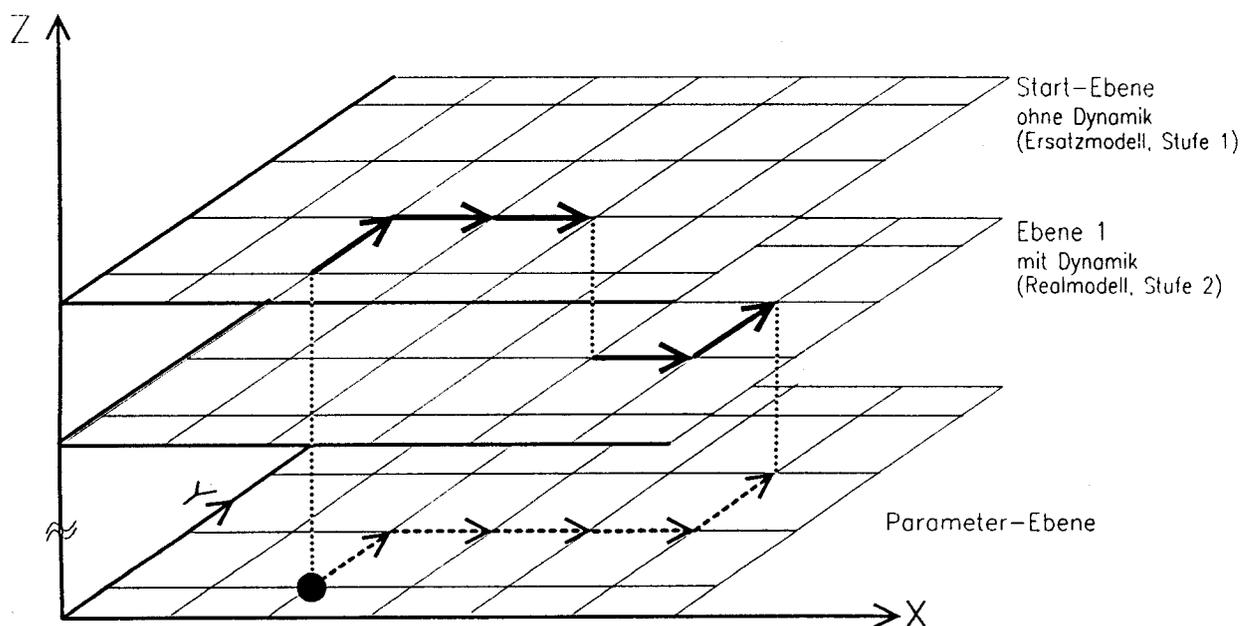


Bild 20: Such-Strategie des Such-Konzeptes mit zwei Stufen

Das Bild zeigt den schematischen Suchvorgang mit zwei Stell-Grössen (X, Y) in der Parameter-Ebene. Ausgehend von den Startwerten (obere Schranke) erfolgt eine Simulation durch ein Modell ohne Berücksichtigung der Dynamik. Der erste Zielwert liegt in der Start-Ebene. Ist das Modell in dieser Ebene optimiert, erfolgt durch Berücksichtigung dynamischer Effekte der Wechsel auf die Ebene 1. Dort erfolgt bei dem hier exemplarisch gezeigten zweistufigen Vorgehen die weitere Optimierung bis zum Ziel. Werden die dyna-

mischen Effekte in n Schritten in das Modell integriert, so sind zur Zielerreichung (Optimierung) n Ebenen erforderlich.

1. Anmerkung: Die Ziel-Ebenen sind in der Praxis nicht eben und nicht auf ein Koordinatensystem ausgerichtet sowie nicht parallel, d.h., die Ebene 1 kann die Start-Ebene berühren. Im n -dimensionalen Fall (Hyperraum) sind die Zielflächen (Hyperantwortflächen) i.d.R. mehrfach ineinander verschachtelt.

2. Anmerkung: Im Gegensatz zum konventionellen Vorgehen wird ein System schrittweise erweitert und nicht, wie üblich, schrittweise eingeschränkt (z.B. Start mit unendlichen Pufferkapazitäten).

8.3.3 Rezept für die praktische Anwendung

In diesem Abschnitt werden spezifische Ergänzungen und Merkpunkte bezüglich der Anwendung des Such-Konzeptes im Rahmen des Vorgehens von Kapitel Nr. 4. "Konzeption einer Vorgehensmethode" behandelt.

Die Festlegung der Stell-Größenwerte zur Erreichung des theoretischen Zieles (obere Grenze) erfolgt durch statische Berechnung unter weitgehender Elimination von dynamischen Einflüssen. Das kann durch Einschränkung von allgemeinen Parametern oder durch zusätzliche Modell-Reduktionen erfolgen. Diesbezüglich muss bekannt sein, welche Zusammenhänge in einem Modell dynamische Effekte erzeugen. Dieses Wissen kann durch Versuche (Erfahrung) gewonnen werden.

Dynamische Effekte sind z.B. bedingt durch:

- Transportfahrzeuge, die wahlweise für mehrere Strecken Verwendung finden
- Einbezug der Transportzeiten
- System-Engpässe
- stark unterschiedliche Losbearbeitungszeiten
- rekursive Materialflüsse
- Personalzuordnungs-Strategien

Am Anfang der Suche nimmt man in Kauf, dass auch unerlaubte bzw. realistisch unmögliche Bereiche im Lösungsraum durchlaufen werden. Das ist erforderlich durch die gezielt vorgenommenen Vereinfachungen (eliminieren dynamischer Einflüsse). Die zur Elimination der Dynamik getroffenen Vereinfachungen sind dann bei der primären Modell-Umsetzung zu berücksichtigen. Später im Vorgehen werden sie schrittweise rückgängig gemacht, d.h. das Modell wird bezüglich der Dynamik ergänzt.

Bei einer stufenweisen Dynamisierung und Anpassung an die echte Realität sind gleichzeitig mehrere Stell-Grössen (SG) zu verändern.²⁶⁶

Merkmale für den praktischen Anwender des Such-Konzeptes:

- Voraussetzung ist eine gute konzeptionelle Ausarbeitung der zu modellierenden Varianten. Dies beinhaltet eine statische Absicherung inkl. Berechnung der Basis-Varianten gemäss Versuchsplan, d.h. die theoretischen Erwartungswerte sind zu berechnen.
- Der Grundgedanke ist, dass man nicht zuerst ein möglichst genaues Simulations-Modell auf dem Rechner (realitätstreues Modell mit hoher Auflösung) erstellt, sondern zuerst auf dem "Papier" ein statisches Optimal-Modell konzipiert und dimensioniert.
- Dabei ist wegen der möglichen dynamischen Effekte soviel wie möglich zu vernachlässigen; z.B. Uebergangszeiten, Personalstrategien, Werkzeug- und Vorrichtungsfüsse sowie Bedarfsschwankungen. Erst dann wird ein Rechner-Modell erstellt.
- Bei der Umsetzung geht es in einem ersten Schritt nicht darum, ein möglichst originalgetreues Abbild zu erhalten, sondern darum, das statisch berechnete Modell 1:1 zu übernehmen.
Grosse Vereinfachungen werden in diesem Stadium bewusst akzeptiert. Die Anpassung an die Modell-Realität erfolgt später gezielt und stufenweise.
- Als erstes wird das Rechner-Modell nach diesen Vorgaben erstellt und verifiziert sowie grob validiert. Das sich jetzt ergebende Maximum sollte demnach nur "geringfügig" schlechter sein als das vorher ermittelte theoretische Optimum.
- Jetzt ergibt sich ein Rechner-Modell, das man "voll im Griff" hat. Als nächstes wird das Modell mit dynamischen Einflusskomponenten in Form von Parameter-Erweiterungen angereichert, so dass es zunehmend realitätsnäher wird (Ersatzmodell 1 ... n). Wichtig dabei ist, dass der Benutzer bei diesem Vorgehen das komplette Modell mit seinen Varianten immer unter Kontrolle hat; d.h. schrittweise Integration von Personal, ersetzen konstanter Werte durch Verteilungen (soweit gefordert und sinnvoll), Integration von Vorrichtungs- und Werkzeugflüssen, Implementierung diverser Steuer-Strategien sowie Aenderung des Auftragsmix oder Erweiterung des Basis-Modelles durch eine hierarchisch höhere Auflösung und eine Vorwärts- bzw. Rückwärtsintegration.

Dieses Vorgehen gewährleistet ein optimales zielgerichtetes Vorgehen und erspart eine langwierige, oft zufällige Optimierung gemäss üblichem Vorgehen.

²⁶⁶ Eine Parameter-Variation von jeweils nur einem Parameter in einem n-dimensionalen Raum führt gemäss systemtheoretischer Betrachtungen nicht zum Optimum. Vgl. auch Kapitel Nr. 7. "Versuchsplanungs-Methode".

Dabei wird die Funktion der Simulation als Erklärungs- und Verständnis-Modell gegenüber dem Experiment in den Vordergrund gestellt. Das Experimentieren beschränkt sich weitestgehend auf die Ueberprüfung der im voraus festgelegten und zu unterscheidenden theoretischen Varianten, ergänzt mit ihren dynamischen Auswirkungen. Dadurch kann und soll das nicht effiziente und zeitraubende "Probieren" möglichst entfallen und der Optimierungsprozess kalkulierbar werden.

8.4 DISKUSSION DES SUCH-KONZEPTE

In diesem Kapitel werden die Stärken bzw. Schwächen des im Kapitel Nr. 8.3 vorgestellten Such-Konzeptes erörtert und kurz begründet.

Die Vorteile sind:

- Das Such-Konzept zeichnet sich durch ihre gedankliche "Einfachheit" aus. Trotzdem fällt es Praktikern und auch langjährigen Simulations-Anwendern schwer, als Ausgangsbasis einen theoretischen, in der Realität nicht existenten, Basis-Zustand zu akzeptieren.
- Vorhandene Informationen werden gezielt für eine effiziente Simulation genutzt. Die Informationen kommen aus der Problem-, Aufgaben- und Ist-Analyse sowie aus der Modellkonzeption und Datenerhebung.
- Bei einer sauberen Simulations-Vorarbeit (theoretische Zielplanung) ist mit diesem Such-Konzept eine mindestens gleich gute Nachvollziehbarkeit gewährleistet wie bei anderen vergleichbaren Vorgehen von "unten nach oben", aber mit einer schnelleren und effizienteren Zielfindung.

Man orientiert sich anfänglich nicht nach der Oberfläche des "Zielberges" (realistische Zielwerte), sondern unternimmt eine Suche, ausgehend vom theoretischen Optimum (Maximum). Die Steigerung der Effizienz erfolgt durch ein schnelleres, gerichtetes Vorgehen mit einem klaren Bezugsmassstab (statisch errechnete Messlatte). Die Gefahr, durch irgendwelche Parameter-Gradienten auf ein Suboptima fehlgeleitet zu werden, sinkt damit.

Das Modell bleibt immer komplett unter der Kontrolle des Betreibers (kein Tasten im Dunkeln).

- Bei dem oben beschriebenen Such-Konzept ist das Risiko, auf ein lokales Optimum im mehrdimensionalen Lösungsraum (Suboptima) zu treffen oder abzuschweifen geringer als bei einer konventionell versuchten Annäherung von "unten". Man beginnt quasi um das theoretische Optimum herum zu suchen. Damit wird von vornherein ein Grossteil des Risikos auf ein entferntes Suboptimum zu treffen ausgeschaltet. Dadurch sind erheblich weniger Simulations-Experimente notwendig, was wiederum die Effizienz der Simulations-Anwendung steigert.

Ein gefundenes Suboptimum bzw. Optimum ist immer sehr stark durch den Startpunkt für die Suche bestimmt. Ist dieser Startpunkt "zufällig" gewählt, unterliegt das Ergebnis auch einem gewissen Zufall. Gerade hier ist es ein Ziel, diese Unsicherheit weitestgehend auszuschalten.

- Durch die Integration des Such-Konzeptes in das Vorgehen bei der Simulations-Anwendung vereinfacht sich nicht nur die Versuchsplanung, sondern auch die Verifikation und z.T. die Validierung.

Die Verifikation erfolgt integriert. Da als erstes eine im voraus statisch berechnete Variante simuliert wird, fallen vorhandene Unterschiede leicht auf.

Die Validierung (Übereinstimmung mit der Realität) erfolgt parallel mit der Annäherung an eine plausible, realisierbare Lösung. Als "Vorteil" ergibt sich aus dieser Situation eine engere erforderliche Zusammenarbeit mit den Auftraggebern.

Nachteile / Einschränkungen:

- Eine Gefahr besteht darin, wenn ein Anwender noch keine "verbindliche" Vorstellung von der geforderten Realität hat und sich nun beim Simulieren bzw. Konkretisieren der Lösung von momentanen Eindrücken leiten lässt. In diesen Fällen besteht die Gefahr, dass die Lösung der Aufgabe zugunsten eines Pseudo-Ergebnisses abgeleitet. Diese Einschränkung kann nur durch seriöse und dokumentierte Vorarbeiten abgefangen werden. Weiter sind eine gute Kenntnis des Realitätsbereiches sowie gewisse Erfahrungen notwendig.
- Neben der geschilderten Gefahr wird das beschriebene Vorgehen z.T. als eine Einschränkung der Modell-Freiheit empfunden. Diese Betrachtungsweise ist einseitig. Für ein zielgerichtetes, effizientes Vorgehen muss eine konkrete Vorstellung über die nächsten Vorgehensschritte vorhanden sein.

Das hier vorgestellte Such-Konzept lässt sich auch als eine gewisse Art von Versuchsplanung, kombiniert mit einer Heuristik, bezeichnen. Das Entscheidende sind die Startwerte für die Suche nach dem Optimum bzw. als Basis für die Versuchsplanung.

Mögliche zusätzliche Anwendungen zur Optimierung für das in diesem Kapitel beschriebene heuristische Such-Konzept sind: Leitstände, Steuerungen oder die Routenplanung.

9. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Mit der vorliegenden Arbeit wurde ein Beitrag zur Steigerung der Effizienz und der Qualität bei der Simulations-Anwendung dargelegt. Grosse Teile der in dieser Arbeit behandelten Schwerpunkte sind punktuell sowie jeweils auch als Ganzes inzwischen erfolgreich in der Praxis eingesetzt worden.

Durch ein systematisches und methodisch richtiges Anwenden der Simulation wird zudem auch die Akzeptanz und die Verbreitung der Simulation nachhaltig gefördert. Im speziellen wurde, basierend auf einer Konzeption für das Vorgehen bei der Simulations-Anwendung, auf folgende Themenkreise eingegangen:

- die Parameter-Reduktion
- die vorausgehende strategische Versuchsplanung und
- die Startwertfestlegung für die anschliessende Suche bei der Optimierung

Gleichzeitig galt es, die bislang im Rahmen der Simulation noch wenig berücksichtigten Qualitätskriterien und -merkmale zu erfassen, sowie sie in die einzelnen Vorgehensschritte zu integrieren.

Ziel und Zielerreichung der Arbeit

Das grundsätzliche Ziel dieser Arbeit war es, den Nutzen und die Effizienz von Simulations-Anwendungen praxisorientiert zu steigern. Dabei sollte das Ergebnis nicht auf spezielle Probleme oder auf ein spezifisches Simulations-Paket appliziert sein.

Es ist gelungen, die Simulations-Anwendung methodisch und qualitativ in einem Vorgehensmodell darzustellen. Daneben wurde das Instrumentarium der Simulation durch weitere Bestandteile wie faktorielle Versuchsplanung, Parameter-Reduktion etc. ergänzt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Bestimmung eines "guten" Optimums mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methode markant weniger Rechenläufe erfordert als dies bei einer konventionellen Vorgehensweise der Fall ist. Damit ist eine Effizienzsteigerung bei guter und bekannter Qualität für die Simulations-Anwendung erreicht worden.

Die Resultate dieser Arbeit sind nicht als eine abschliessende Lösung zu verstehen. Sie sind als ein Schritt in die richtige Richtung - hin zu der Praxis - zu betrachten.

Tendenzen, Ausblick zur Simulations-Anwendung

Zum Abschluss der Arbeit soll aus heutiger Sicht gezeigt werden, wo Defizite der Simulation liegen und welche Tendenzen innerhalb der "Simulations-Szene" vorherrschen. Im danach folgenden letzten Unterkapitel dieser Arbeit werden daraus einige weiterführende Fragestellungen und Aufgaben für die Zukunft abgeleitet.

Die gegenwärtig auftretenden Hauptschwierigkeiten der Simulations-Verbreitung sind die inzwischen zahlreich vorhandenen "resignierten" und "ernüchterten" ehemaligen Anwender. Diese Probleme können nur durch eine seriöse und praxisorientierte Schulung und Beratung als auch durch eine kompetente Projektbegleitung behoben werden.

Folgende Schlüsse über die wesentlichen Mängel bei der Simulations-Anwendung zeigen sich:

- Die Simulation ist ein gutes Hilfsmittel, wenn sie methodisch richtig angewendet und für adäquate Probleme eingesetzt wird, sonst verursacht sie nur unnötige Kosten.
- Die Simulation ist i.d.R. nicht das einzig mögliche Lösungs-Hilfsmittel. Jedoch müssen die Alternativen bekannt sein, um sie überhaupt anwenden zu können.
- Die Simulation ist ein "Denkverstärker" oder eine "Antwortmaschine". Sie modelliert und optimiert nicht selbsttätig.
Die Modellbildung ist eine wesentliche Simulations-Voraussetzung, Modellfehler bleiben bei der Simulation erhalten.
Eine Optimierung des zu gestaltenden Systems erfordert eine ständige und gezielte Interaktion zwischen dem Benutzer und der Simulations-SW.
- Die effiziente und qualitativ richtige Simulations-Anwendung braucht ein solides theoretisches Hintergrundwissen und viel Erfahrung.
- Eine mangelnde oder fehlende Dokumentation des Vorgehens wie auch die fehlende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse führen unweigerlich zu einem Qualitätsverlust.

Die zukünftige Etablierung und erfolgreiche Nutzung der Simulation ist erstrebenswert. Folgende Punkte sind dabei als zentral für eine weitere Verbreitung zu bezeichnen:

Bei immer mehr Unternehmen taucht das Bedürfnis auf, die Simulation einzusetzen. Schöne "Demo-Animationen" bergen die Gefahr, dass Simulations-Pakete nicht nach abgeklärten Bedürfnissen, sondern nach Aeusserlichkeiten beschafft und ohne ausreichende Schulung sowie Vorbereitung eingesetzt werden. Die erhaltenen Simulations-Ergebnisse sind deshalb häufig unzureichend und benötigen zu lange bis sie vorliegen. Als Konsequenz erhält die Simulation auf Dauer ein schlechtes Image.

Weiterführende Fragestellungen und Aufgaben

Diese folgende kleine Auswahl an weiterführenden Fragestellungen zeigt deutlich, dass auf dem Gebiet der diskreten ereignisorientierten Simulation noch ein weites Feld an interessanten Forschungsaktivitäten offen ist.

Mögliche Ideen für die Fortsetzung von Forschungsaktivitäten sind:

- Fortsetzung der vorliegenden Arbeit.
Die vorgeschlagene Optimierungs-Heuristik (Such-Konzept) könnte nach entsprechenden Tests formalisiert und gegebenenfalls in ein Simulations-Paket integriert

werden. Dieses sollte in der Lage sein, selbsttätig den jeweils nächsten Suchschritt vorzuschlagen und damit die Parameter für den nächsten Simulationslauf entsprechend zu verändern.

In einem weiteren Schritt wäre dann zu untersuchen, ob diese Verfahren nur für die Groboptimierung, für welches es in der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde, geeignet ist oder ob es sich zu einem Instrument der Feinoptimierung weiterentwickeln bzw. ergänzen lässt.

- Untersuchung über Formen, Aussehen und Eigenschaften von Ergebnis- bzw. Zielräumen und -flächen.

Sind alle denkbaren Zielräume/-flächen auch in der betrieblichen Praxis (Realität) möglich?

Was sind die Eigenschaften und Charakteristika praxisrelevanter Zielräume/-flächen? Sind die von gewissen Fragestellungen ausgehenden Zielräume/-flächen einfacher bzw. harmonischer als andere?

These: In der Praxis gibt es keine beliebigen Zielräume/-flächen.

- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Simulation im Vergleich zu den Alternativen.
Wie müsste eine Methode zur vorgängigen Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Simulations-Studien aussehen?
- Ausdehnung auf andere Simulationsgebiete ausserhalb der Produktion, insbesondere auf den Dienstleistungsbereich. Dort wird die Simulation inzwischen zwar eingesetzt, aber es gibt noch viele Defizite in der Anwendung. Der Grund dafür liegt, im Vergleich zur Fertigung, in weniger klar organisierten und definierten Abläufen, sowie in stark streuenden Zeiten, die je Tätigkeit benötigt werden.
Welche zusätzlichen Anforderungen ergeben sich daraus für die Simulations-Anwendung bezüglich z.B. der Aussagequalitäten?

Trotz einer Vielzahl von Veröffentlichungen zu und über die Simulation sind die Aspekte und Bedürfnisse der Anwender in der Praxis häufig nur ungenügend berücksichtigt.

Weitere Arbeiten auf dem Gebiet der Simulation könnten folglich nicht nur die Verbreitung und sinnvolle Verwendung steigern, sondern damit auch die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen nachhaltig aktivieren.

* * *

ANHANG

	Seite
1. Auszüge aus MAP1/TESS-Handbuch	1
2. Fallbeispiel: Webmaschinen-Teileproduktion	5
2.1 Ausgangslage	5
2.2 Projektergebnisse	5
3. Fallbeispiel: Theodoliten-Marktversorgung	7
3.1 Ausgangslage	7
3.2 Projektergebnisse	8
4. Spezifisches Abkürzungsverzeichnis	11
5. Abbildungsverzeichnis	13
6. Tabellenverzeichnis	15
7. Literaturverzeichnis	17
Lebenslauf	

1. AUSZÜGE AUS MAP1/TESS-HANDBUCH

Teil = PART

<u>Field</u>	<u>Meaning</u>
part type name	the name by which this part type is called
part type priority	the priority of parts used to order parts waiting at stations
part type interarrival time	the time between arrivals of lots of parts to the model for parts representing raw materials
first part arrival time	the time the first lot of parts arrives for parts representing raw materials
arriving lot size	the number of parts in each lot which arrives at each part arrival time
expected flowtime	the expected amount of time a part of this type will be in the model

Station = STATION

<u>Field</u>	<u>Meaning</u>
station name	the name of the station at which parts are processed
station size	the number of machines or processing units which process parts at the station
preprocess inventory storage space	the number of parts of any type which can be stored awaiting processing at this station
postprocess inventory storage space	the number of parts of any type which can be stored following processing at this station
material handling class	the class of material handling equipment which removes processed parts from this station
material handling equipment name	the name of the material handling equipment which removes processed parts from this station
transportation lot size	the number of parts removed by a transporter of this type

Input Statement: STATION (continued)

<u>Field</u>	<u>Meaning</u>
excess rule	the rule for specifying what to do with parts which arrive on regular transporters when the preprocess inventory storage space is full
shift schedule identifier	the number of the shift schedule which describes "on shift" and "off shift" time periods for this station
end of shift rule	the rule for station operation when the expected processing or setup time will exceed the end of shift
(maximum overtime)	the maximum amount of time which the station will work past the end of shift
operation mode	the station's mode of processing parts
operation mode parameters	the rules for station operation for ASSEMBLE and PRODUCE stations

Transportmittel = TRANSPORTER

<u>Field</u>	<u>Meaning</u>
transporter type name	the name of the type of transporter which is being defined
number of transporters	the number of transporters of this type which are available
transportation time	the time required to move a lot between stations with this type of transporter
response time	the time required for a transporter of this type to respond to a station which has a lot which needs to be transported
shift schedule identifier	the number of the shift schedule which describes "on shift" and "off shift" time periods for this station
transporter velocity	the speed of the transporter (used with distance values to calculate transportation times or response times)

2. FALLBEISPIEL: WEBMASCHINEN-TEILEPRODUKTION

Der Partner war die Gebrüder Sulzer AG, Sulzer Rüti Produktbereich Webmaschinen, Produktion Werk Zuchwil bei Solothurn. ¹

2.1 Ausgangslage

Aufgrund einer verschärften Konkurrenzsituation müssen rechtzeitig Anpassungen an der unternehmerischen Einheit getroffen werden.

Einerseits muss die Kapazität und die Fertigungstiefe reduziert werden und andererseits sollen autonome Fertigungseinheiten für die einzelnen Teilefamilien entstehen. Dabei soll die Produktion nach Teilefamilien neu strukturiert bzw. unter dem Gesichtspunkt von Fertigungsinseln neu gegliedert werden.

Spezifische Ziele dieses Teilprojektes:

- Erstens muss die Produktion organisatorisch angepasst werden, um kürzere Durchlaufzeiten und eine höhere Transparenz (einfache Strukturen) zu ermöglichen.
- Zweitens dürfen die Produkte nicht zusätzlich verteuert werden. Das wiederum erfordert eine starke Senkung der Bestände, um Kapital freizusetzen.
- Eine generelle Erhöhung der Flexibilität durch Senkung der Losgrößen.
- Die logistischen Ablauf- und Strukturfragen sollen dabei mit Hilfe von Simulationen optimiert und abgesichert werden.

Im speziellen wurde ein ausgesuchtes Sortiment mit ca. 170'000 h/Jahr in die Simulationsuntersuchung einbezogen.

Dieses Spektrum enthält ca. 130 Teilevarianten, davon ca. 100 Serviceteile. Betroffen sind rund 170 Maschinen, die nach dem Werkstättenprinzip organisiert sind. Die Teilefertigung erfolgt an Lager. Die Durchlaufzeit der in dieser Studie betrachteten Teilefamilie liegt bei durchschnittlich 106 Tagen (2-Schichtbetrieb) mit ca. 37 Operationen und einer mittleren Losgrösse von 350 Stück. Als Repräsentanten wurden 13 Teile festgelegt.

2.2 Projektergebnisse

Mit Hilfe der Simulation wurde eine Versuchsreihe mit verschiedenen jährlichen Ausstossraten und mit verschiedenen Losgrößenbegrenzungen durchgeführt. Diese Versuche ergeben, dass bei einer Losgrößenbegrenzung nach Arbeitsinhalt auf 400 h pro Jahr

¹ Dieses Fallbeispiel wurde im Rahmen eines KWF-Projektes durchgeführt. Die Zusammenfassung stammt aus dem entsprechenden Schlussbericht, vgl. SCHMIDHEINY et al 93.

die besten Werte für die Durchlaufzeiten sowie für den Bestand an Ware in Arbeit entstehen.

Sämtliche Pufferbestände weisen regelmässige Schwankungen auf. Es entsteht aber an keiner Station ein permanenter Engpass.

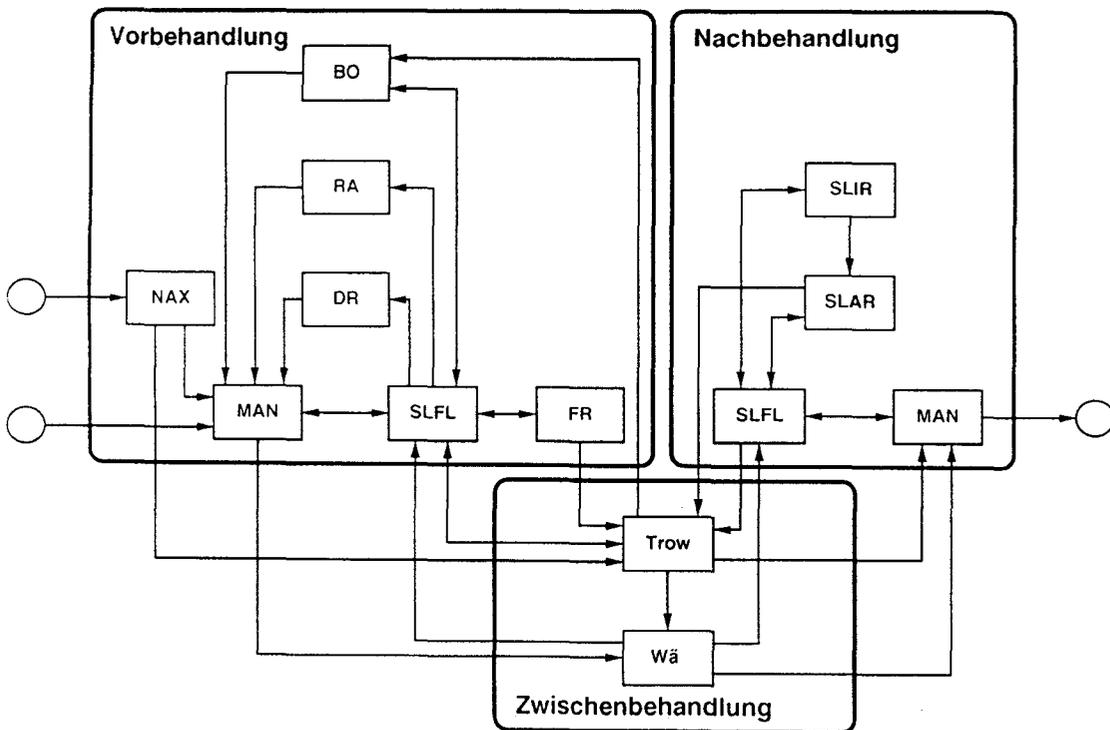


Bild 21: Modellkonzept einer vorgeschlagenen Fertigungsinsel

Simulationsspezifischer Nutzen

- Test des Vorgehensmodells nach Kapitel Nr. 4.
- Untersuchung des dynamischen Verhaltens inkl. Auswirkungen mit Simulation im Vergleich zu einer konventionellen Planung auf Basis von statischen Rechnungen

Industriespezifischer Nutzen

- Ueberprüfung der bestehenden Ideen. Sicherheit bezüglich der Machbarkeit dank Durchführung der Simulation.
- Zusätzliche Konzeptvarianten für die Inselbildung mit kleineren Inselgrössen. Statt den ursprünglich geplanten 2 Inseln werden im geplanten Bereich 9 Inseln realisiert.

- Kleinere nach Arbeitsstunden, nicht auf Stückzahl, begrenzte Losgrößen
- Massiv kürzere Durchlaufzeiten und eine Reduktion der Ware in Arbeit

Sulzer Rüti hat einen Grossteil der Ergebnisse aufgegriffen. Im Anschluss an diese Studie wurden weitere Teile der Fabrik auf Potentiale untersucht. Als erstes wird eine Pilotinsel realisiert. Die gesamte Umsetzung der 9 Inseln wird sich bis Mitte 1996 erstrecken.

3. FALLBEISPIEL: THEODOLITEN-MARKTVERSORGUNG

Der Partner war die Leica AG Heerbrugg.²

Dieses Projekt wurde seitens des BWI von den Herren M. Schmid und H. Schmidheiny mit Unterstützung von P. Acél durchgeführt. Das Projekt war ein umfassender, erfolgreicher Test für das Vorgehen in der Simulations-Anwendung in Verbindung mit der statistischen Versuchsplanung, wie sie in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagen werden (Kapitel Nr. 4. und Nr. 7.6).

3.1 Ausgangslage

Die Leica AG als global tätiges Vielprodukteunternehmen muss sich neben den verschiedenen Produkten auch mit verschiedenartigen Märkten und unterschiedlichen, mehrstufigen Vertriebsstrukturen auseinandersetzen. Aus dieser komplexen Vertriebssituation ergeben sich durch die zeitlich späten und (teilweise mehrfach regional) gefilterten Marktinformationen Schwachpunkte, die sich dann in der mangelnden Lieferfähigkeit und/oder in den Beständen zeigen. Am Markt herrscht die Situation, dass ein Käufer einzelne Produkte ohne Wartezeit beansprucht, andernfalls geht er zur Konkurrenz. Da die Wiederbeschaffungsfristen an der Schnittstelle zum Kunden mehrere Wochen betragen, ist ein Lager notwendig.

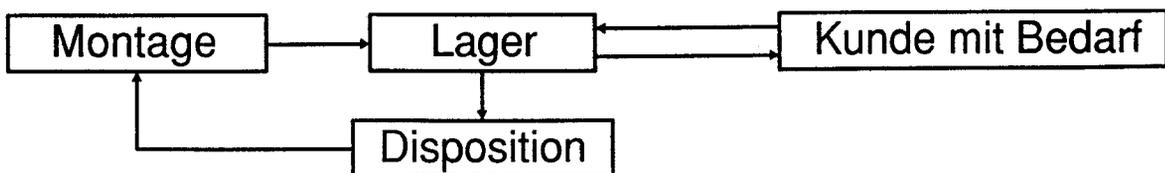
Die Simulation soll hier zur Betrachtung allgemeiner Wirkzusammenhänge dienen. Das Hauptziel lautet: hohe Verfügbarkeit mit einem Minimum an Kosten. Die Kosten ergeben sich aus den Beständen, den Transportkosten, der Disposition und der Auftragsabwicklung. Erschwerend ist, dass die Betrachtungen auf einem Spektrum möglicher Nachfrageverläufe erfolgen soll.

Um den Einfluss der Stell-Grössen zu identifizieren, wurde ein 2^n+1 Mehrfaktorenversuch angewendet. Das verwendete Modell ist im folgenden Bild dargestellt. Die untersuchten Stell-Grössen waren: die Montage-Durchlaufzeit (1 oder 6 Wochen), die Kapazitätsflexibi-

² Dieses Fallbeispiel wurde im Rahmen eines KWF-Projektes durchgeführt. Die Zusammenfassung stammt aus dem entsprechenden Schlussbericht, vgl. SCHMIDHEINY et al 93.

lität der Montage (120 oder 160 %), der Sicherheitsbestand im Verkaufs-Lager (2 oder 6 Wochen) und der Glättungsfaktor in der Planung (0.1 oder 0.5) sowie der Variationskoeffizient der wöchentlichen Kundennachfrage (0.2 oder 0.6). Der Kundennachfrage wurde generell eine saisonale Schwankung (+/- 20 %) beaufschlagt.

Modell:



- Ziel:** 1.) Verfügbarkeit ab Lager in % (vgl. Tabelle Nr. 25)
2.) ...

Einstellgrößen:

		⊖	∅	⊕
B:	Varianz Bedarf	0,6	0,4	0,2
E:	Sicherheitsbestand	2 Wo.	4 Wo.	6 Wo.

Bild 22: Modell Marktversorgung (vereinfacht)

Für die Simulation wurde im Gegensatz zu den anderen Beispielen kein ereignisorientiertes Simulations-Paket, sondern ein Tabellenkalkulationsprogramm eingesetzt. Die Simulation erfolgte auf Wochen-Basis. Lieferrückstände wurden mitgeführt bis sie ausgeglichen waren.

3.2 Projektergebnisse

Die Auswertung der Versuche ergibt für die untersuchten Parameter-Bereiche folgende Rangfolge der Wichtigkeit, bezogen auf die Lieferfähigkeit:

1. Variationskoeffizient des Bedarfs (B)
2. Sicherheitsbestand (E)
3. komplexe Wirkung von Variationskoeffizient (B) und Sicherheitsbestand (E)

mit Abstand gefolgt von

- Montage-Durchlaufzeit (C)
- Kapazitätsflexibilität der Montage (D)
- Glättungsfaktor der Disposition (A)

Nr.	O	A	B	C	D	E	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE	ABC	ABD	ABE	ACD	ACE	ADE	BCD	BCE	BDE	CDE	ABCD	ABDE	ABCE	ACDE	BCDE	ABCDE	Ergebnis
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100
2	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	95	
3	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	100	
4	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	95	
5	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	100	
6	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	98	
7	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	100	
8	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	99	
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	95	
10	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	70	
11	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	96	
12	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	72	
13	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	97	
14	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	74	
15	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	100	
16	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	86	
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	93	
18	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	69	
19	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	99	
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	81	
21	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	96	
22	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	77	
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	99	
24	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	92	
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	
26	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	97	
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	
28	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	99	
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	
30	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	100	
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	
32	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	100	
Null-Lauf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
/Σ2	93,1	-0,8	+5,8	-1,8	-1,8	+5,3	+0,2	-0,2	+0,6	+0,8	+1,1	+1,6	-4,3	+0,3	+1,2	+1,0	-0,0	-0,5	-0,3	+0,5	-0,0	-0,3	-0,4	-0,5	-0,8	-0,4	-0,3	+0,2	+0,2	-0,2	+0,5	-0,0	Summe

Reihenfolge B E BE C D BD CE BC DE AE A BDE AD ABD ACD BCE BCDE BCD CDE CD ABE ADE ACE ABC AC ABCE ABCE ACE ABCDE
 5,8 5,3 4,3 1,8 1,8 1,6 1,2 1,1 1,0 0,8 0,8 0,8 0,8 0,8 0,6 0,5 0,5 0,5 0,4 0,4 0,3 0,3 0,3 0,3 0,3 0,2 0,2 0,2 0,2 0,2 0,0 0,0 0,0

Tabelle 25: Voller Versuchsplan

Die Abstimmung des Sicherheitsbestandes auf den Variationskoeffizienten der Nachfrage wirkt demnach stärker auf die Verfügbarkeit als beispielsweise die Montage-Durchlaufzeit. Weiter hat sich gezeigt, dass die Variation von Planungsart und Montage-Durchlaufzeit bei hoher Kapazitätsflexibilität einen erheblichen Einfluss auf die erreichbare Verfügbarkeit hat. Dagegen ist die Wirkung bei geringer Kapazitätsflexibilität nur beschränkt.

Die Beurteilung der Einflussfaktoren hat gezeigt, dass insbesondere der Nachfrageverlauf von grosser Bedeutung ist. Gelingt es mit spezifischen Marketing-Massnahmen den Variationskoeffizienten der Nachfrageverteilung zu senken, dann kann unter identischen Voraussetzungen entweder eine markant höhere Verfügbarkeit erreicht oder bei gleicher Verfügbarkeit mit einem geringeren Sicherheitsbestand operiert werden.

Für weitere Details und Ergebnisse siehe die Abschnitte Nr. 7.6.4 "Auswertung von 2ⁿ-Versuchen" und 7.6.5 "Ergebnisdarstellung" sowie den KWF-Schlussbericht, vgl. SCHMIDHEINY et al 93 und auch SCHMID 95, S. 207 ff.

4. SPEZIFISCHES ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	Jahr
Anz	"Anzahl"
AS	"Aktivsumme", vgl. Abschnitt Nr. 6.2.3 Beeinflussungsmatrix
ASIM	"Arbeitsgemeinschaft Simulation", Fachbereich 4.5 Simulation in der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)
AT	"Arbeitstage"
Ausl	"Auslastung"
AZ	Zielwert bei A
BO	"Bohren", Fertigungstechnologie
BWI	"Betriebswissenschaftliches Institut" der ETH Zürich
BZ	"Bearbeitungszentrum" für Dreh- oder Fräsbearbeitung
CIM	"Computer Integrated Manufacturing"
DLZ	"Durchlaufzeit"
DR	"Drehen", Fertigungstechnologie
ED	"Ersatzteil-Dienst"
EDV	"Elektronische Datenverarbeitung / Computer"
Einh	"Einheit"
EVM	"Expected Value Model", theoretischer Erwartungswert, vgl. PERRY, HOOVER, FREEMAN, 84, S. 351.
ext	"extern"
FIFO	"First in first out", Prioritätsregelung
FG	"Fixe-Grösse", vgl. Kapitel Nr. 6.1 Parameter-Reduktion, Grundlagen
FR	"Fräsen", Fertigungstechnologie
h	"Stunde / Stunden"
HW	"Hardware", Computer und Peripherie
i.e.S.	"Im engeren Sinn"
IFOR	"Institut für Operations Research" der ETH Zürich
int	"intern"
ITT	"Institut für Textilmaschinenbau und Textilindustrie" an der ETH in Zürich

KG	"Kontroll-Grösse", vgl. Kapitel Nr. 6.1 Parameter-Reduktion, Grundlagen
M	"Monteur"
MAN	"Manuelle Bearbeitung"
NAX	"Nexus-Schleifen", Fertigungstechnologie
Nr	"Nummer"
OP	"Operations-Plan"
OR	"Operations Research"
P	"Prüfer"
PPS	"Produktions-Planungs- und Steuerungs-System", SW-Paket
PS	"Passivsumme", vgl. Abschnitt Nr. 6.2.3 Beeinflussungsmatrix
RA	"Räumen", Fertigungstechnologie
SE	"Systems Engineering", vgl. BÜCHEL 90, Teil Systems Engineering I und II sowie HABERFELLNER et al 92
SG	"Stell-Grösse", vgl. Kapitel Nr. 6.1 Parameter-Reduktion, Grundlagen
SLAR	"Aussenrund-Schleifen", Fertigungstechnologie
SLFL	"Flach-Schleifen", Fertigungstechnologie
SLIR	"Innenrund-Schleifen", Fertigungstechnologie
SR	"Sulzer Rüti", Webmaschinen
Stk	"Stück"
Sum	"Summe"
SW	"Software" Computer-Programme und Programm-Pakete
t	Zeit
TRAN	"Transporter"
Trow	"Trowalisieren", Fertigungstechnologie
VDI	"Verband Deutscher Ingenieure"
Wä	"Wärmebehandlung"
WiA	"Ware in Arbeit"
Wo	"Woche/Wochen"
Z	"Zielwert"
ZG	"Ziel-Grösse", vgl. Kapitel Nr. 6.1 Parameter-Reduktion, Grundlagen

5. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Bild 1	
Betrachtungsebenen der Simulation	15
Bild 2	
Einsatzebenen der Simulation in der Betriebsplanung	19
Bild 3	
Simulations-Anwendung nach Projektlebensphasen	22
Bild 4	
Wissens-Gewinn durch Simulation	22
Bild 5	
Zeitliche Aufwandsverteilung in Prozenten beim Simulations-Einsatz	26
Bild 6	
Darstellung eines Modells für die Simulation	31
Bild 7	
Vorgehen nach ASIM (ASIM 87, S. 2)	46
Bild 8	
Vorgehen nach VDI-Richtlinie 3633 (VDI-Richtlinie 3633, S. 10)	48
Bild 9	
Vorgehen nach SHANNON (SHANNON 75, S. 24)	49
Bild 10	
Einordnung der Simulations-Anwendung in das SE	53
Bild 11	
Vorgehen in der Simulations-Anwendung	55
Bild 12	
Allgemeine Problematik der Zielwert-Optimierung (Vogt 81, S. 260)	65
Bild 13	
Versuchsführungs-Strategien	68
Bild 14	
2D-Darstellung der 2 ⁿ -Versuchsergebnisse für "B" mit "E" (vgl. Tabelle Nr. 20)	124

Bild 15	
3D-Darstellung von den 2^n+1 -Versuchsergebnissen für "B" mit "E"	126
Bild 16	
Versuchs-Strategie für 2^n+1 -Versuchsreihen	127
Bild 17	
Mann am Berg (nach WILDE 64, S. 127)	138
Bild 18	
Konventionelles Vorgehen (bottom up)	141
Bild 19	
Such-Konzept (top down vom theoretischen Ziel)	142
Bild 20	
Such-Strategie des Such-Konzeptes mit zwei Stufen	144
Bild 21	
Modellkonzept einer vorgeschlagenen Fertigungsinsel	Anhang 6
Bild 22	
Modell Marktversorgung (vereinfacht)	Anhang 8

6. TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
Tabelle 1	
Gliederung der Dissertation	8
Tabelle 2	
Einsatzgebiete der diskreten Simulation	16
Tabelle 3	
Aufgabenfelder der Simulation (nach GROSSESCHALLAU 84, S. 190)	23
Tabelle 4	
Unterschiedliche Methoden im Vergleich	28
Tabelle 5	
Vergleich analytischer Ansatz und Systemansatz (vgl. VESTER 80, S. 43 nach J. DE ROSNAY, "Das Makroskop", Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1977)	30
Tabelle 6	
Physische Elemente (vgl. GEHRING 81, S. 24 f.)	33
Tabelle 7	
Beziehungen zwischen Elementen	33
Tabelle 8	
Beispiel für eine Versuchsmatrix	58
Tabelle 9	
Aufbau des Schemas für die Prioritätsmatrix	82
Tabelle 10	
Aufbau des Schemas für die Beeinflussungsmatrix	83
Tabelle 11	
Aufbau der Abhängigkeitsmatrix	86
Tabelle 12a	
Beispiel Grössen-Reduktion, 1. Stufe	90
Tabelle 12b	
Beispiel Grössen-Reduktion, 1. Stufe	91
Tabelle 12c	
Beispiel Grössen-Reduktion, 1. Stufe	92

Tabelle 12d	
Beispiel Grössen-Reduktion, 1. Stufe	93
Tabelle 13	
Beispiel Prioritätsmatrix	94
Tabelle 14	
Beispiel Grössen-Reduktion, 2. Stufe	95
Tabelle 15	
Beispiel, Grössen-Reduktion 3. Stufe	96
Tabelle 16a	
Beispiel Grössen-Reduktion ZG und KG, Ergebnis	97
Tabelle 16b	
Beispiel Grössen-Reduktion SG, Ergebnis	97
Tabelle 16c	
Beispiel Grössen-Reduktion FG, Ergebnis	98
Tabelle 17	
Vollständiger Versuchsplan 2^n ($n = 3$)	115
Tabelle 18	
Beispiel eines reduzierten Versuchsplanes 2^{n-k} mit Null-Versuch ($n = 5, k = 2$)	118
Tabelle 19	
Identifikation der Vermengung am Beispiel eines reduzierten Versuchsplanes 2^{n-k} ($n = 5, k = 2$)	119
Tabelle 20	
Beispiel eines reduzierten Versuchsplanes 2^{n-k} mit Ergebnissen und Null-Versuch ($n = 5, k = 2$)	121
Tabelle 21	
Ergebnisvergleich zwischen zweifach vermengtem und vollem Versuchsplan	123
Tabelle 22	
Beispiel eines modifizierten Versuchsplanes als Vorarbeit zu einer 3D-Darstellung	125
Tabelle 23	
Voller Versuchsplan	Anhang 9

7. LITERATURVERZEICHNIS

- ACÉL P.** 1992: "Systems Engineering und Simulation", Tagungsband: Simulation - Ein Blick in die Zukunft, Hrsg. BWI/IFOR, ETH, Zürich, 25. Nov. 1992
- ACÉL P., GREGOR M., HRDLICZKA V.** 1993: "Simulation in der Produktion", Vorlesungsunterlagen, BWI, ETH, Zürich
- ACÉL P.** 1995: "Effizient simulieren", Tagungsband zweiter Tag: Innovation durch Simulation - Praxis, Methodik und Werkzeuge, Hrsg. BWI/IFOR, ETH, Zürich, 9. März 1995
- ASIM** 1987: "Leitfaden für Simulations-Benutzer in der Fertigung", Arbeitskreis Simulation in der Fertigung
- BÄCK T., HAMMEL U., SCHWEFEL H.-P.** 1993: "Modelloptimierung mit evolutionären Algorithmen", in "Fortschritte in der Simulationstechnik" Band 6, Tagungsband 8. Symposium der ASIM in Berlin, S. 49 - 57, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, Hrsg. Sydow A.
- BEHRENDT V.** 1974: "Zur Strukturierung komplexer Realsysteme: Methodische Ansätze und Anwendungen am Beispiel einer Bedarfsfluggesellschaft", Dissertation, erschienen: Forschungsreihe Systemtechnik Bericht 5/1975 Funktionsanalyse in der Systemtechnik, Technische Universität Berlin Brennpunkt Systemtechnik
- BHOTE R.** 1990: "Qualität - Der Weg zur Weltspitze", Institut für Qualitätsmanagement, Grossbottwar, Titel der amerikanischen Ausgabe "World Class Quality", Hrsg. American Management Association, New York, 1988
- BIBERSCHICK D.** 1974: "Heuristische Methoden in der Betriebsplanung", Habilitation Technische Hochschule Wien
- BÜCHEL A.** 1990: "Betriebswissenschaftliche-Methodik", Lehrschrift, BWI, ETH, Zürich
- CHEN B.** 1990: "Experimentelle Optimum-Suchstrategien auf der Basis der Computersimulation zur Unterstützung betriebswirtschaftlicher Entscheidungen", Europäische Hochschulschriften, Reihe 5 Volks- und Betriebswirtschaft, Band 1119, Peter Lang-Verlag, Frankfurt
Zugleich: Dissertation, Göttingen, 1989
- CHEN B.** 1991: "Computersimulation als universelle Methode für die optimale betriebswirtschaftliche Entscheidungssuche", in Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe, Band 2, S. 187 - 210, Springer-Verlag, Berlin, Hrsg. Biethahn J., Hummeltenberg N., Schmidt B.

-
- FORRESTER J.W.** 1972: "Grundsätze einer Systemtheorie", Org. "Principles of Systems", Betriebswirtschaftlicher-Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden
- GEHRING H.** 1981: "Stochastik/Simulation", Operations Research, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Kurseinheit 14, Fernuniversität Hagen
- GROSSESCHALLAU W.** 1984: "Materialflussrechnung. Modelle und Verfahren zur Analyse und Berechnung von Materialflusssystemen", Habilitationsschrift, Springer-Verlag, Berlin, Hrsg. Jünemann R., Pfohl H.-CH.
- GRUBER J.** 1968: "Oekonometrische Modelle des Cowles-Commission-Types: Bau und Interpretation", Verlag Paul Parey, Hamburg
- HABERFELLNER R., Nagel P., Becker M., Büchel A., v. Massow H.** 1992: "Systems Engineering", 7. Auflage, Verlag Industrielle Organisation, Zürich, Hrsg. Daenzer W.F., Huber F.
- HENZLER D.H., HEIDBREder U.W.** 1989: "Praxis des Objekt Management", Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech
- HUBER F.** 1991: "Betriebsorganisation", Lehrschrift, BWI, ETH, Zürich
- HUBER F.** 1992: "Produkt- und Prozessinnovation", Lehrschrift, BWI, ETH, Zürich, bearbeitet durch Spoerri P.
- HUBKA V.** 1984: "Theorie Technischer Systeme", 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- ITT** 1987: "Mehrfaktoren-Versuch", Dokumentation des Instituts für Textilmaschinenbau und Textilindustrie an der ETH, Zürich
- KAPFER W.** 1992: "Quo vadis, Versuchsmethodik?", S. 64 - 65, aus Zeitschrift Qualität und Zuverlässigkeit, Jahrgang 37, Heft 2, Carl Hanser-Verlag, München
- KAPOUN J.** 1988: "Techniken der Simulation zur Optimierung unternehmerischer Planungs-, Gestaltungs- und Steuerungsaufgaben, insbesondere in Fertigungs- und Logistikbereichen. Eine praktische Uebersicht", Band 1, Lausanne
- KLEPPMANN W.G.** 1992: "Statistische Versuchsplanung - Klassisch, Taguchi oder Shainin?", S. 89 - 92, aus Zeitschrift Qualität und Zuverlässigkeit, Jahrgang 37, Heft 2, Carl Hanser-Verlag, München
- KOXHOLT R.** 1971: "Simulation", Management Enzyklopädie Band 5, Moderne Industrie, München, S. 328 - 345
- KROTTMAIER J.** 1991: "Versuchsplanung: Der Weg zur Qualität des Jahres 2000", Praxiswissen für Ingenieure, 2. Auflage, Verlag Industrielle Organisation, Zürich und Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln

-
- LINDER A. 1953:** "Planen und Auswerten von Versuchen. Eine Einführung für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure", Verlag Birkhäuser AG, Basel
- LINDER A. 1955:** "Über das Planen von Versuchen", S. 73 - 86, aus "Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich", Heft 2, Jg. 100, Hrsg. Steiner H., nach dem am 22.11.54 in der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich gehaltenen Vortrag
- METZLER V., ACÉL P. 1987:** "Simulation - Mittel für die Planung und Steuerung einer Fabrik", Tagungsband CAT87, Computerunterstützte Technologien in der Fertigungsindustrie, 3. Internationale Fachausstellung und Anwenderkongress, Stuttgart
Zweitveröffentlichung: "Computer-Simulation, Mittel für die Planung und Steuerung einer Fabrik", Rubrik Schweizer Spitzentechnik, mav (Maschinen Anlagen Verfahren), Heft September 87
- MINER R.J., ROLSTON L.J. 1986:** "MAP1 Users Manual", Version 3.1, Pritsker & Associates, Inc., West Lafayette, Indiana
- MÜLLER H.W. 1992:** "Quality Engineering - ein Überblick über neuere Verfahren", S. 275 - 298, aus "Qualität als Managementaufgabe = Total Quality Management", Verlag Moderne Industrie, 2. Auflage, Landsberg/Lech, Hrsg. Zink K.J.
- NOCHE B. 1990:** "Simulation in Produktion und Materialfluss: Entscheidungsorientierte Simulationsumgebung", TÜV Rheinland-Verlag, Köln
Zugleich: Dissertation, Dortmund, 1989
- PERRY R.F., HOOVER S.V., FREEMAN D.R. 1984:** "An Optimum Seeking Approach to the Design of automated Storage/Retrieval Systems", Proceedings, 1984 Winter Simulation Conference, Boston, S. 349 - 354
- QUENTIN H. 1989:** "Statistische Versuchsmethodik", S. 229 - 232, aus Zeitschrift "Qualität und Zuverlässigkeit", Jahrgang 34, Heft 5, Carl Hanser-Verlag, München
- RASCH D., GUIARD V., NÜRNBERG G. 1992:** "Statistische Versuchsplanung", Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart
- RICHTER K., BACHMANN P., DEMPE S. 1988:** "Diskrete Optimierungsmodelle. Effektive Algorithmen und näherungsweise Lösung", Verlag Technik Berlin
- RIPPIN D.W.T. 1991:** "Mathematische- & System-Methoden", Teil 4: Bestimmung des Wichtigkeitsgrades - Der Entwurf von Experimenten, Lehrschrift WS 91/92, Institut Technische Chemie, ETH, Zürich

-
- SCHLOSSER H.** 1979: "Beitrag zur Simulation der wirtschaftlich optimalen Auslegung verfahrenstechnischer Anlagen unter Berücksichtigung der Parametersensitivität", Dissertation, Abt. Chemietechnik, Universität Dortmund
- SCHMID M.** 1995: "Analyse und Optimierung der Marktversorgung des Vorratsfertigers - Eine logistische Systembetrachtung", Dissertation, BWI, ETH, Zürich
- SCHMIDHEINY H., ACÉL P., AMMANN J., SCHMID M.** 1993: Bericht KWF-Projekt 2238, "Optimierung der logistischen Kette international tätiger Viel-Produkte-Firmen", BWI, ETH, Zürich
- SCHOOFS A.J.G.** 1987: "Experimental Design and structural Optimization", Dissertation, Eindhoven
- SCHWEFEL H.-P.** 1977: "Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie. Mit einer vergleichenden Einführung in die Hill-Climbing- und Zufallsstrategien", Interdisciplinary Systems Research Nr. 26, Birkhäuser-Verlag, Stuttgart
- SHANNON R.E.** 1975: "Systems Simulation: The Art and Science", Prentice-Hall, Englewood Cliffs
- VDI-Richtlinie 3633:** "Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Grundlagen", Blatt 1, Entwurf, VDI-Handbuch "Materialfluss und Förder-technik", 1992, Düsseldorf
- VESTER F.** 1976: "Ballungsgebiete in der Krise", Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart
- VESTER F.** 1980: "Neuland des Denkens", Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart
- VOGT R.** 1983: "Die Systemwissenschaften: Grundlagen und wissenschaftstheoretische Einordnung", Haag + Herchen-Verlag, Frankfurt/Main
- WERLING G.** 1990: "Wo soll der Roboter stehen", Technische Rundschau 14, Bern, S. 88 - 97
- WILDE D.J.** 1964: "Optimum Seeking Methods", Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs
- WINTERGERST D.** 1991: "Methode zur schnellen Optimierung bei der digitalen Simulation", interne unveröffentlichte Studie der ABB Baden, erstellt auf Anregung und unter Leitung von Acél Peter

LEBENS LAUF

Zur Person

Name: Peter Paul Acél
Geboren: 4. Nov. 1959 in Schaffhausen
Zivilstand: verheiratet, 1 Kind
Heimatort: Dällikon / ZH

Schulbildung

1966 - 1972 Primarschule in Dällikon/Zürich
März 1975 Abschluss Sekundarschule (Progymnasium)
Juni 1979 Abschluss am Gymnasium in Gaienhofen (D) mit der
Allgemeinen Hochschulreife
1979 - 1986 Studium an der Technischen Hochschule Karlsruhe;
Fachrichtung Allgemeiner Maschinenbau; Hauptfächer:
Fertigungstechnik, Werkzeugmaschinen, Grundlagen
der Rechneranwendung im Maschinenbau und CAD
17. Okt. 1986 Diplom-Hauptprüfung, Dipl. Masch. Ing. TH

Lehraufträge

an der Abteilung für Betriebs- und Produktionswissenschaften, der ETH Zürich
Seit SS 1993 Simulation in der Produktion
WS 1993/94 Betriebsorganisation II, Teil Fabrikplanung

Berufstätigkeit

Nov. 1986 - Feb. 1991 ABB Produktionstechnik AG, Baden-Dättwil als
Projektleiter und Gruppenleiter; Funktion:
Consultant/Entwicklungsingenieur
März 1991 - heute Stiftung für Forschung und Beratung am Betriebs-
wissenschaftlichen Institut der ETH Zürich als
Mitarbeiter in Forschung, Beratung und Ausbildung
seit April 1995 Leiter der Abteilung Produktion und Logistik und
Mitglied der Geschäftsleitung

Über den Autor ...



Dr. Peter P. Acél studierte Maschinenbau an der TH Karlsruhe mit Abschluss auf den Fachgebieten Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinenbau. Er promovierte 1996 an der ETH Zürich.

Es folgten 5 Jahre als Unternehmensberater, Fachassistent für Betriebsorganisation und Leiter von mehreren Konzernprojekten bei der ABB in Baden. Von 1991 bis 1996 war Dr. Acél an der Stiftung BWI tätig, anfänglich als Projekt- und Expertenleiter und später als Leiter des Beratungsbereiches Produktion + Logistik.

Seit 1996 ist Dr. Acél Mitinhaber und Geschäftsführer der Firma Dr. Acél & Partner AG und nimmt als Dozent an der Abteilung für Betriebs- und Produktionswissenschaften an der ETH Zürich einen Lehrauftrag auf dem Gebiet Simulation in der Produktion und Logistik wahr.

Über diesen Band ...

Die Simulationsanwendung soll schnell und kostengünstig die geforderte Unterstützung bei der Problemlösung liefern. Trotz der hohen Akzeptanz und der zunehmenden Verbreitung der Simulation ist die Praxis immer noch durch eine Vielzahl von Einsatzhemmnissen eingeschränkt: unklare Zielstellungen, mangelnde Versuchsplanungen oder riesige Datenfluten können zu erhöhtem zeitlichen und finanziellen Aufwand führen.

Dieses Buch unterstützt bei der Planung und Durchführung von Simulationsvorhaben und geht besonders auf die Bedürfnisse von Unternehmen und Industrie ein. Es bietet ein effizientes und zielgerichtetes Vorgehenskonzept für die Simulation, eine Systematik zur Reduktion von Parametern, die es gestattet, das Simulationsmodell auf das Wesentliche zu beschränken, sowie einen neuen Ansatz zur schnelleren simulationsunterstützten Optimierung von Parametern.

Über diese Reihe ...

Die Bände dieser neuen ASIM - Reihe Fortschrittsberichte Simulation konzentrieren sich auf neueste Lösungsansätze, Methoden und Anwendungen der Simulationstechnik (Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften, Medizin, Ökonomie, Ökologie, Soziologie, etc.).

ASIM, die deutschsprachige Simulationsvereinigung (Fachausschuss 4.5 der GI - Gesellschaft für Informatik) hat diese Reihe ins Leben gerufen, um ein rasches und kostengünstiges Publikationsmedium für derartige neue Entwicklungen in der Simulationstechnik anbieten zu können.

Die Fortschrittsberichte Simulation veröffentlichen daher: * Monographien mit speziellem Charakter, wie z. B. Dissertationen und Habilitationen * Berichte zu Workshops (mit referierten Beiträgen) * Berichte von Forschungsprojekten * Handbücher zu Simulationswerkzeugen (User Guides, Vergleiche, Benchmarks), und Ähnliches.

Die Kooperation mit den ARGESIM Reports der ARGESIM vermittelt dabei zum europäischen Umfeld und zur internationalen Publikation.