

Ein stochastisches Risikomodell für komplexe Projekte

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

## **Doktoringenieur (Dr.-Ing.)**

angenommen durch die Fakultät für Informatik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von: Dipl. Math.(FH), MSc. Senol Kapici

geboren am: 31.01.1976 in Hof/Saale

Gutachter:

Prof. Dr. Graham Horton

Prof. Dr. Claus Rautenstrauch

Prof. Dr. Oliver Rose

Promotionskollogium: Magdeburg, den 23.09.2005



## Kurzfassung

Die Wettbewerbsfähigkeit von Industrieunternehmen wird gegenwärtig auch dadurch bestimmt, die hohe Komplexität von Prozessen mit der Vielzahl von parallelen und seriellen Teilprozessen zu beherrschen. Die aktive Projektplanung und Kontrolle über komplexe Projektabläufe ist über den gesamten Produktentwicklungszeitraum zwingend notwendig, damit Projektrisiken infolge Zielabweichungen erkennbar werden.

Die Auswertung der Ansätze bekannter Projektplanungstechniken warf eine Vielzahl von Fragen auf, die nur durch eine neue Konzeption beantwortet werden können. Hier setzt diese Arbeit an.

In dieser wird ein neues Modell, das stochastische Risikomodell, zur Abbildung komplexer Projektnetzwerke und eine auf vernetztes Denken basierende Methode zur Analyse des gesamten Projektverlaufes entwickelt.

Dabei werden Expertenwissen und Erfahrungen aus Referenzprojekten mit neuen Erkenntnissen durch gezielte Verwendung der Stochastik ergänzt, um eine verbesserte Annäherung an den tatsächlichen Projektverlauf zu erhalten.

Eine Besonderheit ist die Definition aller signifikanten Vorgänge im Projekt als elementare Prozesseinheiten. Diese Einheiten beinhalten Logiken, um komplexe Abhängigkeiten funktional und qualitativ zu beschreiben und die Dynamik im Projektverlauf zu modellieren. Hierbei werden mögliche Risiken und Chancen einbezogen, um die Eigendynamik der Prozesse offen zu legen.

Darauf aufbauend werden neuartige prozessspezifische Kennzahlen eingeführt, die eine gezielte Projektsteuerung forcieren. Durch diese neuen Größen wie Druck und Ergebnissensitivitäten werden die Rückverfolgung der Verursacherprozesse ermöglicht und die Bestimmung geeigneter Gegenmaßnahmen erkennbar.

Das stochastische Risikomodell erlaubt durch Simulationen die Prognose im Hinblick auf Erreichung von Kosten-, Termin- und Ergebniszielen und gestattet die Ergebnisverfolgung wahrscheinlicher Zielerreichungen prozessschrittweise im ganzen Projekt.

Basierend auf dem neuen Modell wurde ein Modellierungs- und Simulationstool ProViS entwickelt, das eine transparente, leicht überschaubare Abbildung der tatsächlichen und der „Was wäre wenn?“ Projektsituation ermöglicht. Dadurch können Maßnahmen im Modell erprobt und ihre Auswirkung durch geeignete

Visualisierungstechniken transparent gemacht und beurteilt werden. Dies war bisher mit vergleichbaren Systemen in komplexen Projekten nicht möglich.

Das stochastische Risikomodell, umgesetzt im Tool ProViS, unterstützte erfolgreich durch Simulationsexperimente das Entwicklungsprojekt eines Fahrzeugmodells, ist aber universell einsetzbar für die verschiedensten Produktentwicklungsprojekte.

## Danksagung

Viele Menschen haben mich auf verschiedenste Weise bei dieser Arbeit unterstützt.

Herr Professor Graham Horton (Leiter des Lehrstuhls Simulation und Modellbildung, Universität Magdeburg) hat mich durch die wissenschaftliche Begleitung, seine konstruktive Kritik und zahlreiche Diskussionen gefordert. Er hat die Verfolgung der vielen Innovationen ermöglicht. Die Herren Professoren Graham Horton, Claus Rautenstrauch (ebenfalls Universität Magdeburg) und Oliver Rose (Universität Dresden) haben dankenswerterweise die Begutachtung dieser Arbeit übernommen.

Viele neue Ideen schöpfte ich aus der guten Zusammenarbeit in einem großen Entwicklungsprojektarbeitsteam für einen Neuanlauf eines Fahrzeugmodells. In zahlreichen Fachgesprächen mit langjährigen Mitarbeitern des Unternehmens wurden Ideen kreiert, erarbeitet und vertieft. Einen wertvollen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit leisteten sowohl meine zwei direkten Chefs, Herr Eberhard Raess und Herr Manfred Landstorfer, als auch mein Mentor, Herr Dr. Helmut Mössmer. Sie unterstützten nahezu uneingeschränkt mein Ziel, neben meiner Vollzeitbeschäftigung diese wissenschaftliche Arbeit anzufertigen. Sie verschafften mir das nötige Umfeld und schenken mir ihr Vertrauen.

Besonders große Hilfe erhielt ich von den von mir betreuten Diplomanten, den Herren Olaf Wiedmann, Patrick Mahler, Josef Jungwirth und René Chelvier. Ohne deren eifriges Mitwirken, deren Fleiß und Begabung wäre die Arbeit weniger umfangreich und weniger tiefschürfend geworden.

Eine erhebliche Unterstützung bei der Abfassung der Arbeit bekam ich durch Frau Dr. Evelin Paulat. Durch ihr kritisches Hinterfragen als fachfremde Person wurde die Arbeit deutlich kompakter und stilistisch verbessert. Meine Freundin Isabell Paulat hat mich stets unterstützt und mit allen ihren Möglichkeiten sehr stark gefördert. Sie gab mir den Freiraum, die Zuversicht und die Motivation, dass wir diese Doppelbelastung gemeinsam bewältigen konnten. Ihr ungebrochener Blick fürs Detail gab der Arbeit den letzten Schliff.

Ihr und allen Menschen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, gilt mein besonderer persönlicher Dank.



# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	ii
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation: Herausforderung bei großen Industrieprojekten .....	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	3
1.3 Vorgehensweise der Arbeit.....	4
2 Situationsanalyse in komplexen Projekten .....	5
2.1 Übersicht.....	5
2.2 Definition wichtiger Merkmale komplexer Projekte.....	5
2.3 Komplexitätsreduzierung durch Methodeneinsatz .....	9
2.3.1 Wichtige Merkmale der Balanced Scorecard-Methode .....	9
2.3.2 Ursache-Wirkungsanalyse mit dem Sensitivitätsmodell .....	12
2.4 Problemstellungen bei der Abbildung von komplexen Projekten .....	17
3 Auswahl von Methoden zur Modellierung von komplexen Projekten .....	22
3.1 Übersicht.....	22
3.2 Anforderungskatalog an ein Modell für komplexe Projekte .....	22
3.3 Grundlagen der Projektplanungsmethoden.....	23
3.4 Auswahl von Methoden zur Modellierung von Geschäftsprozessen .....	30
3.4.1 Methoden zur Abbildung von Prozessen .....	30
3.4.2 Abstraktion als Methode zur Modellierung.....	33
3.4.3 Abstraktion der Projektabläufe durch eine Black Box.....	35
3.5 Beschreibung von Abhängigkeiten zwischen Prozessen .....	38
3.5.1 Fuzzy Logik .....	38
3.5.2 Kausale Abhängigkeit.....	42
3.6 Auswahl geeigneter Simulationsmethoden zur Risikoverfolgung.....	43
3.6.1 Berücksichtigung der Eigendynamik in Prozessen.....	44
3.6.2 Ermittlung von Zufallszahlen .....	46
3.6.3 Unabhängige Replikationen .....	47
3.6.4 Möglichkeiten zur Bewertung von Simulationsergebnissen.....	48
3.7 Zusammenfassung der Einschränkungen in den bestehenden Ansätzen...	50
4 Ein neues Modell zum Abbilden komplexer Projekte .....	51
4.1 Übersicht.....	51
4.2 Erwartungshaltung .....	51
4.3 Grundlagen des neuen Modells .....	52

4.4	Ermitteln von Risiko und Chance in einem Prozess.....	56
4.5	Modellierung von Prozessen als Black Box .....	58
4.5.1	Eingangslogik.....	61
4.5.2	Risikologik .....	66
4.5.3	Chancenlogik.....	69
4.5.4	Verbesserungslogik.....	75
4.6	Konsequenzen für die Simulation .....	81
4.7	Merkmale und Potenzial der neuen Methode zur Risikoverfolgung .....	83
5	Abbilden neuer Kenngrößen mit dem stochastischen Risikomodell.....	85
5.1	Übersicht.....	85
5.2	Definition neuer Kennzahlen .....	85
5.2.1	Restrisiko.....	86
5.2.2	Restchance .....	87
5.2.3	Restzusatzressourcen.....	87
5.2.4	Restzeit .....	88
5.2.5	Druck.....	89
5.2.6	Effektive, effiziente und kosteneffiziente Ergebnissensitivität.....	93
5.2.7	Aktive und passive Prozesse.....	99
5.3	Definition neuer Projektpfade.....	101
5.3.1	Definition eines stochastischen, kritischen Pfades .....	101
5.3.2	Definition eines stochastischen, minimal elastischen Pfades.....	102
5.3.3	Restchancenpfad .....	103
5.3.4	Restchance-Restzusatzressourcenpfad.....	104
5.3.5	Restchance-Restzusatzressourcen-Restzeitpfad.....	105
5.3.6	Sicherer Pfad bzw. unsicherer Pfad .....	106
5.3.7	Maximaler Druckpfad.....	107
5.3.8	Effektiver, effizienter und kosteneffizienter Ergebnissensitivitätspfad .....	108
5.4	Definition neuer Projektlisten .....	110
5.5	Zusammenfassung der Neuerungen der stochastischen Risikomodellierung. .....	112
6	Realisierung .....	116
6.1	Übersicht.....	116
6.2	Auswahl geeigneter Visualisierungstechniken .....	116
6.2.1	Herausforderung der Visualisierung .....	117

6.2.2	Mögliche Visualisierungsansätze .....	119
6.3	Auswahl geeigneter Realisierungswerkzeuge.....	121
6.4	Kurzbeschreibung der Vorgehensweise zur Softwarekonzeption .....	126
6.5	Toolbeschreibung.....	129
6.5.1	Eingabe .....	129
6.5.2	Verarbeitung.....	131
6.5.3	Ausgabe .....	132
7	Simulationsexperimente mittels stochastischer Risikomodellierung.....	141
7.1	Übersicht.....	141
7.2	Anwendung des stochastischen Risikomodells.....	141
7.2.1	Fallstudie: Risikoverfolgung im Produktentstehungsprozess.....	141
7.2.2	Verifizierung der neuen Anwendung .....	144
7.2.3	Validierung des neuen Konzeptes.....	147
7.2.4	Auswertung der Simulationsergebnisse .....	149
8	Beurteilung der Ergebnisse und Ausblick.....	157
8.1	Übersicht.....	157
8.2	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	157
8.3	Nutzen des neuen stochastischen Risikomodells für das Projekt- management .....	159
	Literaturverzeichnis .....	167
	Anhang A: Ausgewähltes Teilprojekt .....	179

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Projektmanagement-Dreieck .....	7
Abbildung 2-2: Darstellung eines neuen Projektmanagement-Dreiecks .....	7
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Kennzahlensystems nach BSC .....	10
Abbildung 2-4: Auswertung der Matrix nach Vester am Beispiel einer 5x5-Matrix..	14
Abbildung 2-5: Schematische Einteilung der Variablen im aufgespannten Feld.....	15
Abbildung 2-6: Übersicht über reale und modellierte Projektgrößen .....	17
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung einer Bearbeitungszeitverteilung .....	19
Abbildung 3-1: Schema der grundlegenden Netzplandarstellungen .....	24
Abbildung 3-2: Übersicht von deterministischen Netzplantechnik-Methoden .....	25
Abbildung 3-3: Physikalische Analogie eines Projektplans.....	29
Abbildung 3-4: Beschreibungselemente der Systemtheorie .....	34
Abbildung 3-5: Fundamentale Unterscheidungskriterien formaler Modelle .....	36
Abbildung 3-6: Elementeschema der Black Box.....	37
Abbildung 3-7: Beschreibung mittels Fuzzy Logik (Beispiel Raumtemperatur).....	38
Abbildung 3-8: Beispiel Fuzzyregler .....	39
Abbildung 3-9: Intervallabdeckung von Maximum- und Schwerpunktmethode.....	42
Abbildung 3-10: Würfelergbnis anhand der Verteilungsfunktion (Beispiel) .....	47
Abbildung 4-1: Prozessabläufe unter Berücksichtigung der Sicherheitsreserven.....	54
Abbildung 4-2: Schematischer Aufbau einer neuen BB mit mehreren Logiken .....	59
Abbildung 4-3: Beispiel für das Zusammenspiel der Logiken .....	60
Abbildung 4-4: Verfolgung der Ergebnisse über mehrere Prozesse (Beispiel) .....	60
Abbildung 4-5: Kausale Funktionsabhängigkeit von Ergebnissen .....	61
Abbildung 4-6: Fuzzy Logik als mögliche Eingangslogik .....	63
Abbildung 4-7: Beispiel einer automatisch generierten Regelbasis .....	65
Abbildung 4-8: Fusion von Maximummethode und Schwerpunktmethode .....	66
Abbildung 4-9: Darstellung der Ermittlung der normierten Verteilungsfunktion.....	67
Abbildung 4-10: Ermittlung einer Stichprobe aus der Verteilungsfunktion .....	68
Abbildung 4-11: Erweiterung der Black Box .....	70
Abbildung 4-12: Laufzeitverkürzung eines Prozesses .....	71
Abbildung 4-13: Einfluss des Risikoeintrittszeitpunktes auf das Chancenpotenzial..	74
Abbildung 5-1: Exemplarische Darstellung der Restzeit.....	88
Abbildung 5-2: Einfluss auf das Eingangsergebnis durch die Vorgänger .....	94

Abbildung 5-3: Berechnung von Aktiv- und Passivsumme .....	100
Abbildung 5-4: Ermittlung eines Ergebnissensitivitätspfades in einer Replikation	109
Abbildung 5-5: Effektive Ergebnissensitivitätspfad (Beispiel) .....	110
Abbildung 6-1: Prozessdarstellung mit prognostizierter Ergebnisverteilung .....	120
Abbildung 6-2: Datenbankmodell / Java- Klassenstruktur (Schematisch) .....	127
Abbildung 6-3: Ablauf der Projekterstellung.....	128
Abbildung 6-4: Ablauf der Prozesserstellung.....	129
Abbildung 6-5: Einfügen von Dummystart- und Dummyendknoten .....	136
Abbildung 6-6: Ablaufplan der Ergebnisdarstellung und Szenarioerstellung .....	140
Abbildung 7-1: Übersicht der einzelnen Phasen des PEP .....	142
Abbildung 7-2: Ergebnisentwicklung unter positiven Vorgaben .....	145
Abbildung 7-3: Ergebnisentwicklung unter negativen Vorgaben.....	145
Abbildung 7-4: Effekte aus schrittweise Veränderung der Eingangsdaten .....	146
Abbildung 7-5: Positive Effekte nach Nutzen des Verbesserungspotenzials .....	146
Abbildung 7-6: Ausschnitt aus der Matrixansicht .....	150
Abbildung 7-7: Ausschnitt aus der Wertansicht .....	151
Abbildung 7-8: Detailansicht (am Beispiel effektiver Ergebnissensitivität) .....	152
Abbildung 7-9: Ausschnitt aus der Pfad- und Listenansicht.....	152
Abbildung 7-10: Detailansicht nach Nutzung der Zusatzressourcen .....	153
Abbildung 7-11: Detailansicht nach Zeitverlängerung im Prozess 35.....	154
Abbildung 7-12: Ergebnisverbesserung durch Parallelisierung .....	154
Abbildung 7-13: Pfadwechsel (Veränderung des Drucks im Projekt) .....	155
Abbildung 7-14: Übergabe des optimalen Ergebnisses vom Prozess 46 .....	156
Abbildung 8-1: Prinzip der Wirkungsweise von Abweichungen .....	161
Abbildung 8-2: Plausibilitätsprüfung des Projektplans .....	163

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2-1: Einteilung von Projekten nach ihrer Größe .....	6
Tabelle 2-2: Auswahl harter und weicher Kenngrößen .....	8
Tabelle 3-1: Übersicht der Planungsabschnitte beim Aufbau von Netzplänen .....	27
Tabelle 4-1: Frage-Antwort-Katalog zur Bestimmung einer Funktion für Risiko .....	56
Tabelle 4-2: Frage-Antwort-Katalog zur Bestimmung einer Funktion für Chance...	57

---

## Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
ARIS	Architektur integrierter Informationssysteme
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CPM	Critical Path Method
CSS	Cascading Style Sheets
DCPM	Decision Critical Path Method
DHTML	Dynamic HTML
DOM	Document Object Model
EPK	Ereignisgesteuerte Prozessketten
EVA	Eingabe - Verarbeitung - Ausgabe
GERT	Graphical Evaluation and Review Technique
HTML	Hyper Text Markup Language
IDEs	Integrierte Entwicklungsumgebungen
IT	Informationstechnologie
JSP	Java Server Pages
MPM	Metra Potenzial Method
ODBC	Open Database Connetivity
OO	Objektorientiert
PEP	Produktentstehungsprozess
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PMI	Project Management Institute
ProViS	Projektvisualisierung und Simulation
SADT	Structured Analysis and Design Technique
SD	System Dynamics
SMIL	Synchronized Multimedia Integration Language
SVG	Scaleable Vector Grahics
UML	Unified Modelling Language
VRML	Virtual Reality Modelling Language
WWW	World Wide Web
W3C	World Wide Web Consortium
XML	Extensible Markup Language



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation: Herausforderung bei großen Industrieprojekten

Die Herausforderungen der Zukunft liegen darin, steigende Innovationsgeschwindigkeiten, verkürzte Produktlebenszyklen und eine anhaltende Diversifizierung der Produktpalette zu realisieren sowie sich im Wettbewerb mit anderen Herstellern zu behaupten. Für Unternehmen gilt es mehr denn je, sich aktuellen Trends und Anforderungen des Marktes zu stellen. Es gilt, auch bei kürzeren Produktlebenszyklen attraktive Produkte in hoher Qualität anzubieten und die Time-to-Market weiter zu verkürzen [63,69]. Erfolgreich wird unter anderem derjenige sein, der sich den schnell wechselnden und steigenden Kundenanforderungen stellt, die immer komplexeren Entwicklungsprozesse beherrscht und die immer schneller aufeinander folgenden Modellläufe meistert [42].

Durch verkürzte Produktlebenszyklen richtet sich der Blick zunehmend auf die Produktion direkt nach Serienstart. Verkürzte Anlaufzeiträume und steilere Anlaufkurven sollen die Bereitstellung der neuen Produkte gerade zu Beginn der Modelllaufzeit gewährleisten. Besonders am Anfang der Markteinführung entgangene Verkäufe und Gewinne können über die Produktlebenszeit nur sehr schwer wieder aufgeholt werden [26,7]. Eine Verspätung der Time-to-Market straft Unternehmen mit enormen Gewinneinbußen.

Als Ursache ist eine veränderte Markt- und Wettbewerbssituation sowie sich wandelndes Verhalten der Marktteilnehmer erkennbar. Die verkürzte Produktlebensdauer bewirkt eine veränderte Absatzcharakteristik. Konnten früher mit einem einige Jahre gleich bleibenden Absatzvolumen, das auf eine länger dauernde Wachstumsphase folgte, gerechnet werden, so präsentiert sich die jetzige Absatzcharakteristik als steil ansteigende Kurve, mit einem hohen, aber kurzem Maximalbereich. Die Auswirkungen dieses veränderten Marktverhaltens beschreibt Geschka: „Wenn nun ein Unternehmer als (Nach)Folger - als Zweiter oder Dritter - mit einem Zeitverzug gegenüber dem Ersten in den produktspezifischen Markt eintritt, ist bereits ein wesentlicher Teil der Gesamtnachfrage vergeben, die Produkte sind schon verkauft, oder es haben sich feste Bindungen an die Produkte des Erstanbieters gebildet. Der Erste hat in der Regel für den Rest der Lebensdauer des Produktes eine uneinholbar

bessere Marktposition aufgebaut. Der Folger kommt eventuell erst zu einem Zeitpunkt auf den Markt, bei dem die Nachfrage bereits rückläufig ist.“[29]

Die Schnelllebigkeit eines Produktes beeinflusst entscheidend die komplexe Struktur eines Produktentstehungsprozesses (PEP). Dazu kommt, dass der individualisierte Käufermarkt große Industrieunternehmen zu einer hohen Produktvielfalt zwingt, was wiederum zu einer Erhöhung der Strukturkomplexität für alle Projekte und Aufgaben führt [4]. Diese hohe Komplexität von Produktentstehungsprozessen spiegelt sich in der Vielzahl von parallelen und seriellen Teilprozessen wider.

Die starke Vernetzung der einzelnen Prozesse, der unterschiedlichen Einflussgrößen und der beteiligten Abteilungen im Unternehmen erfordert ein effizientes und zielorientiertes Management der Produktentwicklungsprojekte. Die gleichzeitige Reduzierung der Zeitdauer für das Entwicklungsprojekt stellt eine zusätzliche Herausforderung für Unternehmen dar.

Es fehlen die nötige Transparenz und Kontrolle über alle Vorgänge, um versteckte Ressourcen und Einflussgrößen zur Verbesserung von Kosten-, Zeit- und Ergebniszielen erkennbar zu machen. Im Projektverlauf auftretende Abweichungen, wie z.B. neue Anforderungen, verspätete Freigaben, Änderung von Prioritäten, Liefer- und Qualitätsprobleme, erschweren zusätzlich das Erreichen der Projektziele. Die Herausforderung in jedem Projekt besteht darin, mit dem vorhandenen Budget und den vorhandenen Kapazitäten die Projektziele zu erreichen und dabei den vorgegebenen Zeitrahmen einzuhalten.

Wenn innerhalb eines Projektes reagiert wird, ist die Abweichung bereits eingetreten. Wenn aber in Projekten vorausschauend agiert wird, ist die Wahrscheinlichkeit wesentlich größer, Risiken und drohende Abweichungen zu erkennen und im Vorfeld eliminieren zu können [103,107].

Eine ganzheitliche Betrachtung eines großen Industrieprojektes, wie z.B. des Produktentstehungsprozesses, ist für einzelne Prozessbeteiligte nicht möglich. Hinzu kommt, dass die meisten Projekte mit deterministischen Größen geplant werden. Die Realität kann jedoch nur unter Verwendung stochastischer Werte abgebildet werden. Ein brauchbares Modell erfordert deshalb die Einführung von stochastischen Größen. Die sich daraus entwickelnde Dynamik wird in großen Industrieprojekten mit den bekannten Projektplanungstechniken ungenügend oder gar nicht beachtet. Bisher verwendete Modellierungstechniken können nicht aktiv zur Projektkontrolle

genutzt werden, weil sie getroffene Entscheidungen resultierend aus Projektabweichungen nicht mit Simulationstechniken überprüfen können.

Die Notwendigkeit, Zielkonflikte rechtzeitig zu erkennen, Maßnahmen abzuleiten und diese projektspezifisch modelliert zu überprüfen, ist dringender als je zuvor.

Es gilt Methoden zu finden, die den gesamten Projektablauf transparent darstellen und die die Stochastik mit berücksichtigen. Es muss entschieden werden, welche geeigneten Modellierungstechniken, Simulations- und Projektplanungsmethoden angewendet werden können und entwickelt werden müssen, um komplexe Abläufe realitätsnäher systemtechnisch abzubilden.

## **1.2 Ziel der Arbeit**

Ziel der Arbeit ist es, ein neues abstraktes Modell zu entwickeln, das neue Zustandsgrößen enthält und ein genaues Abbild der Dynamik und Wechselwirkungen in komplexen Projekten wiedergibt.

Die Projektdynamik soll durch Berücksichtigung von stochastischen Größen in die Modellierung eingebracht werden.

Es soll ermöglicht werden, in komplexen Projekten Risiken und Abweichungen zu identifizieren, die Erreichbarkeit der Projektziele zu prognostizieren und den Projektleiter Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen, um die effizientesten Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Darauf aufbauend wird das Ziel verfolgt, ein Modellierungs- und Simulationswerkzeug zu entwickeln, mit dem große Industrieprojekte praxisrelevant modelliert, Auswirkungen von Entscheidungen simulativ überprüft und optimale Verbesserungspotenziale vorgeschlagen werden können.

Der erwartete Nutzen eines neuen Modells besteht in der universellen Anwendbarkeit auf komplexe Projekte jeder Größe. Weiterhin soll durch das Modell das Verständnis erhöht werden für projekt- und prozessinterne Wechselwirkungen, deren Beziehungen untereinander und resultierende Auswirkungen. Enthaltene Risiken sollen erkannt und verringert, Chancen erkannt und genutzt werden. Das Projektmanagement soll in die Lage versetzt werden, jederzeit aktiv zeit- und ressourcenminimierend und leistungsmaximierend in den Projektverlauf einzugreifen.

### 1.3 Vorgehensweise der Arbeit

Mit Hilfe der Situationsanalyse werden Merkmale und Schwierigkeiten bei der Abbildung in komplexen Projekten untersucht. Es werden Methoden vorgestellt, um die wichtigsten Steuergrößen in großen Industrieprojekten zu identifizieren und Ursache-Wirkungsbeziehungen von Prozessen analysieren zu können. Durch Erkennen der Herausforderungen in der Modellierung werden Problemstellungen herausgearbeitet, zu deren Beantwortung ein Anforderungskatalog für einen neuen Modellierungsansatz in Kapitel 3 erstellt wird.

Es werden gängige Methoden zur Projektplanung und -steuerung, Modellierung und Simulation untersucht und auf ihre Anwendbarkeit bewertet. Es werden Mängel in den vorhandenen Methoden aufgezeigt und neue Lösungsansätze diskutiert. Die Notwendigkeit für die Entwicklung eines neuen Modellierungsansatzes wird festgestellt.

Im Kapitel 4 wird das neue Modell unter Berücksichtigung der Stochastik entwickelt und hergeleitet. Darauf aufbauend wird im Kapitel 5 neue Kenngrößen in der Modellierung definiert, um Abweichungen und potentielle Gegenmaßnahmen in komplexen Projekten realitätsnaher darzustellen.

Die Umsetzung des neuen Modells in einem Tool wird im Kapitel 6 bearbeitet. Dabei werden die wichtigsten Realisierungs- und Visualisierungskonzepte vorgestellt. Die Funktionsweise des neu entwickelten Werkzeugs zur stochastischen Risikomodellierung wird näher aufgezeigt.

Die neue Konzeption wird im Kapitel 7 durch mehrere Simulationsexperimente verifiziert untersucht und anhand eines Fallbeispiels validiert.

Abschließend werden die Erkenntnisse und Ergebnisse der neuen Vorgehensweise im Kapitel 8 zusammengefasst und beurteilt. Daraus werden neue Möglichkeiten für das Projektmanagement abgeleitet.

## **2 Situationsanalyse in komplexen Projekten**

### **2.1 Übersicht**

Im diesem Kapitel werden die grundlegenden Merkmale von komplexen Projekten aufgezeigt. Es werden weiterhin Techniken vorgestellt, mit denen die Komplexität reduziert werden kann und Abhängigkeiten ersichtlich werden. Es werden Problemstellungen erarbeitet, die die Schwierigkeiten in der Modellierung von komplexen Projekten erkennen lassen.

### **2.2 Definition wichtiger Merkmale komplexer Projekte**

Ein Projekt ist nach DIN 69901 ein Vorhaben, das im Wesentlichen durch die Einmaligkeit der Aufgabe, eine definierte Zielvorgabe, zeitliche, finanzielle, personelle und andere Begrenzungen, Abgrenzung gegenüber anderer Vorhaben und durch projektspezifische Organisation gekennzeichnet ist [13]. Projekte lassen sich unterscheiden nach

- Art,
- Typ,
- Dauer und
- Größe.

Burghardt definiert verschiedene Projektarten und -typen [12]. In der vorliegenden Arbeit wird sich vorrangig auf Projekte für die Entwicklung von Produkten und Systemen (Entwicklungsprojekte) mit klar definierter Zielstellung beschränkt.

Je später ein Fehler im Projektverlauf erkannt wird, um so kostenintensiver ist das Beheben dieser Fehler. Resultiert daraus auch noch eine Verzögerung des Markteintrittszeitpunktes, ist dies nochmals mit enormen Verlusten verbunden, die sich in den Bereichen Marktanteil, Kundenbindung und Cash Flow niederschlagen. Aus diesem Grund ist das Gelingen von Entwicklungsprojekten für den Erfolg von Unternehmen ausschlaggebend.

Nach Burghardt sollen kleine Projekte zeitlich nicht weniger als zwei Monate und große Industrieprojekte maximal fünf Jahre dauern. Die Größe eines Projektes

kann an der Anzahl der involvierten Mitarbeiter und der benötigten Entwicklungskosten gemessen werden (Tabelle 2-1) [12].

<b>Projektgröße</b>	<b>Mitarbeiter</b>	<b>Mannjahre</b>	<b>Mio. €</b>
Sehr klein	< 3	< 0.5	< 0.1
Klein	3 bis 10	0.5 bis 5	0.1 bis 1
Mittel	10 bis 50	5 bis 50	1 bis 10
Groß	50 bis 150	50 bis 500	10 bis 80
Sehr groß	> 150	> 500	> 80

Tabelle 2-1: Einteilung von Projekten nach ihrer Größe (vgl. [12])

Je größer ein Projekt ist, umso detaillierter müssen Prozesse in Phasen und Abschnitte unterteilt sein. Dabei steigen die Abhängigkeiten, die Wechselwirkungen und der Informations- und Kommunikationsbedarf zwischen den Prozessen. Ein Prozess kennzeichnet das eigentliche Vorgehen im Projekt zur Herstellung des Produkts [12].

Komplexe Projekte zeichnen sich durch eine große Anzahl von Mitarbeitern, durch ein hohes Projektbudget, durch lange Projektlaufzeiten und durch eine hohe Anzahl an seriell und parallel geschalteten Prozessen aus.

Die Voraussetzungen für den Erfolg des künftigen Produkts werden entscheidend durch die Projektplanung geschaffen. Die Qualität der Projektplanung und -kontrolle tragen wesentlich zur Leistungserfüllung, Termin- und Kosteneinhaltung in komplexen Projekten bei. Ein geeignetes Projektmanagement<sup>1</sup> ist notwendig, um komplexe Projekte im Projektverlauf in ihrer Durchführung aufmerksam zu verfolgen und Planabweichungen stetig zu kontrollieren. Dabei ist das Ziel jedes Projektes, die Grundparameter

- Leistung,
- Ressourcen und
- Zeit

in ein optimales Verhältnis zu bringen. Diese Parameter stehen in direkter, enger Wechselbeziehung.

<sup>1</sup> DIN 69901 bezeichnet Projektmanagement als die Gesamtheit von Führungsaufgaben, -organisation, -techniken und -mittel, die für die Abwicklung eines Projekts notwendig sind.

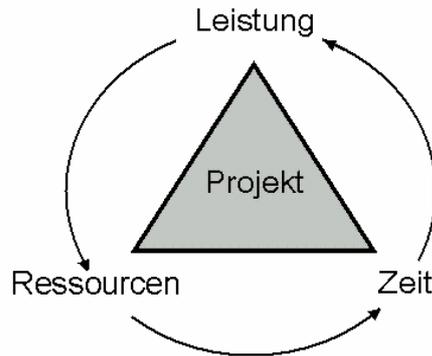


Abbildung 2-1: Projektmanagement-Dreieck (vgl. [12])

Das Wechselwirkungsoptimum dieser Parameter soll für jeden einzelnen Prozess angestrebt werden. Diese Wechselwirkungen existieren nicht nur prozessintern, sondern die Prozesse beeinflussen sich auch gegenseitig (vgl. Abbildung 2-2).

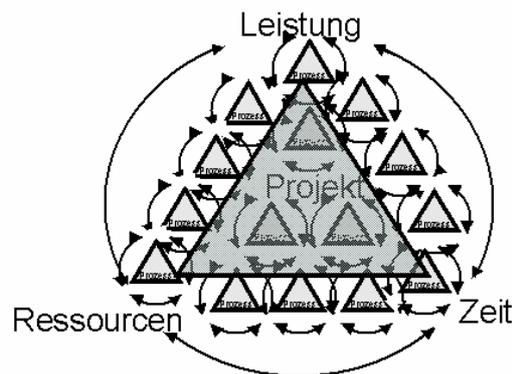


Abbildung 2-2: Darstellung eines neuen Projektmanagement-Dreiecks

Bereits in der Projektplanung werden prozessspezifische Kennzahlen definiert, die den Verantwortlichen die Qualität des Erreichens der Prozessziele vermitteln sollen. Eine Kennzahl ist eine repräsentative Zahl, die eine Sachlage von hoher Komplexität in komprimierter Form darstellt. Diese Komplexitätsreduzierung wirkt sich positiv aus, da sie die Informationen unmittelbar komprimiert verständlich macht. Somit informiert die Werteänderung über eine Veränderung der beschriebenen Sachlage [106].

Während der Projektdurchführung werden in der Projektkontrolle durch ständige Soll/Ist-Vergleiche der Kennzahlen drohende Abweichungen frühzeitig erkennbar. Je früher eine Abweichung vom geplanten Projektverlauf erkannt wird, desto geringer ist der notwendige Korrekturaufwand.

Wichtig dabei ist, nicht einzelne Kennzahlen isoliert voneinander zu betrachten, sondern ein ganzes Kennzahlensystem zur Projektverfolgung heranzuziehen. Unter Kennzahlensystemen wird eine Zusammenstellung von quantitativen und qualitativen Variablen verstanden, wobei die einzelnen Kennzahlen in einer sachlich sinnvollen Beziehung zueinander stehen, einander ergänzen oder erklären und insgesamt auf ein gemeinsam übergeordnetes Ziel ausgerichtet sind [110].

Erst im Vergleich der Kennzahlen mit denen anderer Prozesse oder Projekte erhalten sie eine Aussagekraft. Burghardt definiert in diesem Zusammenhang den Begriff echte Kennzahlen, die die Eigenschaften

- Quantifizierbarkeit,
- Erhebbarkeit,
- Vergleichbarkeit,
- Relevanz und
- Aktualität

aufweisen müssen [12]. Eine weitere Unterscheidung von Kennzahlen ist die Eigenschaft hart und weich. Eine harte Kennzahl zeichnet sich dadurch aus, dass sie exakt gemessen werden kann. Bei einer weichen Kennzahl bereitet eine genaue Messung Schwierigkeiten. Tabelle 2-2 enthält eine Auswahl von harten und weichen Kennzahlen.

Harte Kennzahlen		Weiche Kennzahlen	
Zuverlässigkeit	$\frac{\text{Ausfälle}}{\text{Zeit}}$	Komplexität	$\frac{\text{Anzahl Schnittstellen}}{\text{Produktteile}}$
Produktivität	$\frac{\text{Ergebnismenge}}{\text{Gesamtaufwand}}$	Erfüllungsgrad	$\frac{\text{erfüllte Anforderungen}}{\text{zugessagte Anforderungen}}$
Kostenanteil	$\frac{\text{Teilkosten}}{\text{Gesamtkosten}}$	Overhead-Anteil	$\frac{\text{nicht projektbezogene Kosten}}{\text{Gesamtkosten}}$

Tabelle 2-2: Auswahl harter und weicher Kenngrößen (vgl. [12])

Zur optimalen Steuerung des Projektes müssen diejenigen Prozesse und deren Kennzahlen gefunden werden, die einen bestimmenden Einfluss auf den Projektverlauf ausüben. Von großer Bedeutung sind solche Kennzahlen, die den Einfluss des Prozesses auf die Nachfolgeprozesse und das Projektergebnis widerspiegeln. In komplexen Projekten ist das Erkennen des gesamten Wirkungsgefüges der seriell und parallel geschalteten Prozesse sehr schwierig.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass eine hohe Komplexität des Projektes eine gute Projektplanung und eine aktive Projektkontrolle dringend erforderlich macht, um Abweichungen rechtzeitig zu erkennen, Gegenmaßnahmen aufzuzeigen, die Wirksamkeit dieser Maßnahmen zu bestätigen und die Erreichbarkeit des Projektzieles zu prognostizieren.

Die Komplexität des Projekts wird überschaubarer gestaltet, indem als ersten Schritt relevante Kennzahlen ermittelt bzw. definiert, als zweiten Schritt Abhängigkeiten von Prozessen untereinander sichtbar gemacht und als dritten Schritt ein Modell von dem komplexen Projekt erarbeitet werden.

### **2.3 Komplexitätsreduzierung durch Methodeneinsatz**

In der Literatur werden für eine Prozessanalyse mehrere Analysemethoden und -techniken, wie z.B. Prozesswertanalyse, Durchlaufzeitenanalyse, Qualitätskostenanalyse, Schnittstellen- und Engpassanalyse, Wertschöpfungsanalyse und Prozess-Benchmarking eingesetzt [25,48,19,59,60]. In den verwendeten Bezeichnungen ist erkennbar, welche Schwerpunkte in den Methoden verfolgt werden. Besonders hervorzuheben ist, dass sie nicht die Identifikation von wichtigen Kennzahlen und das Erkennen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen von Prozessen berücksichtigen. Mit Hilfe von zwei ausgewählten Verfahren werden Vorgehensweisen vorgestellt, mit denen ein Kennzahlensystem erstellt und die wichtigsten Wechselwirkungen von Prozessen in einem großen Projekt systematisch analysiert werden können.

#### **2.3.1 Wichtige Merkmale der Balanced Scorecard-Methode**

##### **Warum scheitern Projekte?**

Diese Frage rüttelt sowohl die verantwortlichen Projektleiter als auch Vorgesetzte auf. Einer aktuellen Befragung von 164 Großunternehmen durch Droege & Comp. zu Folge ist einer der häufigsten Gründe des Scheiterns von Projekten das Fehlen eines schlüssigen Projektcontrollings [18]. Voraussetzung für eine Projektkontrolle ist das Vorhandensein eines ausgewogenen Kennzahlensystems. Unter Verwendung des Management- und Strategieumsetzungssystems Balanced Scorecard (BSC) wird die

Nutzung und Entwicklung eines entsprechenden Kennzahlensystems möglich und voran getrieben [110].

Das zur Strategieentwicklung und Strategieumsetzung in Industrieunternehmen vorgesehene System lässt sich aber auch auf Prozesse und Projekte eines Unternehmens anwenden. Eine rein finanziell orientierte Sichtweise ist für Projekte nicht ausreichend, vielmehr muss dem Management ein aggregierter, aktueller Bericht über die Gesamtlage des Projektes gegeben werden.

Von Kaplan und Norton wurden vier grundlegende Sichtweisen für die Balanced Scorecard vorgeschlagen, die es bei der Erstellung von Kennzahlensystemen zu berücksichtigen gilt [51,52]:

- Finanzwirtschaftliche Perspektive
- Kunden-Perspektive
- Prozess-Perspektive
- Mitarbeiter-Perspektive

### Vorgehensweise bei der Umsetzung

Zunächst werden für jede Perspektive Ziele festgelegt und Kennzahlen gesucht. Die finanzwirtschaftliche Perspektive lässt sich mit dem Gelingen des Projektes gleichsetzen.

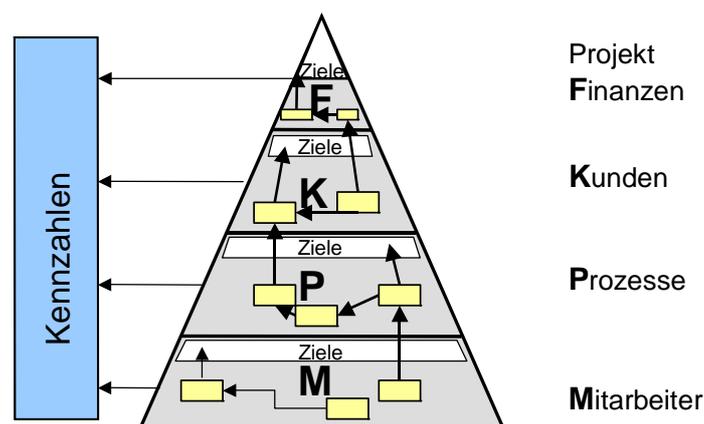


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Kennzahlensystems nach Balanced Scorecard

Um die Herausforderungen der Zukunft in großen Industrieprojekten zu erfüllen und langfristig den unternehmerischen Erfolg einzustellen, tritt das frühzeitige Erkennen von Zielkonflikten immer mehr in den Vordergrund. Nur dadurch lassen sich be-

stimmte finanzwirtschaftliche Ziele erreichen. Alle anderen Teilziele werden auf dieses Ziel ausgerichtet. Das Einbringen des Projekts in die höchste Zielebene verdeutlicht die Ausrichtung aller Aktivitäten auf deren erfolgreiche Umsetzung.

Die Kundenperspektive dient als Basis für die Projektziele. Diese Perspektive fordert, den Abnehmer der Produkte insgesamt stärker zu berücksichtigen, seine Bedürfnisse und Anforderungen bei der Entwicklung neuer Produkte zu beachten und langfristig gute Partnerschaften zu pflegen.

Die Prozessebene ist die Grundlage für die ersten zwei Perspektiven, die ohne funktionstüchtige Prozesse nicht zu realisieren wären. Durch die Überwachung, Verbesserung und Stärkung der zur Zielführung wichtigen Prozesse wird das Erreichen der Projektziele und die Ausrichtung nach Kundenwünschen gesichert. Die Balanced Scorecard legt aber nicht nur die Konzentration auf bekannte wichtige Prozesse nahe, sondern fordert explizit die Identifikation neuer Prozesse zur Projektverwirklichung.

In der unteren Ebene liegen die Voraussetzungen, auf die der gesamte Oberbau wie auf einem Fundament steht. Die Bezeichnung Mitarbeiterperspektive ist insofern passend, da die Mitarbeiter die „Macher“ des gesamten Oberbaus sind. Sie ertüchtigen durch ihre Flexibilität und Verbesserungsansätze die Prozesse und tragen somit ihren Teil zum Projekterfolg bei [51].

Zu jeder Perspektive werden Kennzahlen gesucht, die die Kursabweichungen von der Zielsetzung möglichst früh signalisieren. Dazu können bestehende Kennzahlen ebenso dienen wie neue Kennzahlen, die zu diesem Zweck entwickelt werden. In der Literatur wird empfohlen, die Anzahl der Kenngrößen zu begrenzen. Diese Vorgehensweise steigert die Konzentration auf die wesentlichen Größen und lenkt nicht durch eine verwirrende Anzahl von Kennzahlen von der eigentlichen Problematik ab [52,16]. Dabei muss das Kennzahlensystem insgesamt eine angemessene Anzahl von Kenngrößen enthalten, um Fehlinterpretationen im Projektverlauf vorzubeugen. Bei der Definition und Untersuchung von neuen Kenngrößen im Kapitel 5 werden diese Überlegungen berücksichtigt.

Die Erstellung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen ist eines der wichtigen Bestandteile der Balanced Scorecard. Ursache-Wirkungs-Beziehungen können innerhalb einer Ebene, zwischen ihren Teilzielen, sowie zwischen den Ebenen selbst gefunden werden. In jedem Fall stellt die folgerichtige Vernetzung der Teilziele und

Prozesse der einzelnen Ebenen die wichtigen Zusammenhänge im Projekt deutlich dar und zeigt Zielkonflikte auf. Die Vernetzung bindet einen erheblichen Anteil der Kapazität aller Experten und Führungskräfte. Diese Analyse erhöht die Klarheit über die Ziele in jeder Projektphase und stärkt das Verständnis der Abhängigkeiten zwischen den Prozessen und den Teilzielen. Die Vernetzung von Zielen und Prozessen ist für das Gelingen komplexer Projekte erforderlich.

### 2.3.2 Ursache-Wirkungsanalyse mit dem Sensitivitätsmodell

Mit dem Sensitivitätsmodell wird das Konzept des vernetzten Denkens verfolgt. Vernetztes Denken ist ganzheitliches, systematisches bzw. integratives Denken in Systemzusammenhängen [17,23,65].

Ziele des vernetzten Denkens sind unsichtbare Einflüsse sichtbar machen, Struktur und Zusammenhänge durch Visualisierung erkennen und verstehen, Wechselwirkungen und Eigendynamiken von Systemen erfassen, Objektivierung von subjektiven Wirklichkeiten, Probleme aus verschiedenen Blickwinkeln und Entfernungen betrachten, Gedanken zu Ende denken, alles auf einen Blick erfassen und Reduktion von Einflussfaktoren auf die wirklich relevanten Faktoren [39,127].

#### Die Sensitivitätsanalyse

Ausgangspunkt der Sensitivitätsanalyse ist eine Sammlung von Prozessen und Zielen, die in Bewertungsmatrizen gegenübergestellt werden. Es gilt zu klären, wie sich die einzelnen Aktivitäten und Ziele untereinander beeinflussen. Um die Wechselwirkungen der Prozesse gegenüberzustellen, wird eine **Prozesse-gegen-Prozesse-Matrix** aufgestellt. Diese Informationen sind vor allem dann interessant, wenn die Auswirkungen von Abweichungen eines Prozesses auf die restlichen Prozesse betrachtet werden. Die Wechselwirkungen der Ziele untereinander verdeutlichen eine **Ziele-gegen-Ziele-Matrix**. Sie zeigt, welche Ziele sich stärker bzw. schwächer auf die restlichen Ziele auswirken. Um die Vernetzung der Prozesse mit den Zielen zu klären, werden in einer **Prozesse-gegen-Ziele-Matrix** die Prozesse den Zielen gegenübergestellt. Mit Hilfe dieser Matrix wird analysiert, ob ein Prozess ein Ziel eventuell ignoriert oder sich zu stark auf die Umsetzung eines einzelnen Ziels konzentriert.

Zur Auswertung der Matrizen eignet sich das Sensitivitätsmodell von Vester. Das Auswertesystem zielt darauf ab, die bewerteten Prozesse und Ziele nicht starr sondern als Variable zu sehen und das System in seiner Ganzheit zu betrachten [105]. Im Sensitivitätsmodell werden die in Matrizen gegenübergestellten Variablen und ihre Wechselwirkung mit der folgenden Frage systematisch bewertet.

**Wenn ich Element A verändere, wie stark verändert sich durch direkte Einwirkung von A das Element B?**

Je nach Stärke der Wechselwirkung zwischen den Elementen werden nach Vester folgende Wertungen festgelegt [105].

- 0 = keine, sehr schwache oder stark zeitverzögerte Wirkung: keine Beziehung.
- 1 = starke Änderung von A bewirkt nur schwache Änderung von B: schwache Beziehung.
- 2 = starke Änderung von A bewirkt starke, etwa gleichstarke, Änderung von B: mittlere, proportionale Beziehung.
- 3 = geringe Änderung von A bewirkt starke Änderung von B: starke, überproportionale Wirkung.

Nur die direkten Einflüsse der Variablen (Prozesse/Ziele) untereinander werden in die Bewertungsmatrix eingetragen. Indirekte Wechselwirkungen einer Variable auf eine andere müssen über ihren tatsächlichen Wirkungspfad eingetragen werden. Anderenfalls verzerrt sich die Aussage der bewerteten Matrix [40].

Die vollständig befüllte Matrix wird zeilen- und spaltenweise addiert und die Summe jeder Zeile bzw. Spalte notiert. Die Zeilensumme wird Aktiv- und die Spaltensumme Passivsumme genannt. Die Aktivsumme sagt aus, wie stark eine Variable sich auf den Rest des Systems auswirkt. Somit beeinflusst eine Variable mit hoher Aktivsumme durch ihre Änderung sehr stark die anderen Variablen. Die Passivsumme gibt eine Aussage darüber, wie eine Variable auf Veränderungen eines Systems reagiert. Somit wird eine Variable mit hoher Passivsumme bei Veränderungen am System tendenziell starke Änderungen erfahren (Abbildung 2-4) [105].

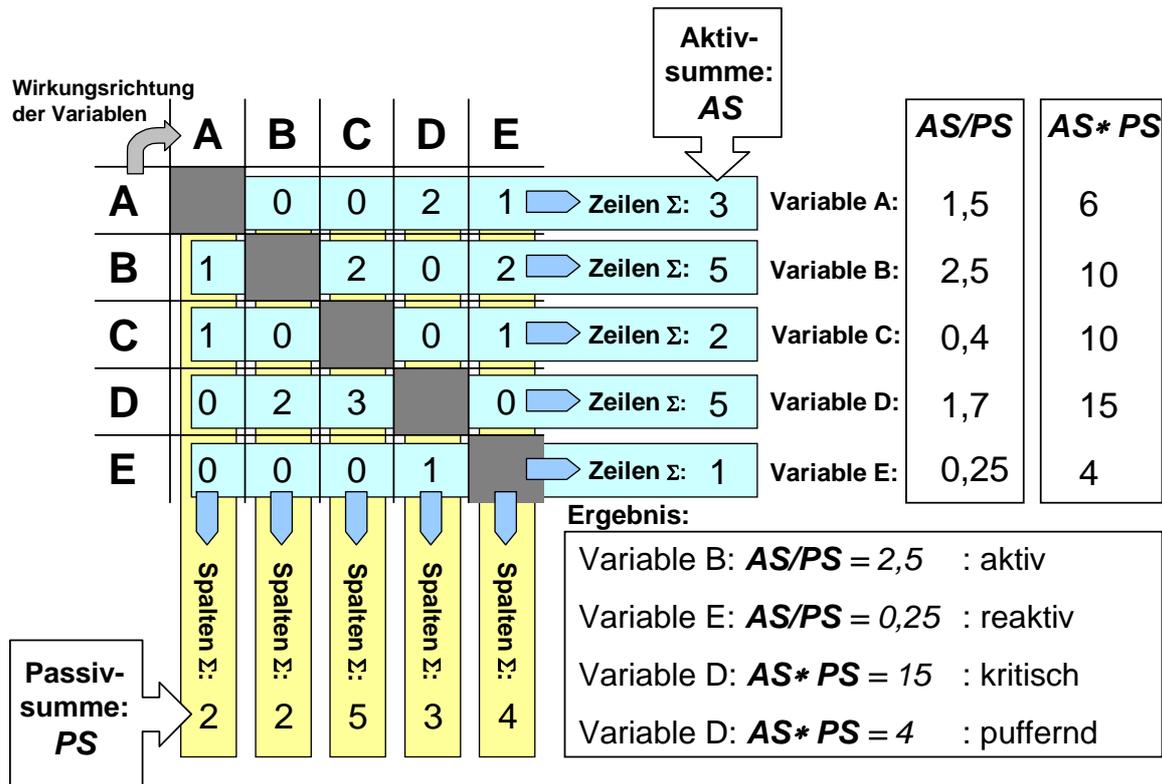


Abbildung 2-4: Auswertung der Matrix nach Vester am Beispiel einer 5x5-Matrix

Die Aktiv- und Passivsumme lässt noch keine zuverlässige Aussage über die Stellhebel und Indikatoren eines Systems zu.

Ein Stellhebel ist ein Prozess/Ziel, der auf viele andere Prozesse/Ziele einwirkt aber selbst wenig beeinflusst wird. Ein Indikator ist ein Prozess/Ziel, der von vielen Prozessen/Zielen beeinflusst wird aber selbst geringe Wirkung auf andere ausübt.

Eine aktive Variable, die das System durch ihren Wert stark beeinflusst, kann durchaus auch eine hohe passive Komponente besitzen und somit die Rückwirkung des Systems stark spüren. Sie wäre zur Steuerung des Systems ungeeignet. Damit wird die Definition von weiteren Kenngrößen nötig, die zu diesem Zweck zur Verfügung stehen. Vester schlägt zum Einen die Bildung des Quotienten Q, zum Anderen des Produktes P aus Aktiv- und Passivsumme vor. Der Quotient spiegelt den aktiven oder reaktiven Charakter einer Variable wider. Ist

$$Q = AS / PS \gg 1 \quad \text{und damit} \quad AS \gg PS,$$

wirkt die Variable mehr auf das System, als das System die Variable selbst beeinflusst. Sie ist aktiv.

Ist

$$Q \ll 1 \quad \text{und} \quad AS \ll PS,$$

wird die Variable eher vom System beeinflusst, als sie selbst am System mitwirkt und heißt reaktiv. Bei der Suche nach optimalen Stellparametern des Systems muss das Produkt

$$P = AS * PS$$

beachtet werden. Je größer P im Vergleich zu den Produkten der anderen Variablen ist, desto größer ist die Wechselwirkung der Variable im System. Sie hat einen kritischen Charakter. Ist P im Vergleich mit anderen Produkten klein, ist die Variable weniger am Systemverhalten beteiligt. Sie hat puffernden Charakter [105].

Werden die ermittelten Aktiv- und Passivsummen in ein Diagramm eingetragen, zeigt sich die Eignung der Variablen als Stellhebel zur Lenkung des Systemverhaltens in verschiedenen Bereichen.

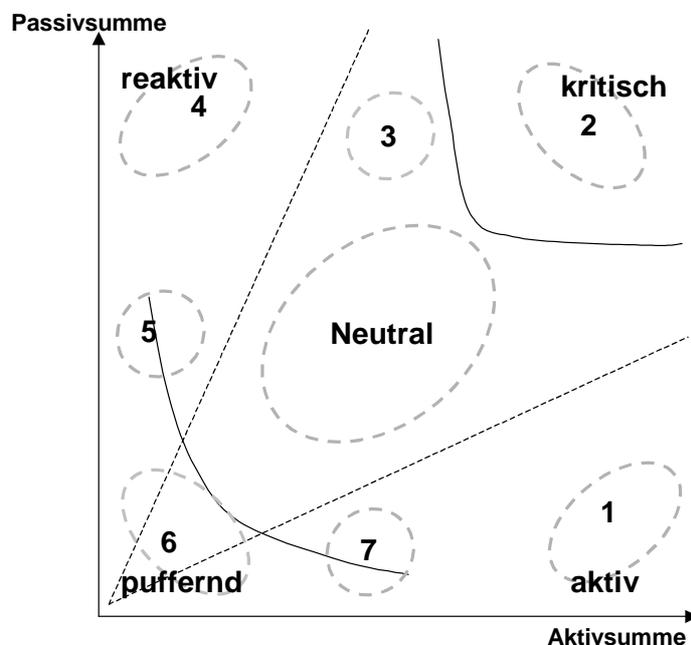


Abbildung 2-5: Schematische Einteilung der Variablen im aufgespannten Feld

Neutral: Variablen im Neutralbereich eignen sich nur schlecht zur Steuerung des Systems. Sie sind jedoch für eine Selbstregulation gut geeignet.

Bereich 1: Hier befinden sich ideale Stellhebel, die das System nach erfolgter Änderung erneut stabilisieren.

Bereich 2: Komponenten in diesem Bereich eignen sich als Initialzündler. Allerdings kann sich das System bei Nutzung dieser Variablen aufschaukeln und eventuell „umkippen“.

Bereich 3: Variablen in diesem Bereich werden stark beeinflusst und verursachen selbst eine mittlere Wirkung auf andere. Besonders gefährlich ist es, wenn mehrere Variablen sich im kritisch-reaktiven Bereich bündeln.

Bereich 4: Variablen dieses Bereiches eignen sich weniger zum Steuern, sind aber gute Indikatoren des Systemverhaltens.

Bereich 5: Variablen dieses Bereiches eignen sich als träge Indikatoren.

Bereich 6: Variablen dieses Bereiches sind sehr schwach am System beteiligt und deshalb puffernden Charakters.

Bereich 7: Hier liegen schwache Stellhebel mit wenig Nebenwirkungen.

Die Bewertungen aktiv, reaktiv, puffernd und kritisch beziehen sich nur auf die Charakterisierung der Variablen innerhalb des Systems und enthalten keine Wertung oder andere mit dem Begriff in Verbindung gebrachte Eigenschaften. So ist eine aktive Variable keinesfalls automatisch eine beeinflussbare Größe. Sie wirkt im betrachteten System nur stärker auf andere Variablen ein, als sie selbst von diesen beeinflusst wird. Auch der kritische Charakter einer Variable zeichnet sie auf keinen Fall als die problemverursachende Größe aus. Sie ist lediglich im System eine der stärksten „Beeinflusser“ und gleichzeitig einer der stärksten „Einflussnehmer“. Das platziert sie im betrachteten System (Abbildung 2-5) im kritischen Bereich [105].

Diese Art der Systemanalyse beurteilt die Mitwirkung einzelner Variablen (Prozesse/Ziele) im Gesamtverbund. Mit einer ganzheitlichen Betrachtung der Wirkbeziehungen können Zusammenhänge aufgezeigt und die Auswirkungen der Veränderung einer Variable rechtzeitig erkannt werden. In komplexen Projekten können dadurch die gegenseitigen Abhängigkeiten bestimmt, unsichtbare Einflüsse sichtbar gemacht, Struktur und Zusammenhänge erkannt und verstanden werden, um ein komplexes Projekt im nächsten Schritt in einem Modell verarbeiten zu können.

## 2.4 Problemstellungen bei der Abbildung von komplexen Projekten

Die Wichtigkeit des Identifizierens relevanter Projektkenngößen und des Erkennens der Wirkzusammenhänge von Prozessen und Zielen wurde demonstriert. Eine wesentliche Erkenntnis besteht darin, dass die Ermittlung der Abhängigkeiten in komplexen Projekten durchführbar ist, jedoch der Einfluss eines Prozesses auf den anderen zum größten Teil nicht exakt beschreibbar ist.

Daraus leitet sich die erste Problemstellung ab.

### Welche Möglichkeiten gibt es, Abhängigkeiten in großen Projektnetzwerken qualitativ und quantitativ zu modellieren?

Eine modellmäßige Erfassung eines Projektes zieht immer einen Informationsverlust nach sich. Die Komplexität der realen Welt kann nicht hundertprozentig abgebildet werden. Eine Abbildung der Realität stellt eine Abstraktion dar.

Viele projektrelevante Größen, die in der Realität vorhanden sind, können in der Modellierung nicht berücksichtigt werden und gehen als Informationen verloren. Es werden Projektgrößen, die sogar das Projektergebnis entscheidend beeinflussen, nicht beachtet. Der entstehende Informationsverlust wird in Abbildung 2-6 aufgezeigt.

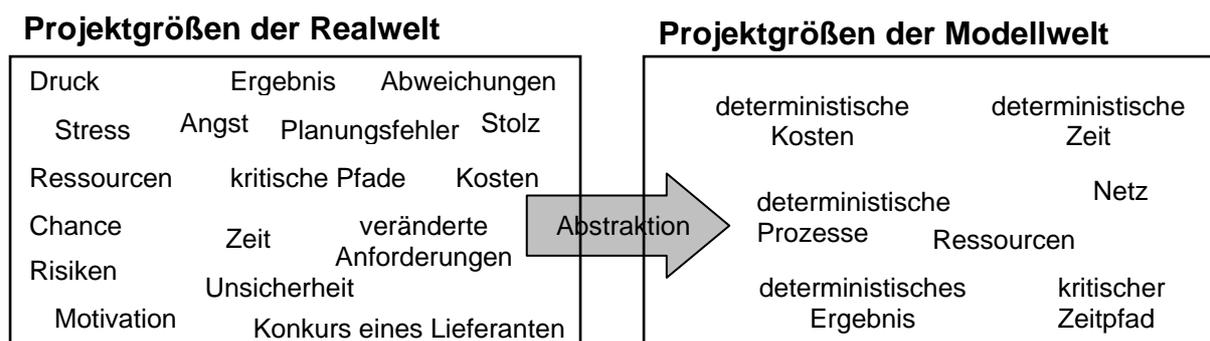


Abbildung 2-6: Übersicht über reale und modellierte Projektgrößen

Daraus ergeben sich weitere Problemstellungen.

### Können für die modellmäßige Erfassung neue Kenngößen für große Projekte definiert werden, um die Realwelt besser abzubilden?

**Gibt es Kennzahlen, die für jeden Prozess des Projektes definiert werden können und miteinander vergleichbar sind?**

Ein weiteres Defizit bei der Abbildung komplexer Projekte stellen die aktuell angewendeten Projektplanungsmethoden dar. Werden die von Burghardt in einer Übersicht zusammengefassten Projektpläne mit den jeweils betrachteten Plangrößen ausgewertet, so lassen sich daraus zwei Schlussfolgerungen ableiten. Die meisten in der Praxis bekannten Projektplanungs- und Projektkontrollmethoden werden passiv eingesetzt und verfolgen deterministische Kenngrößen [12]. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Auf die Anfrage „Wie lange dauert ein Vorgang x?“, wird meistens ein exakter Zeitwert  $y$  verlangt. Die Laufzeit eines Prozesses ist aber häufiger eine stochastische Größe. Wenn in die Betrachtung andere Vorgänge und deren Abhängigkeiten untereinander einbezogen werden, wird die vorhandene Dynamik durch Angabe eines festen Zeitpunktes nicht berücksichtigt. Die angegebene Laufzeit sollte mit einer Wahrscheinlichkeit belegt werden. Die deterministische Betrachtung der Projektkenngößen, wie z.B. die Laufzeit, liegt nur darin begründet, die Realität vereinfacht in einem Modell darzustellen. Eine daraus resultierende Prognose über den weiteren Projektverlauf verfälscht die tatsächliche Entwicklung des Projektes. Das Modell sollte deshalb so gut wie möglich an die Realität angepasst werden.

Daraus leitet sich die nächste Problemstellung ab.

**Gibt es Möglichkeiten in komplexen Projekten, Kenngrößen stochastisch zu betrachten, ohne den Modellierungsaufwand enorm zu erhöhen, mit dem Ziel die Realität so gut wie möglich abzubilden?**

Die Laufzeit eines Prozesses ist in den meisten Fällen eine Wahrscheinlichkeitsfunktion. Nach Goldratt ist diese nach rechts verzerrt, weil unvorhersehbare Ereignisse die Bearbeitungszeit verlängern [27]. Folgendes Beispiel soll dies verdeutlichen. Ein Programmierer in einem Software-Entwicklungsprojekt kennt aus seiner Erfahrung, welche Zeit er für die Entwicklung bestimmter Komponenten braucht. In Ausnahmefällen wurde der Abschlusszeitpunkt durch Probleme verzögert.

Aus Sicht des Projektmanagements müsste er für die Erstellung eines neuen Moduls die mittlere Bearbeitungszeit einplanen. Um Risiken zu berücksichtigen, wird

er etwa die maximale Bearbeitungszeit angeben, die in der Nähe des 90% Quantils liegen kann (vgl. Abbildung 2-7).

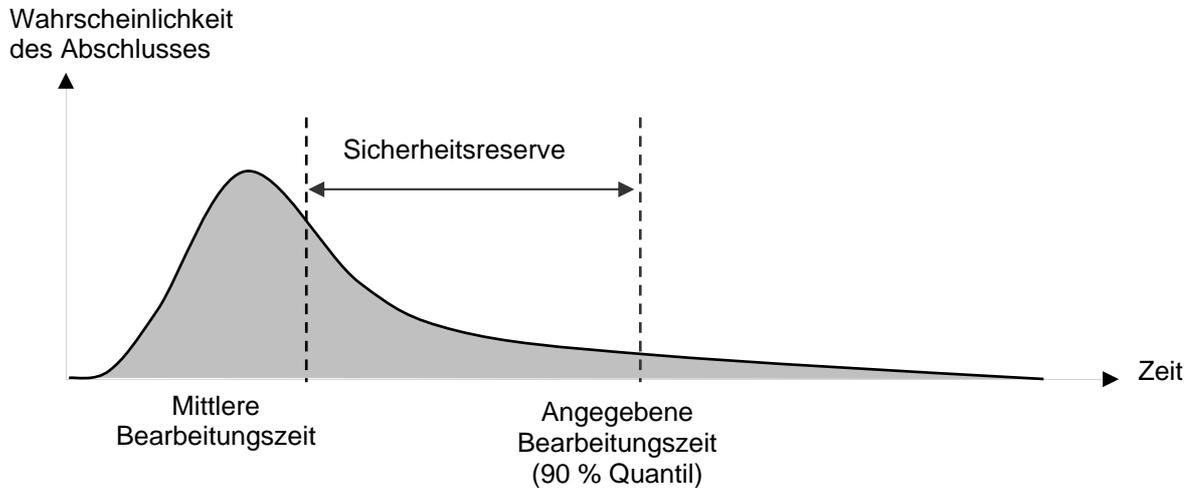


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung einer Bearbeitungszeitverteilung

Prozessverantwortliche planen zum Selbstschutz eine pessimistischere Laufzeit ihrer Prozesse ein. Die Summe der individuellen Laufzeitangaben enthält eine beträchtliche Menge an versteckten Sicherheitsreserven in vielen Projekten [28].

Die modellierte Laufzeit von Prozessen wird wenig mit der real notwendigen Zeit zu tun haben [64]. Nach Parkinson's Law wird bei einer zu frühen Fertigstellung des Prozesses die Arbeit vermehrt, um die gewährte Zeit zu füllen [78]. Goldratt beschreibt ein weiteres Phänomen, das Studenten Syndrom. Viele Menschen haben die Neigung, solange mit Ihren Aktivitäten zu warten bis die Zeit knapp wird [28].

Parkinson's Law und Studenten Syndrom zeigen, dass Sicherheitsreserven nicht genutzt werden, wenn keine Abweichungen im eigenen Prozess bzw. in den Vorgängerprozessen existieren.

Auf der anderen Seite können in der Realität kleine Abweichungen vom Vorgänger ohne Zusatzkosten aufgeholt werden, denn die Nachfolgeprozesse haben die Möglichkeit, durch ihre geplanten Sicherheitsreserven Verspätungen abzufangen und trotzdem rechtzeitig fertig zu werden. Diese Eigendynamik von komplexen Projekten wird in den gängigen Projektplanungsmethoden nicht betrachtet.

Daraus ergibt sich eine weitere Problemstellung, die es zu untersuchen gilt.

**Gibt es geeignete Methoden, die versteckten Sicherheitsreserven in der Modellierung zu berücksichtigen, damit bei Abweichungen gezielt die Flexibilitätspotenziale im Projekt aufgezeigt und genutzt werden können?**

Nach Abschluss eines Projektes ist häufig der ursprüngliche Projektplan mit dem tatsächlichen Projektablauf nicht identisch. In großen Industrieprojekten sind Abweichungen vom Projektplan keine Seltenheit. Es wird im Verlauf eines Projektes alles getan, um diesen Abweichungen entgegenzuwirken. Im Projektverlauf werden neue Vorgänge eingefügt; einige Prozesse nehmen mehr Zeit in Anspruch; es werden Zusatzressourcen eingesetzt; das Projektbudget wird erhöht usw. Die Realität zeigt, dass Veränderungen in Projekten und die dadurch ausgelöste Dynamik ein fester Bestandteil des Projektmanagements sind. In den meisten Modellen für Projektplanung werden diese Veränderungen und die Dynamik nicht ausreichend berücksichtigt. Die Projektbeteiligten sind eher in einer passiven Situation und können erst nach Eintreten von Risiken reagieren. Dabei lassen sich nur noch Symptome beheben. Die Ursachen bleiben eher hinter der Komplexität verborgen. Projektleiter haben beschränkte Möglichkeiten anhand der aktuellen Projektsituation, Veränderungen vom Projektplan im voraus zu simulieren und Entscheidungen wie Ressourcenerhöhung bzw. Zeitverlängerung an richtiger Stelle und zur richtigen Zeit einzubringen. Die Schwierigkeit besteht in der Identifikation von Prozessen mit erhöhtem Risikopotenzial und maximaler Abweichung vom optimalen Ergebnis und dem Einleiten von geeigneten Gegenmaßnahmen.

Daraus leiten sich weitere Problemstellungen ab.

**Wie kann die Dynamik in Projekten abgebildet und zur aktiven Projektverfolgung genutzt werden?**

**Welche weiteren Möglichkeiten gibt es, Projektplanungstools aktiv zu Entscheidungsunterstützung nutzen zu können, damit die Auswirkungen wichtiger Entscheidungen überprüft werden können?**

**Gibt es hierbei Möglichkeiten, den Projektablauf in die Zukunft zu simulieren und Fragen der Form „Was wäre, wenn...“ zu beantworten, um Risiken im weiteren Projektverlauf rechtzeitig zu erkennen und die richtigen Maßnahmen einzuleiten?**

**Wie könnten dabei ideale Gegenmaßnahmen in komplexen Projekten gefunden werden, um mit minimalem Aufwand Abweichungen entgegenzuwirken?**

Die beschriebenen Problemstellungen verdeutlichen den Bedarf, für komplexe Projekte Methoden zu finden zur

- ganzheitlichen und systemischen Betrachtung,
- realitätsnahen Modellierung,
- Identifizierung von Risiken,
- Verfolgung von Abweichungen,
- Überprüfung von Entscheidungen,
- Identifizierung von idealen Gegenmaßnahmen.

Im nächsten Kapitel werden dafür bewährte Methoden sowie Werkzeuge gesucht und auf ihre Anwendbarkeit überprüft.

### **3 Auswahl von Methoden zur Modellierung von komplexen Projekten**

#### **3.1 Übersicht**

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten zur Abbildung und Simulation von Risiken und Abweichungen in komplexen Projekten erörtert. Aus den vorhergehenden Problemstellungen werden Anforderungen an Modellierungstechniken zur Verfolgung von Risiken in großen Industrieprojekten erstellt. Es werden viele bekannte Methoden untersucht und auf ihre Anwendbarkeit bewertet. Zunächst werden Projektplanungswerkzeuge näher betrachtet und Ansätze zur Abbildung von dynamischen Modellen abgeleitet. Abschnitt 3.4 stellt verschiedene Prozessmodellierungen vor und wählt nach Erläuterung des Abstraktions- und Modellbegriffs geeignete Ansätze aus. Darauf aufbauend werden Methoden ausgesucht, wie Abhängigkeiten zwischen Prozessen beschrieben werden können. Abschnitt 3.6 erforscht Größen in Projekten, mit denen die Eigendynamik in Projekten abgebildet werden kann, mit dem Fokus geeignete Simulationsmethoden zur Verfolgung von Risiken zu finden. Abschließend werden einige Ansätze diskutiert, um neue Erkenntnisse aus den Simulationsergebnissen zu gewinnen.

#### **3.2 Anforderungskatalog an ein Modell für komplexe Projekte**

Aufbauend auf die Ergebnisse der Situationsanalyse werden Anforderungen, die ein Modell für komplexe Projekte beinhalten muss, genannt und herausgearbeitet.

- Ursache-Wirkungsbeziehungen in komplexen Projekten systemtechnisch abbilden.
- Komplexe Abhängigkeiten von Prozessen und deren Einflüsse aufeinander quantitativ und qualitativ darstellen.
- Kennzahlen ermitteln, die Abweichungen, Unsicherheiten, Sicherheiten und relevante Einflussgrößen transparent darstellen und ihre Wirkung auf den Projektabschluss verdeutlichen.

- Neue Kenngrößen ermitteln, die sich im gesamten Projekt widerspiegeln, um die Realität so gut wie möglich abzubilden.
- Stochastische Kenngrößen berücksichtigen, um die Dynamik zu modellieren.
- Neue kritische Pfade bestimmen, wenn stochastische Größen im Modell berücksichtigt werden.
- Vorhandene Sicherheitsreserven berücksichtigen und somit die Flexibilitätspotenziale der Prozesse realitätsnah darstellen.
- Dynamische Aspekte wie z.B. Zeitverlängerung bzw. Ressourcenmehrung berücksichtigen und die Auswirkungen auf die Projektlaufzeit bzw. auf das Projektergebnis transparent darstellen.
- Techniken anbieten, um den Projektablauf zu simulieren und Fragen der Form „Was wäre, wenn...“ zu beantworten, um somit Risiken und Ergebnisabweichungen von Prozessen zu verfolgen.
- Dadurch die Erreichbarkeit der Projektziele zu prognostizieren und Entscheidungsmöglichkeiten aktiv zu unterstützen, um die richtigen Maßnahmen einleiten zu können.

Es werden bewährte Methoden untersucht, ob diese die Anforderungen erfüllen können. Jede Methode wird auf Anwendbarkeit geprüft.

### 3.3 Grundlagen der Projektplanungsmethoden

Eine der bekanntesten und gleichzeitig ältesten Form der Projektplanung ist die Darstellung von Vorhaben in einem Balkendiagramm. Hauptziel der sogenannten **GANTT-Methode** ist die Darstellung des Zeitbedarfs eines Vorgangs durch eine maßstabsgetreue Länge einer horizontalen Strecke bzw. eines Balkens. Die großen Vorteile dabei sind die Übersichtlichkeit und Verständlichkeit dieser Planungstechnik. Nachteilig wirkt sich aus, dass detaillierte Vorgangsinformationen nur schlecht dargestellt werden können. Geeignet ist diese Methode vor allem dazu, einen groben Überblick eines kompletten Projektes zu geben. Die Darstellungsweise ist bei kleineren Projekten mit weniger Detailinformationen ausreichend und empfehlenswert [93,109].

Ein anderer, ab den fünfziger Jahren beschrittener Weg in der Projektplanung ist die **Netzplantechnik**. Diese Planungsmethodik stellt eine bewährte Methode für das Projektmanagement zum Analysieren, Beschreiben, Planen, Terminieren, Kontrollieren und Steuern von Projektabläufen dar. Burghardt beschreibt weiterhin, dass diese Technik in all ihren Ausprägungen unabhängig von der Projektgröße, der Dauer, der Anzahl der Projektbeteiligten und dem Projektinhalt universell einsetzbar ist [12]. In der Netzplantechnik werden Methoden zur Zeit- oder Terminplanung, Kostenplanung und Einsatzmittelplanung bzw. Kapazitätsplanung bereitgestellt [72]. Mit Hilfe der Netzplantechnik können genaue Vorgangsinformationen sowie auch logische und technisch notwendige Prozessabfolgen und Zusammenhänge klar strukturiert dargestellt werden. Dies ermöglicht eine transparente und konsistente Beschreibung des Projektgeschehens [12]. Um die Vorteile der Netzplantechnik auch in die Modellierung für komplexe Projekte nutzen zu können, werden die wichtigsten Varianten kurz vorgestellt.

Ein Netzplan besteht aus Knotenpunkten, die durch (bewertete) Pfeile miteinander verbunden sind. Bei der Darstellung werden drei Formen unterschieden.

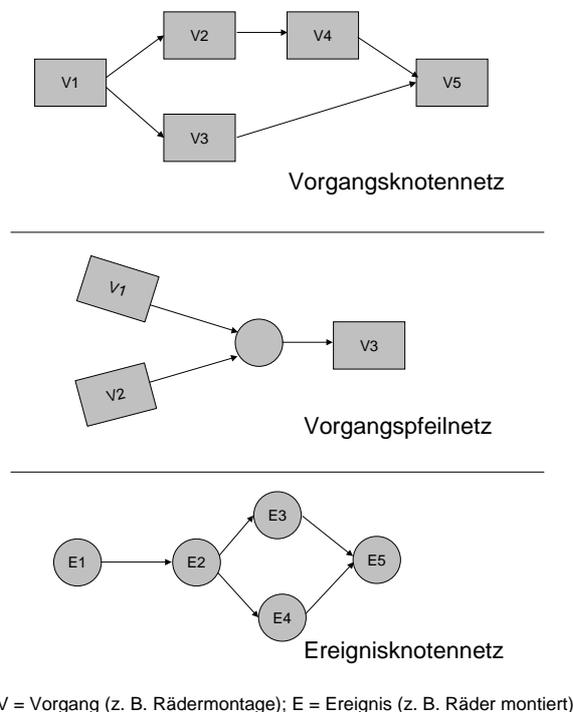


Abbildung 3-1: Schema der grundlegenden Netzplandarstellungen

Die wichtigsten Elemente eines Netzplans sind Vorgänge, Ereignisse und Anordnungsbeziehungen. Laut DIN69900 ist ein Vorgang ein Zeit erforderndes Geschehen mit definiertem Anfang und Ende [15]. Ein Ereignis kennzeichnet einen definierten und damit beschreibbaren Zustand im Projektverlauf. Anordnungsbeziehungen stellen die fachlichen, terminlichen und personellen Abhängigkeiten dar [33].

Generell wird zwischen deterministischen und nicht-deterministischen Planungsmethoden unterschieden. Bei Netzplanmethoden, die deterministische Projektabläufe beschreiben, werden alle im Netzplan dargestellten Wege durchlaufen. Bei den nichtdeterministischen Planungsmethoden wird je nach Wahrscheinlichkeitswert ein Weg von mehreren Möglichkeiten für den weiteren Projektverlauf ausgewählt.

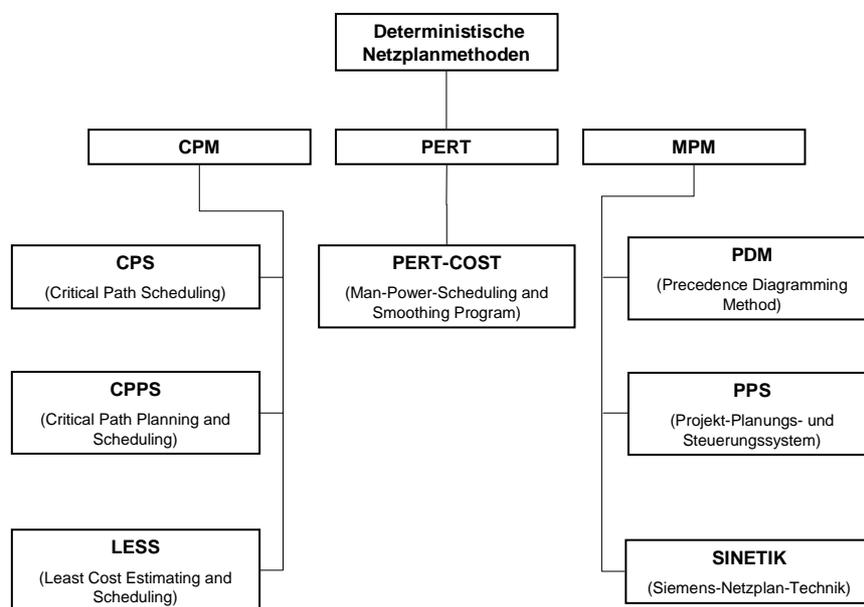


Abbildung 3-2: Übersicht von deterministischen Netzplantechnik-Methoden (vgl. [33])

Wie in Abbildung 3-2 beschrieben, beruhen die verwendeten deterministischen Netzplantechniken auf den drei Methoden **CPM**, **PERT** und **MPM**.

**Critical Path Method (CPM):** Dieses Verfahren konzentriert die Betrachtungen auf den kritischen Pfad einer Planung. In der Literatur wird dies durch die Berücksichtigung der deterministischen Vorgangsdauer und Vorgänger-Beziehungen zwischen den Aktivitäten beschrieben [36,93]. Als Darstellungsweise verwendet CPM das Vorgangspfeilnetz. Bei mehreren Vorgängern wird jener mit der längsten Dauer herangezogen. Alle Vorgänge, bei denen keine Pufferzeiten vorhanden sind, werden

als kritische Vorgänge bezeichnet [71]. Unter Puffer ist in der Projektplanung der Zeitraum zu verstehen, um den ein Vorgang unter bestimmten Voraussetzungen verschoben werden kann [33].

Ein kritischer Pfad besteht aus einer Folge mehrerer kritischer Vorgänge [33]. Generell erlaubt CPM aufgrund der Fokussierung auf den kritischen Pfad lediglich eine temporale Analyse von Projekten. Diese unterstellt auch eine vollständige Sicherheit der Projektstruktur (Vorgänge und Ereignisse) sowie auch aller Zeitangaben (jeweilige Vorgangsdauer und Zeitabstände).

**Program Evaluation and Review Technique (PERT):** Diese Methode zieht die wahrscheinliche Aktivitätsdauer in die Projektplanungsbetrachtungen mit ein. Darin liegt die Besonderheit gegenüber anderen deterministischen Netzplantechniken. Bei PERT wird die Vorgangsdauer als zufallsabhängige Größe aufgefasst. Ausgehend von jeweils einer optimistischen, einer wahrscheinlichen und einer pessimistischen Zeitschätzung werden die wahrscheinlichen Vorgangszeiten errechnet und anschließend in einem Ereignisknotennetzplan dargestellt. Dadurch liegt das Hauptinteresse bei PERT nicht auf den Terminen einzelner Vorgänge sondern auf den Terminen von Ereignissen sowie auf den Wahrscheinlichkeiten, dass diese auch eingehalten werden [71]. Die Schwachstellen dieser speziellen Methode liegen in der genauen Ermittlung und dem beachtlichen Aufwand für das Aktualisieren der Zeitschätzwerte [12].

**Metra Potenzial Method (MPM):** Dieses Verfahren verwendet als Darstellungsform das Vorgangsknotennetz. Die Vorgänge enthalten dabei wichtige Informationen wie Dauer, Puffer und früheste bzw. späteste Anfangs- und Endzeiten. Die Darstellung fokussiert aufgrund des hohen Informationsgrades mehr auf das „Wie“ des Projektablaufs. Dies ist auch erkennbar an den möglichen Anordnungsbeziehungen der MPM-Methode [33]. Die Anordnungsbeziehung kann je nach Projekttyp festgelegt werden. MPM eignet sich besonders für Routineprojekte mit einer hohen Strukturvorgabe [109]. Leider geht bei einer Überladung von „trickreichen“ Anordnungsbeziehungen schnell die Übersicht verloren [12].

Neben den bis jetzt vorgestellten, in der Praxis häufig verwendeten deterministischen Netzplantechniken, gibt es noch weitere Netzplantechniken, welche auch Unsicherheiten in der Projektstruktur erlauben. Dazu gehören u.a.:

**Graphical Evaluation and Review Technique (GERT):** Der Projektablauf in den GERT-Netzplänen wird mit speziellen Logikelementen dargestellt [36]. Auch bei dieser Methode wird zur Vorgangsdauerermittlung auf die Stochastik zurückgegriffen, weshalb diese Methode auch die bei PERT bereits genannten Nachteile besitzt.

**Decision Critical Path Method (DCPM):** Bei dieser Ausführung der Netzplantechnik wurde der CPM ein zusätzliches Graphenelement, die Decision Box, eingefügt. Ein solcher „Entscheidungsknoten“ stellt eine Auswahlentscheidung über alternativ durchführbare Projektabläufe dar. Somit sind die von einem Entscheidungsknoten ausgehenden Pfeile als Alternativen der Projektdurchführung zu sehen. Dabei kann jeder der ausgehenden Anordnungsbeziehungen eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden [108].

Bei der Ideenrecherche für die Modellierung in komplexen Projekten ist von Interesse, wie beim Aufbau eines Netzplans grundsätzlich vorgegangen wird und wie Veränderung im Projektgeschehen in den Netzplänen überprüft werden können. Einen komprimierten Überblick über das Vorgehen beim Aufbau eines Netzplans veranschaulicht Tabelle 3-1.

<b>Definition der Vorgänge</b>	Projektstrukturplan ( <i>Definition von Arbeitspaketen</i> ) Vorgangssammelliste ( <i>Zwischenschritt</i> ) Vorgangsnummernsystem ( <i>Klassifizieren von Vorgängen</i> ) Kontenzuordnung ( <i>wichtig für Aufwands- und Kostenplanung</i> )
<b>Entwurf des Netzplans</b>	Etikettenerstellung ( <i>Übertragen der Vorgänge auf Etikettenträger</i> ) Bestimmung Anordnungsbeziehung ( <i>zeitliche und logische Anordnung der Vorgänge</i> ) Bewertung ( <i>nach Aufwand, Dauer, Sach- und Betriebsmittel, Termine</i> )
<b>Einrichtung der Netzplandatei</b>	Stammdateneingabe ( <i>z.B. Projektname, Verantwortliche, Organisationszugehörigkeit</i> ) Kalendrierung ( <i>Berücksichtigung Arbeitskalender, Feiertage, Wochenenden</i> ) Einheitenfestlegung ( <i>Stunde, Mann-Stunden, Euro</i> )
<b>Eingabe der Netzplandaten</b>	Vorgangserfassung ( <i>Abhängig vom Funktionsumfang und von Projektgegebenheiten</i> ) Eingabe Anordnungsbeziehung ( <i>z.B. Vorgänger, Nachfolger, Art der AOB, Min-Max Abstände</i> ) Koordinateneingabe ( <i>feste Platzierung der Vorgänge</i> )
<b>Durchrechnung des Netzplans</b>	Terminberechnung ( <i>terminliche Vorwärts- und Rückwärtsrechnung</i> ) Einsatzmittelberechnung ( <i>zeitliche Bedarfverlauf der jeweiligen Einsatzmittel</i> ) Koordinatenberechnung ( <i>bei nicht manueller Eingabe der Koordinaten</i> ) Fehlerkorrektur ( <i>Warnungen bei z.B. fehlender Termineingabe oder negativer Puffer</i> )
<b>Auswertung des Netzplans</b>	Ausgaben ( <i>wie Balkendiagramme, Auslastungsdiagramme, Projektstrukturpläne</i> ) Simulationen ( <i>Verändern einzelner Planvorgaben, wie Aufheben von Fixterminen oder Nutzung von Optimierungsmöglichkeiten durch Verschieben der Vorgänge innerhalb ihrer Zeitpuffer und dadurch bessere Auslastung der Einsatzmittel</i> )

Tabelle 3-1: Übersicht der Planungsabschnitte beim Aufbau von Netzplänen (vgl. [12])

Sicherlich besitzt jede Methode der Netzplantechnik für sich spezielle Stärken und Schwächen, wobei sich die MPM-Methode gegenüber anderen Verfahren durchgesetzt hat.

Generell können folgende Erkenntnisse aus den Projektplanungstechniken gewonnen werden. Die Vorgehensweise beim Aufbau von Netzplänen, die übersichtliche Darstellung der Ablaufstruktur, die ausgearbeiteten Methoden zur Terminplanung, Kapazitätsplanung und Kostenplanung, wie z.B. Berechnung von Pufferzeiten oder kritischen Pfaden, und das Durchführen von Simulationen fließen in die nähere Betrachtung ein. Diese Eigenschaften der Netzplantechnik werden auf ihre Anwendbarkeit zur Verfolgung von Risiken und Abbilden der Stochastik weiterentwickelt.

Interessante Auswirkungen sind zu erwarten, wenn Pufferzeiten bzw. kritische Pfade als stochastische Projektkenngößen betrachtet werden.

Ein kritischer Pfad lässt sich mit einer Art Flaschenhals vergleichen, der die maximale Performance eines Netzes begrenzt [131]. Wenn kritische Pfade auch auf andere Daten außer nur den zeitlichen Verlauf bezogen würden, könnten neue Einflussgrößen in Projekten sichtbar gemacht werden.

In den bekannten Projektplanungstechniken wird der Einfluss der Abweichung vom geforderten Prozessergebnis auf den direkten Nachfolger nicht berücksichtigt. Die Betrachtung dieser Abhängigkeit ist aber ein wichtiger Bestandteil, um Risiken verfolgen zu können. Welche Möglichkeiten es zum Modellieren der Ergebnisabhängigkeiten in komplexen Projekten gibt, wird nachfolgend untersucht.

Weiterhin wird in den meisten Projektplanungen die Vorgangsdauer mit einer festen Zeiteinheit versehen, ohne die Abhängigkeit zu den Ressourcen ausreichend zu berücksichtigen. Die vorhandene Dynamik wird dabei nur beschränkt modelliert. Natürlich gibt es Vorgänge, die einen fixen Zeitrahmen benötigen, wie z.B. die Erstellung von Presswerkzeugen. Bei diesen Vorgängen ist eine Kompensierung durch Ressourcenmehrung sehr gering. Aber andere Vorgänge, wie z.B. die Nacharbeit, haben eine Sockelzeit nahe Null. Die Nacharbeitskapazität kann mit Hinzunahme von zusätzlichen Ressourcen (Mitarbeiter, Kosten, Fläche) fast beliebig gesteigert werden und hat somit eine sehr hohe Elastizität.

Ressource-Constrained-Projektplanungen beschäftigen sich mit dem Ziel, Ressourcen in die Betrachtung einzubeziehen, um das Projekt im geplanten

Zeitraum zu beenden. Es wurden einige Modellierungskonzepte und Planungsalgorithmen dafür entwickelt [9,37,41,54,74,75,]. Erweiterte Überlegungen, die die Vorgänge in feste und ressourcenabhängige, elastische Zeiteinheiten aufteilen, sind bereits im Rahmen dieser Arbeit im Vorfeld untersucht worden [45]. Hierbei wurde eine physikalische Analogie herangezogen. Ein Projekt wird als ein System von Federn, die netzwerkartig zwischen Projektstart und -ende aufgespannt sind und bei Bedarf gedehnt bzw. gestaucht werden können, abgebildet. Die Federkonstante spiegelt dabei die Elastizität eines Vorgangs wieder. Ein Vorgang mit einer hohen Sockelzeit und einer geringen elastischen Zeit, der nur durch einen enormen Ressourcenaufwand verkürzt werden kann, besitzt eine hohe Federkonstante. Vorgänge, die durch Zusatzressourcen sehr stark verkürzt werden können, haben eine kleine Federkonstante. Die Auslenkung der Feder entspricht der Vorgangsdauer. Die Analogie mit der Größe „Kraft“ zum Dehnen bzw. Stauchen der Feder wird mit dem Ressourceneinsatz für den jeweiligen Vorgang gleichgesetzt [45].

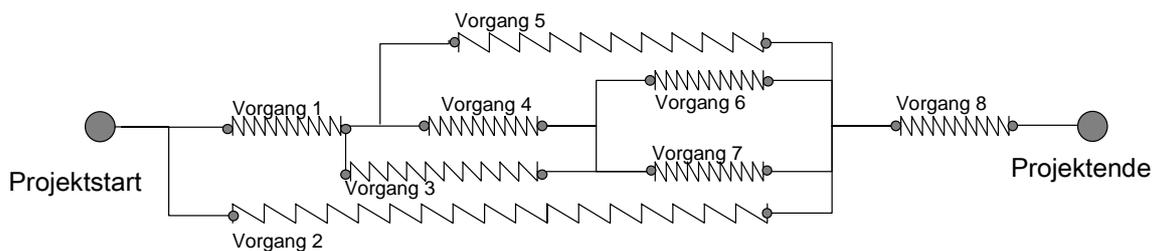


Abbildung 3-3: Physikalische Analogie eines Projektplans

Um die Elastizität in komplexen Projekten zu berücksichtigen, müssen Ressourcen in Abhängigkeit von ihrem Einfluss auf die Projektdauer bewertet werden. Um auch die Elastizität in den Prozessergebnissen realitätsnah abzubilden, könnte die Ressourcenbetrachtung in Bezug auf die Kompensation von Ergebnisabweichungen erweitert werden.

Im Folgenden werden Möglichkeiten untersucht, ob beim Abbilden von komplexen Projekten die Dynamik und das stochastische Verhalten der Prozesse dargestellt werden können. Bekannte Prozess-Modellierungswerkzeuge werden auf ihre Anwendbarkeit für komplexe Projekte geprüft und bewertet.

## 3.4 Auswahl von Methoden zur Modellierung von Geschäftsprozessen

### 3.4.1 Methoden zur Abbildung von Prozessen

Modelle sind vereinfachte Darstellungen der Realität. Diese Abbildung ist mit dem Wunsch verbunden, Erkenntnisse über die bestehende Realität bzw. über die Zukunft zu gewinnen. Wie bereits erwähnt, werden dabei Modelle unter einem bestimmten Blickwinkel abgebildet. Ihr Einsatzschwerpunkt kann z.B. im Bereich des Entwurfs von Informationssystemen, der Darstellung von Ablauforganisation oder der Abbildung von Geschäftsprozessen liegen. Dadurch gibt es in der Praxis eine enorme Anzahl an Möglichkeiten, um Prozesse abzubilden. Im Folgenden werden einige ausgewählte Ansätze zur Prozessmodellierung den benötigten Anforderungen gegenübergestellt und bewertet.

- Mit Fehlerbäumen, Ereignisbäumen oder Zuverlässigkeitsblockdiagrammen [116] können Gefährdungszustände modelliert und bewertet werden. Zwei Nachteile dieser Methoden sind, dass die zeitliche Reihenfolge nicht behandelt wird und nur binäre Zustände von Elementen (funktionsfähig bzw. ausgefallen) berücksichtigt werden können.
- Mit Hilfe von Vorgangskettendiagrammen und ereignisgesteuerten Prozessketten [88,89,85,56], semantischem Objektmodell [21,56], Workflow Management Systemen [43,44], Wertstromdesign [84], Business Activity Maps [70] oder Wertschöpfungskettendiagrammen [135] können Geschäftsprozesse modelliert werden. Mit diesen statischen Prozessmodellen kann zweifellos eine gewisse Transparenz über Prozessstrukturen geschaffen werden und wesentliche Ansatzpunkte für deren Optimierung erkannt werden. Diese Modelle können aber die Dynamik in Projekten nur beschränkt bzw. überhaupt nicht abbilden.
- Mit Structured Analysis and Design Technique [126], UML [30,133], Petrinetze [53,98] oder GRAI [56] können Prozesse im Sinne der Entwicklung von DV-Systemen dargestellt werden. Diese Techniken haben den Nachteil, dass sie den Einfluss von Ergebnisabweichungen auf nachfolgende Prozesse nicht modellieren können und somit die geforderte Risikoverfolgung mit diesen Methoden nicht möglich ist.

Die aufgelisteten Modellierungsmethoden sind bezogen auf ihr Anwendungsgebiet mächtig. Sie erfüllen je nach Modell viele Modellierungsmerkmale wie z.B. Einfachheit der Darstellung, Formalisierungsgrad, Bekanntheitsgrad, Verständlichkeit des Modellinhalts, ganzheitliche Perspektive, Prozess-Controlling<sup>2</sup>, zeitliche und logische Aktivitätsverknüpfung, Werkzeugunterstützung und teilweise eingeschränkte Unterstützung zur Prozesssimulationen. Die benötigten Anforderungen an ein Modell für komplexe Projekte werden aber nur bedingt erfüllt. In vielen Fällen reichen statische Modelle aus, um intuitiv Prozessabhängigkeiten und deren Leistung abzuleiten und damit Aussagen über die sich ergebende Effizienz von Prozessstrukturen zu gewinnen. Sie besitzen jedoch nicht genügend Ausdrucksmächtigkeit, um komplexe Projekte abzubilden. Sie beinhalten demnach ein erhöhtes Risiko einer unzureichenden Modellqualität [20]. Prof. Dr. T. Hofmann hält statische Modelle für dynamische Analysen sogar für gänzlich ungeeignet [80]. So formuliert Tumay in seinem Tutorial: „Business processes are way too complex and dynamic to be understood and analyzed by flowcharting and spreadsheet techniques ... they are adequate in answering ‚what‘ questions, they are inadequate for answering ‚how‘, ‚when‘ or ‚where‘ questions.“[99]

Da die ereignisgesteuerten Prozessketten (EPK) und die Petrinetze die weitverbreitetsten Prozessmodellierungstechniken darstellen, folgt eine kritische Betrachtung ihrer Anwendbarkeit in komplexen Projekten.

Einen überragenden Stellenwert am Markt besitzen die ereignisgesteuerten Prozessketten. Sie bilden die Kernsprache des weltmarktführenden ARIS Toolsets sowie des SAP-R/3 Referenz-Softwaremodells. Zudem werden sie in einer Vielzahl von Beiträgen zur Geschäftsprozessmodellierung EPK verwendet [89]. EPK sind sehr populär und beinhalten gute Ansätze zur Modellierung von Geschäftsprozessen. Sie haben jedoch Schwächen im Hinblick auf erweiterte methodische Anforderungen wie z.B. Simulationen [61]. Uthmann behauptet, dass mit den EPK keine expliziten regelbasierten Modellausführungen vorgenommen werden können [100]. Sie bieten keine dynamische Sicht auf Prozessinstanzen, sondern lediglich eine statische Sicht auf Prozessstrukturen. Somit erfüllen sie die notwendigen Anforderungen nicht.

Im Gegensatz zu den meisten anderen Prozessbeschreibungssprachen ist die überlegene Modellierungsgüte von Petrinetzen wissenschaftlich umfassend erörtert.

---

<sup>2</sup> wie z.B. von Prozess-Durchlaufzeiten, Prozess-Kosten, Prozess-Qualität.

Uthmann behauptet, dass Petrinetze weltweit die methodisch am meisten erforschte Prozessbeschreibungssprache ist. Seit etwa 40 Jahren werden intensive Forschungsaktivitäten zu verschiedenen Aspekten von Petrinetzen durchgeführt. Dabei ist es schwierig, einen Überblick über die umfangreichen Arbeiten zu theoretischen Aspekten von über 60 unterschiedlichen Petrinetz-Typen zu gewinnen [100]. Die praktische Anwendbarkeit vieler dieser theoretischen Überlegungen erscheint problematisch. Die meisten Beiträge konzentrieren sich auf deren Möglichkeiten zur mathematischen Beschreibung und Analysierbarkeit der Systemdynamik durch das Markierungskonzept [100].

Dennoch bestehen gegenüber Petrinetzen insbesondere in der Geschäftsprozessmodellierung und auch in der Simulationstechnik starke Akzeptanzbarrieren. Petrinetze sind sehr allgemein, abstrakt und als Sprache formal zur Beschreibung der Systemdynamik gehalten. Diese Beschreibungskategorien sind für systemtheoretisch bzw. mathematisch weniger erfahrene Nutzer schwer verständlich [100]. Viele Netzdarstellungen weisen erhebliche Defizite in der Lesbarkeit und Übersichtlichkeit auf. Sobald die zu modellierenden Prozesse einen gewissen Umfang überschreiten, geht der Überblick und das Verständnis für die Zusammenhänge sehr schnell verloren [70,11]. Diese genügen bei weitem nicht den heutigen Standards von Prozessdarstellungen im Managementbereich.

Green fasst diese Kritikpunkte zu folgender Aussage zusammen: „Current elaborated Petrinets cannot fulfill these requirements as they are developed from method experts for method experts.“[31]

Der Schwerpunkt der Anwendung von Petrinetzen ist die Darstellung des zeitlichen Verhaltens.[98] Vor allem stochastische Petrinetze sind sehr gut geeignet, um Warteschlangen in Systemen abzubilden. Zur Verfolgung von Ergebnisabweichungen in komplexen Projekten sind sie beschränkt geeignet.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass zur Lösung der im Kapitel 2.4 aufgezeigten Problemstellungen die betrachteten Modellierungsmethoden nur bedingt zweckdienlich sind, um die Dynamik in Prozessen abzubilden, stochastische Elemente zu berücksichtigen, Risiken zu modellieren, qualitative Abhängigkeiten zu beschreiben, mehrere Flussgrößen gleichzeitig zu betrachten, die Ergebnisabweichungen von Prozessen zu verfolgen, verschiedene Simulationen durchzuführen bzw. Entschei-

dungen überprüfen zu können. Somit erfüllen sie die aufgestellten Anforderungen aus Abschnitt 3.2 nur beschränkt.

Wie könnten aber komplexe Projekte abstrahiert werden, um diese Eigenschaften in einem Modell nachzubilden? Dafür wird die Abstraktionsmethode zur Modellerstellung vorgestellt und darauf aufbauend eine geeignete Methode zur Abstraktion von komplexen Projektabläufen untersucht.

### 3.4.2 Abstraktion als Methode zur Modellierung

Abstraktion ist das Herausfiltern des unter einem bestimmten Gesichtspunkt Wesentlichen vom Unwesentlichen [24].

Im Sinne der Modellierung ist Abstraktion die Verallgemeinerung der Realität, um ein auf das Wesentliche beschränkte Abbild des Originalsystems zu erreichen [102]. Es werden dabei Eigenschaften des Systems herausgearbeitet, welche für die Untersuchung wichtig sind, ohne die Gültigkeit der Aussagen bezüglich der Fragestellung zu beeinträchtigen [102].

Bei der Modellierung dient die Abstraktion der Vereinfachung und der übersichtlichen Organisation des Modells [62]. Prinzipiell gibt es zwei Arten der Abstraktion.

- Reduktion: Es wird auf die Abbildung unwichtiger Details in Bezug auf die Aufgabenstellung verzichtet.
- Idealisierung: Es werden Beschreibungselemente des Systems vereinfacht oder idealisiert dargestellt.

Die beiden Arten der Abstraktion können auf alle Beschreibungselemente des zu beschreibenden Umfangs angewendet werden. Attribute können beispielsweise in idealisierter Form beschrieben werden oder, falls deren Einfluss auf das Untersuchungsergebnis gering ist, weggelassen werden.

Vergleichbares gilt für die Elemente und deren Struktur. Auch hier werden Elemente, deren Einfluss auf das Projektergebnis gering erscheint, vernachlässigt oder sie werden in einer idealisierten Form beschrieben.

Eine weitere Form der Abstraktion ist das Zusammenfassen mehrerer Elemente zu einem neuen Element, welches durch neue Attribute beschrieben wird. Auch hier

ist die Reduktion und die Idealisierung der Grundmechanismus der Abstraktion. Wird die Struktur eines Modells wie beschrieben abstrahiert, so geht dies in der Regel mit einer Reduktion von Zuständen und Ereignissen einher [22]. Wird ein Subsystem, bestehend aus mehreren Elementen, durch ein einzelnes Element ersetzt, so reduzieren sich die möglichen Zustände, die das Subsystem annehmen kann und damit auch die Ereignisse innerhalb des Subsystems.

Ein komplexer Projektablauf kann als System von Abläufen betrachtet werden. Ein System besteht aus einer Menge von Elementen, die bestimmte Eigenschaften besitzen und die durch Relationen miteinander verknüpft sind [79].

Zur Beschreibung von Systemen dienen die in Abbildung 3-4 dargestellten Elemente **Attribute**, **Funktionen**, **Struktur** und **Hierarchie**.

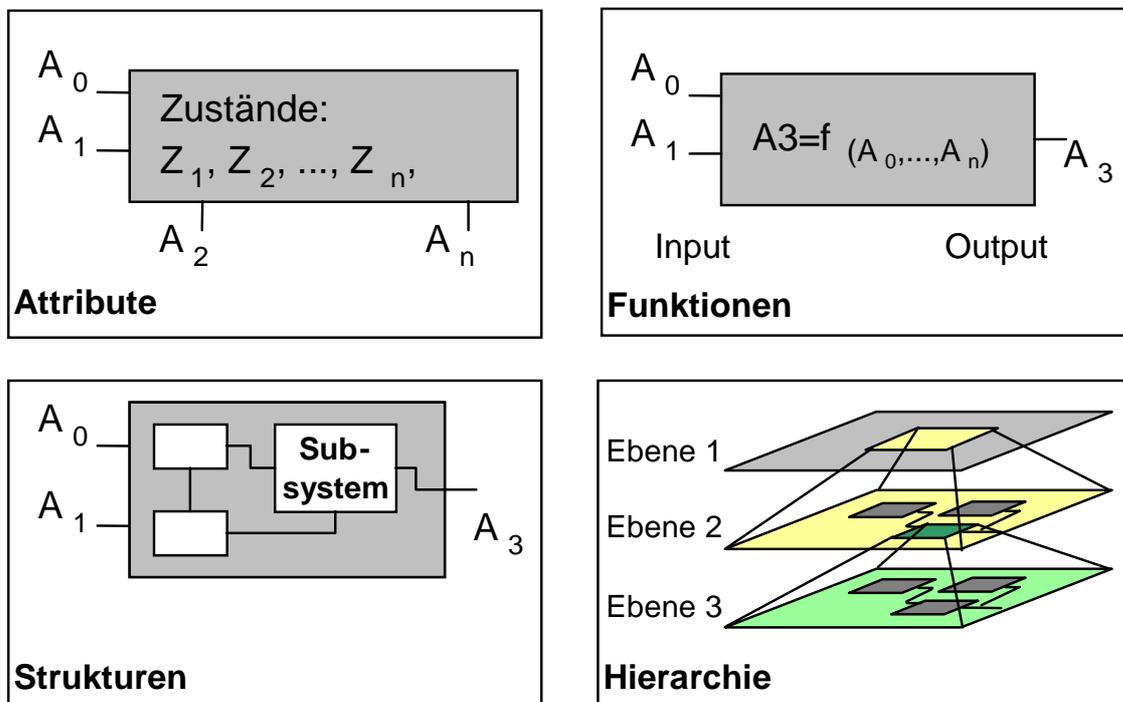


Abbildung 3-4: Beschreibungselemente der Systemtheorie (vgl. [83])

**Attribute** beschreiben die Eingangs- und Ausgangsgrößen und die Zustände des Systems. Der Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen kann als **Funktion** beschrieben werden. Ein System besteht aus Elementen, welche selbst wieder Systeme (Subsysteme) sein können. Die Verbindung zwischen den Elementen wird durch die **Struktur** des Systems bestimmt. Sind Elemente eines Systems selbst wieder Systeme, entsteht eine **Hierarchie** aus Subsystemen [10].

Bei der Modellierung entsteht aus der Betrachtung des Originalsystems zunächst ein mentales Modell, indem das System gedanklich in seine Elemente mit der entsprechenden Struktur und den entsprechenden Attributen zerlegt wird. Dieses erste gedankliche Modell ist noch nicht ablauffähig und beinhaltet noch alle bekannten Eigenschaften. Im nächsten Schritt wird das Modell entsprechend der Aufgabenstellung abstrahiert, so dass nur noch die wesentlichen Systemaspekte vorkommen. Dieses Gedankenmodell wird anschließend in ein Software-Modell umgesetzt, wodurch es lauffähig und experimentierfähig wird [24,101]. Diese grundlegende Vorgehensweise verdeutlicht, dass die Abstraktion ein elementarer Bestandteil der Modellierung ist. Zur Modellierung komplexer Projektnetzwerke wird eine Technik der Abstraktion näher betrachtet.

### **3.4.3 Abstraktion der Projektabläufe durch eine Black Box**

Der Begriff der Black Box stammt aus der Systemtechnik und bezeichnet ein dynamisches System, welches ausschließlich über seine Funktion sowie die Ein- und Ausgangsgrößen beschrieben wird. Die Elemente, die internen Zustände (Attribute) und die Struktur des Systems, bleiben unbetrachtet [10,102].

Im allgemeinen Fall der Systemtechnik beschreibt die Funktion der Black Box, die auch Übertragungsfunktion bezeichnet wird, den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen. Eine Black Box fasst einen beliebigen Teilprozess eines Originalsystems zu einem einzigen Element zusammen. Es werden Überlegungen angestellt, in wie weit die Black Box zum Modellieren von komplexer Projektnetzwerke herangezogen werden kann.

Im Sinne der Projektverfolgung könnten die elementaren Prozesse des Projektes als Black Box betrachtet werden. Die Wirkzusammenhänge innerhalb des Teilsystems werden ausschließlich über die Ein- und Ausgangsgrößen dargestellt. Der Begriff der Black Box wird weiterhin nur noch im Sinne eines Modellelements eines Projektplanes benutzt.

Die Unterscheidungskriterien für formale Modelle können auch auf die Black Box angewendet werden. Bei formalen Modellen wird zwischen sechs Kriterien unterschieden, die Abbildung 3-5 zeigt.

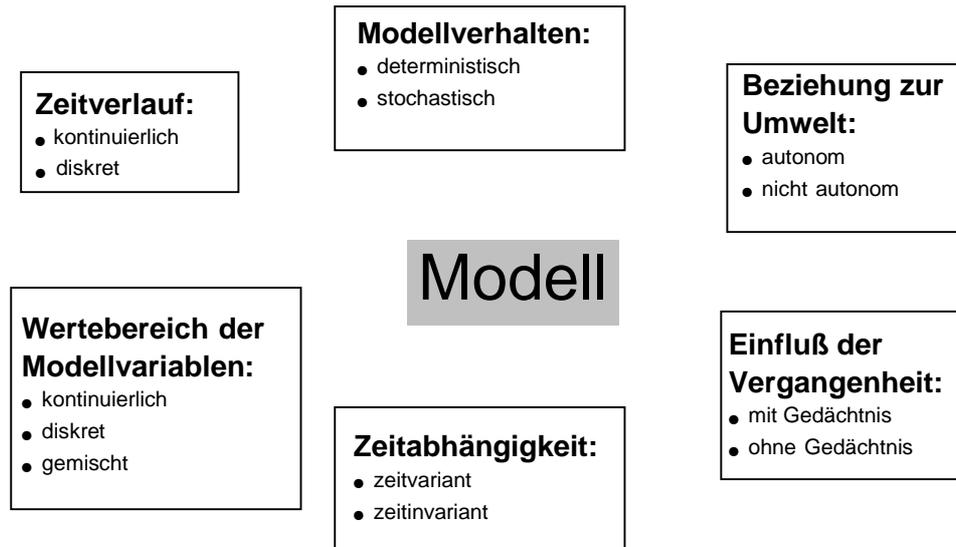


Abbildung 3-5: Fundamentale Unterscheidungskriterien formaler Modelle (vgl. [83])

Es wird grundsätzlich zwischen kontinuierlichen und diskretem Zeitverlauf unterschieden. Ein weiteres Kriterium ist der Wertebereich der Attribute. Sie können sich kontinuierlich oder diskret ändern. Es ist auch möglich, in einem Modell Attribute beider Wertebereiche zu integrieren. Verändert sich das Verhalten der Elemente im Laufe der Zeit, so handelt es sich um ein zeitvariantes Modell. Als zeitinvariant wird ein Modell bezeichnet, wenn es auf Eingangssignale unabhängig von der bis dahin verstrichenen Zeit reagiert. Ist das Modellverhalten von den bisher durchlaufenen Systemzuständen abhängig (z.B. integrierende Systeme), so wird von einem Modell mit „Gedächtnis“ gesprochen. Ist das Systemverhalten von Zufälligkeiten beeinflusst, so wird das Modell als stochastisch bezeichnet. Deterministische Modelle reagieren im Gegensatz hierzu stets definiert in Abhängigkeit ihrer Eingangsgrößen und Systemzustände. Ein autonomes Modell stellt ein abgeschlossenes System dar, welches in keinerlei Wechselbeziehung zu seiner Umwelt steht.

Die Black Box kann wie beschrieben in diesem Sinne kein autonomes System sein, da es sich über die Wechselbeziehung zu seiner Umwelt (Ein- und Ausgangsgrößen) definiert. Bezüglich der Zeit ist die Black Box grundsätzlich mit kontinuierlichem oder diskretem Zeitverlauf denkbar. Gleiches gilt für den Wertebereich der Attribute. Da die Black Box Systemgrößen enthält, die sich nur kontinuierlich ändern können, sind deren Werte von den vorangegangenen Zeitpunkten abhängig. Grundsätzlich wird in einer Black Box durch eine Zeitverschiebung am Eingang auch eine Zeitverschiebung am Ausgang erzeugt. Durch Definition von Funktionen innerhalb der Black Box könnten Zeitverschiebungen durch

evtl. Mehraufwand kompensiert werden. In diesem Sinne besitzt die Black Box ein „Gedächtnis“. Die meisten Prozesse in komplexen Projekten sind fehlerbehaftet und stör anfällig. Da dies zu zufälligen Ereignissen führt, ist das Verhalten der Black Box stochastisch. Eine Black Box ist in der Modellierung separabel<sup>3</sup>, jedoch nur im Verbund für das Abbilden eines Projektes interessant.

Die Black Box wird hier als Einzelteil eines komplexen Prozess- oder Projektumfeldes betrachtet. Das Umfeld setzt sich aus weiteren Black Boxes zusammen. Jede einzelne Black Box besteht aus drei Teilen, dem Eingang, der Funktion und dem Ausgang (Abbildung 3-6).

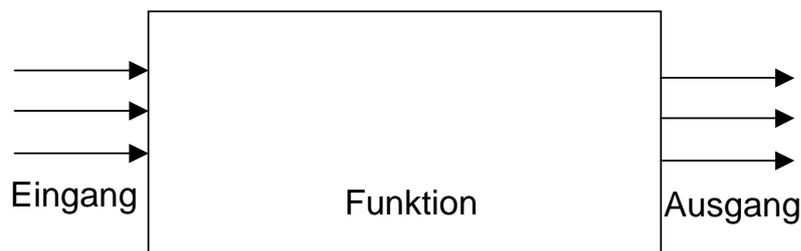


Abbildung 3-6: Elementeschema der Black Box

Ein- und Ausgang einer Black Box sind beliebig komplexe Verbindungen mit der Umwelt, wobei die Verbindungen stets gerichtet sind. Speziell der Eingang beeinflusst die Funktion. Die Abläufe innerhalb einer Black Box werden zusammenfassend als Funktion definiert. Diese Abläufe lassen sich auf mathematische und stochastische Vorgänge reduzieren und erzeugen Ergebnisse. Diese Ergebnisse werden durch den Ausgang an die Umwelt weitergegeben und dienen dort wiederum als Eingang für weitere Black Boxes. Nach diesem Schema können sich beliebige Abläufe, auch Projektverläufe, abbilden.

Die Black Box Methode wird zur Modellierung von komplexen Projekten weiterentwickelt. Sie ist der Ausgangspunkt zur Abbildung der Abhängigkeiten beliebiger Projektverläufe. Im nächsten Schritt müssen die verschiedenen Arten zur Beschreibung der Abhängigkeiten untersucht werden.

---

<sup>3</sup> Separabilität: Zwei (oder mehrere) Gegenstände in Wechselwirkung miteinander bilden gemeinsam ein einziges System. Trennen wir die Gegenstände räumlich voneinander, so haben sie nichts mehr miteinander zu tun und jeder Gegenstand wird mittels eines eigenen Parametersatzes beschrieben.

## 3.5 Beschreibung von Abhängigkeiten zwischen Prozessen

### 3.5.1 Fuzzy Logik

Nur in seltenen Fällen können Verantwortliche Prozessabhängigkeiten funktional genau beschreiben. Im allgemeinen lassen sich nur ungenaue Abschätzungen von Auswirkungen von Vorgängerprozessen auf nachfolgende Prozesse ermitteln. Um diese Abhängigkeiten abzubilden, bietet sich die Fuzzy Logik an, die unscharfe Abhängigkeiten beschreiben kann.

#### Allgemeine Beschreibung der Fuzzy Logik

Zadeh entdeckte, wie harte Wahrheiten in technischen Prozessen nach menschlichem, intuitivem Vorbild abgeschwächt werden können [86,111]. Zadeh ging davon aus, dass sprachliche Konstrukte wie "fast wahr", "nicht ganz wahr" oder "ziemlich wahr" schaltungstechnisch verarbeitet werden müssen, wenn sie in der Technik Anwendung finden sollten. Um sich diesen linguistischen Termen zu nähern, stellte er sie im Ansatz als eine Kennlinie mit einer gewissen Zuordnung hinsichtlich der scharfen Größe und des Zugehörigkeitsgrades dar (Abbildung 3-7).

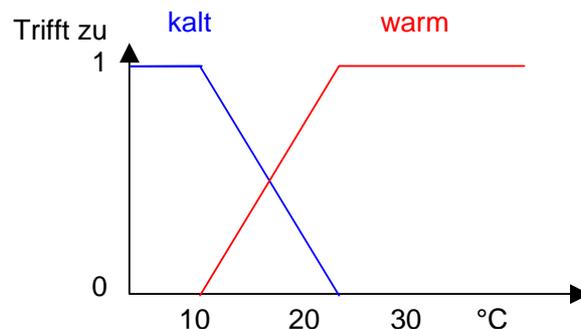


Abbildung 3-7: Beschreibung mittels Fuzzy Logik (Beispiel Raumtemperatur)

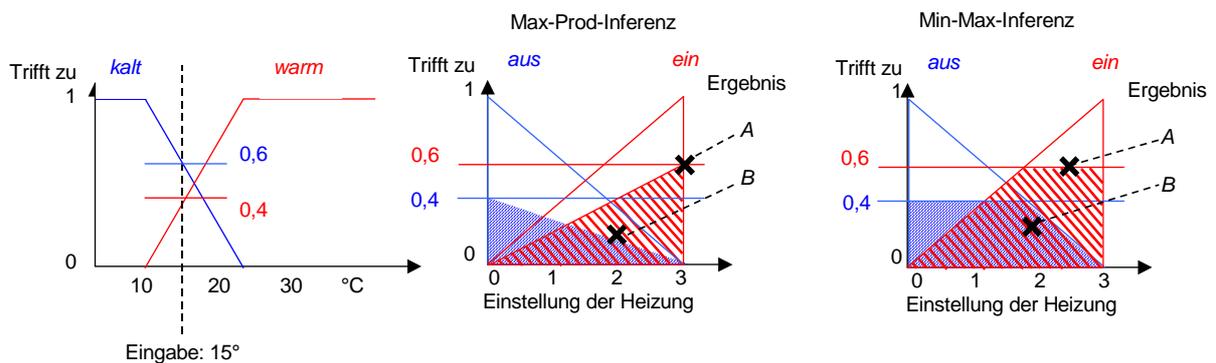
Die Fuzzy Logik ermöglicht es, gewisse logische Schlüsse aus unscharfen Informationen zu ziehen, die in Form von trivialen WENN - DANN Regelkonstrukten ganze Steuerungsabläufe beschreiben. Diese Regeln sind weitgehend unverändert aus der booleschen Algebra übernommen. Die einzige gravierende Änderung besteht in der Möglichkeit, auch Werte zwischen 0 und 1 zu verarbeiten.

Werden Eingangs- und Ausgangsinformationen durchgängig mit der Fuzzy Technik bewertet, können über verschiedene Verarbeitungsmethoden anhand konkreter

Werte am Eingang und über die definierten Regeln und Variablen Zustände und Ergebnisse am Ausgang ermittelt werden.

Die Fuzzy Logik definiert verschiedene Begriffe, die nun näher beschrieben werden [86]. Die Zuordnungsfunktionen wie kalt, warm, aus oder ein sind die sogenannten **Fuzzy Variablen**. Eine Gruppe von Variablen, die eine bestimmte Zustandsart (Raumtemperatur oder Schaltzustand) beschreiben, werden als **Fuzzy Set** bezeichnet. Alle Regeln, mit denen die Abhängigkeiten zwischen den Variablen beschrieben werden, sind in der Regelbasis zusammengefasst. Die Methoden zur Ermittlung von Ausgangswerten anhand bestimmter Eingangswerte werden **Defuzzifizierung** genannt. Für die Ermittlung der Ausgangsvariablen kann entweder die **Max-Prod-Inferenz** oder die **Min-Max-Inferenz** verwendet werden. In beiden Fällen wird je nach Erfüllungsgrad der Variablen eine Ergebnisfläche pro Variable ermittelt. Bei Verwendung der Max-Prod-Inferenz wird der Variablenverlauf mit dem jeweiligen Erfüllungsgrad multipliziert. Bei der Min-Max-Inferenz wird die Variable auf Höhe des Erfüllungsgrades gekappt. Beide Inferenzen verwenden die folgenden Defuzzifizierungsmethoden.

Bei der **Schwerpunktmethode** werden die Flächen der erfüllten Ergebnisvariablen zusammengeführt. Die Position des Flächenschwerpunktes entspricht dem gesuchten Ausgangsergebnis. Bei der **Maximummethode** wird der höchste Punkt, der bei den erfüllten Ausgangsvariablen erreicht wird, als Ausgangsergebniswert verwendet. Ein Beispiel soll die Funktionsweise der Fuzzy Logik verdeutlichen [111].



Regel 1: WENN Zimmertemperatur *kalt* DANN Heizung *ein*  
 Regel 2: WENN Zimmertemperatur *warm* DANN Heizung *aus*

Abbildung 3-8: Beispiel Fuzzyregler

Abbildung 3-8 veranschaulicht eine einfache Fuzzy Logik mit zwei Regeln, die die manuelle Einstellung einer Heizung anhand der empfundenen Raumtemperatur ermöglicht.

Es wird ein Wert ( $15^\circ$ ) in die Logik eingegeben. Dabei wird für jede Variable ein Erfüllungsgrad ermittelt.

$warm = 0.4$  und  $kalt = 0.6$

Über die Regelbasis werden die Erfüllungsgrade der Ausgangsvariablen ermittelt.

$Heizung\ ein = 0.6$  und  $Heizung\ aus = 0.4$

Anschließend folgt die Defuzzifizierung. Es kann durch die Ermittlung des Flächenschwerpunktes aller ermittelten Einzelflächen ein Ergebnis  $B$  ermittelt werden. Mittels Maximummethode, bei der ein maximaler Punkt der erfüllten Ergebnisvariablen zur Ausgangsermittlung herangezogen wird, kann das Ergebnis  $A$  ermittelt werden.

Die Projektion auf die x-Achse erzeugt in beiden Fällen den benötigten Ausgangswert, der die konkrete Schaltstellung der Heizung angibt. Bei Verwendung der Max-Prod-Inferenz, ergeben sich dadurch folgende Ergebniswerte.

$A = 3$  und  $B = 2$

Bei Verwendung der Min-Max-Inferenz ergeben sich teilweise veränderte Ergebniswerte.

$A = 2.4$  und  $B = 2$

Da die Fuzzy Logik in der Lage ist, Abhängigkeiten qualitativ abzubilden, wird untersucht, inwiefern sie für das Beschreiben von Ergebnisabhängigkeiten von Prozessen hilfreich sein kann. Folgende Vor- und Nachteile der Fuzzy Logik im Bezug auf das Anwendungsgebiet in großen Projektnetzwerken lassen sich feststellen.

### **Vorteile der Fuzzy Logik**

Fuzzy Logik arbeitet mit qualitativen Angaben, wie „vielleicht“, „wenig“ oder „etwas“, die der menschlichen Denkweise sehr ähnlich sind. Dies bedeutet auch, dass die benötigten Abhängigkeiten durch Experten ohne große Kenntnisse der Mathematik durchgeführt werden können.

Mit Fuzzy Logik ist es möglich, ohne aufwendige mathematische Modellbildung auf der Basis des vorhandenen technischen Wissens Regelstrategien zu erstellen. Da jedem Systemzustand leicht verständliche Regeln zugeordnet sind, beschleunigen sich die Modellierung und die spätere Realisierung [81].

Fuzzy Systeme lassen sich auch auf einfachen Rechnern einsetzen. Dies bedeutet, dass die Simulationsdurchführung online auf Anfrage angeboten werden kann. Die Ergebnisse liegen schnell vor, da die Berechnungen nicht lange dauern, so dass der Benutzer praktisch keine übermäßige Zeitverzögerung feststellen kann.

### **Nachteile der Fuzzy Logik**

Im Rahmen der weiteren Untersuchung der Anwendbarkeit der Fuzzy Logik für die Abbildung und Simulation von komplexen Projektabläufen wurden auch verschiedene Schwierigkeiten und Nachteile identifiziert, die deren Einsatz möglicherweise einschränken.

Die Größe einer Regelbasis einer Fuzzy Logik steigt exponentiell sowohl mit der Anzahl der Eingangsgrößen als auch der Anzahl der Variablen pro Eingang. Werden komplexe Projekte abgebildet, so wird automatisch die Größe der Regelbasis schnell Dimensionen erreichen, die nicht mehr einfach von den Anwendern definiert werden können. Daraus folgt eine starke Einschränkung der erlaubten Eingangsgrößen- und Variablenzahl.

Bei Verwendung von klassischen Defuzzifizierungsmethoden kann nicht immer das ganze Intervall am Ausgang der Logiken erreicht werden. Konkret bedeutet dies: Bei besten Vorgaben wird mit besten Verläufen nicht das beste Ergebnis erreicht. D.h., je länger die Kette der Prozesse ist, desto weiter verschlechtert sich das Ergebnis ohne Verschlechterung der Ausgangsvorgaben. In der Abbildung 3-9 wird dargestellt, dass weder mit der Schwerpunkts- noch mit der Maximummethode das ganze Ergebnisintervall erreicht wird. Die Methoden müssen derart geändert werden, dass das ganze Ergebnisintervall kontinuierlich erreichbar gemacht wird.

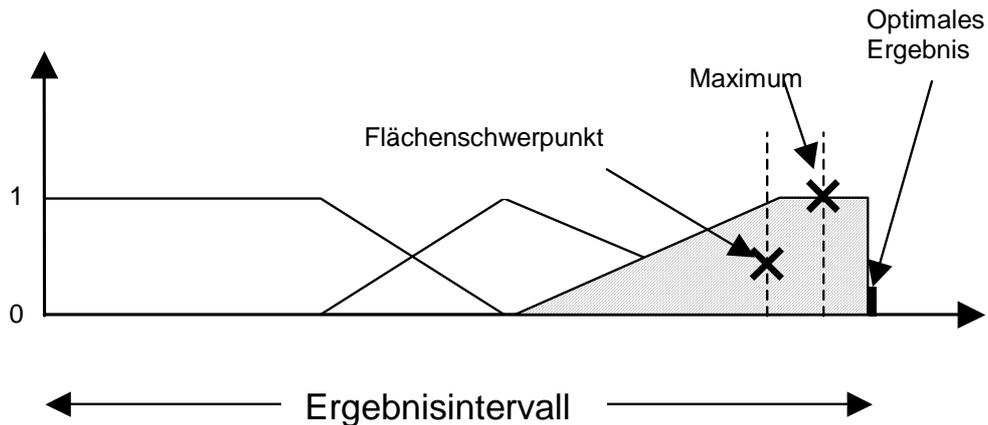


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung der Intervallabdeckung von Maximum- und Schwerpunktmethode

Es lässt sich schließlich feststellen, dass die Fuzzy Logik als brauchbare Logik zur Betrachtung und Beschreibung von nicht eindeutig definierbaren Abhängigkeiten verwendbar ist. Vor allem für komplexe Netzstrukturen mit unscharfen Kenntnissen über die Einflussstärke ist Fuzzy Logik gut geeignet. Es sind jedoch verschiedene Anpassungen vorzunehmen, um einige Schwächen im Hinblick auf die Bedürfnisse bei der Abbildung und Simulation von Risiken in Projekten zu umgehen.

### 3.5.2 Kausale Abhängigkeit

In Projekten gibt es Prozessabhängigkeiten, die durch Experten genau wiedergegeben werden können. In diesem Fall wird eine direkte Übertragungsfunktion von Ausgangswerten des Vorgängers zu Eingangswerten des Nachfolgers benötigt. Dabei kann der Eingangswert eines Prozesses durch die Vorgängerergebnisse errechnet werden. Bei mehreren Vorgängern kann es nötig sein, die Abhängigkeiten untereinander zu klassifizieren. Wird bereits bei der Auswahl von Funktionen eine Gewichtung implizit angenommen, so kann auf eine explizite Klassifizierung der Abhängigkeiten untereinander verzichtet werden.

Um kausale Abhängigkeiten für den Experten definierbar zu machen, bedarf es der Erstellung eines Kataloges mit möglichen Übertragungsfunktionen oder einer automatisierten Definition von Übertragungsfunktionen.

Wird eine Abhängigkeit kausal definiert, könnte die Definition der Abhängigkeitsfunktion durch eine einfache Auswahl aus einer Liste vorgefertigter Funktionen erfolgen. Eine weitere Möglichkeit wäre die manuelle Definition von Funktionen nach

mathematischen Regeln, wobei entsprechende mathematische Kenntnisse bei den Experten erforderlich wären. Auch eine mathematische Interpolation anhand mehrerer vom Anwender definierter Funktionspunkte stellt eine weitere Lösung dar, um kausale Abhängigkeiten darstellbar zu machen.

Es konnten zwei vielversprechende Möglichkeiten vorgestellt werden, wie Abhängigkeiten zwischen zwei Prozessen definiert werden können. Im nächsten Abschnitt folgt die Untersuchung geeigneter Methoden zur Ermittlung der Funktion in der Black Box, um die dynamischen Aspekte berücksichtigen zu können und wichtige Grundlagen zur Simulation von Ergebnisabweichungen zu finden.

### **3.6 Auswahl geeigneter Simulationsmethoden zur Risikoverfolgung**

Die VDI-Richtlinie 3633 definiert den Begriff der Simulation wie folgt: „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden.“ [102]

In diesem Sinne findet die Simulation Anwendung in verschiedenen Fachbereichen der Naturwissenschaften, Technik, Betriebswirtschaft und Medizin. Die Simulationstechnik kann auf eine Tradition von 45 Jahren intensiver Forschung und Praxis in der Simulation diskreter Prozesse zurückblicken. Das Wissen und die Erfahrung der Simulationstechnik konsolidieren sich zu einem erheblichen Anteil in zahlreichen Simulationstool [100].

Das Potenzial der Simulation liegt insbesondere in der besseren Abschätzbarkeit der Auswirkung von Entscheidungen, Abweichungen, Ressourcenengpässen und stochastischen Phänomenen in komplexen Projekten.

Es existieren verschiedene Arten der Simulation: u.a. die kontinuierliche, die quasikontinuierliche und die diskrete Simulation.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Auf die detaillierte Definition von Simulationen und deren Einsatz sei auf folgende Literatur verwiesen: [2,55,76,77,87,91,94].

Der Fokus der vorliegenden Arbeit zielt auf die Prognose von Ergebnisabweichungen in komplexen Projekten. Dabei soll das Ergebnis eines Prozesses zu einem definierten Zeitpunkt vorhergesagt werden. Aus diesem Grund wird zur Abgrenzung innerhalb des weiten Feldes der Simulation in den weiteren Betrachtungen ausschließlich die diskrete, ereignisorientierte Simulation berücksichtigt. Bei zeitdiskreten Simulationsmodellen werden die Änderungen des Systemzustandes nur zu bestimmten, diskreten Zeitpunkten betrachtet. Es wird also durch eine endliche Folge von Zuständen die zeitliche Entwicklung des Systems beschrieben. Die Zustände, die zeitlich zwischen den diskret verteilten Zeitpunkten der Zustandsänderung liegen, werden nicht berücksichtigt. Der Zeitpunkt der Neuberechnung der Zustandsvariablen wird in der zeitdiskreten Simulation auf das Eintreten eines bestimmten Ereignisses gelegt [77]. Diese wird auf ihre genaue Anwendbarkeit zur Verfolgung von Risiken in großen Projekten bewertet und bedarfsgerecht angepasst.

Diskrete Modelle sind zufallsabhängig. Folglich müssen Kenngrößen bestimmt werden, die zur Zufallszahlenerzeugung herangezogen werden können.

### 3.6.1 Berücksichtigung der Eigendynamik in Prozessen

In großen Projekten treten eigendynamische Abweichungen in positiver und in negativer Richtung auf. Die eigendynamische Abweichung vom Ergebnis resultiert durch Unsicherheiten wie Risiko bzw. Chance in Prozessen. In einer Zeit der schnellen Veränderung ist **Unsicherheit** insbesondere in der Projektarbeit keine Ausnahme. Durch eine Vielzahl von unsicheren Faktoren können Projektrisiken entstehen, die die zu erreichenden Leistungen erheblich beeinträchtigen. Meyer definiert vier Unsicherheitstypen: Abweichung, vorhergesehene Unsicherheit, unvorhergesehene Unsicherheit und Chaos [13]. Er beschreibt weiterhin, dass ein Gleichgewicht zwischen Planen und Verfolgen von Unsicherheiten und Lernen aus unvorhergesehenen und chaotischen Ereignissen bestehen muss, um Unsicherheiten in Projekten zu managen. In der Entscheidungstheorie wird Unsicherheit im erweiterten Sinn aufgespalten in Unsicherheit, bei der keine Wahrscheinlichkeiten angegeben werden können, und in Risiko. Die Entscheidungssituationen unterscheiden sich in der Form, dass subjektive oder objektive Eintrittswahrscheinlichkeiten für eine Risikosituation bekannt sind [68].

Es gibt eine Vielzahl von Definitionen, die sich mit dem Wort Risiko beschäftigen. Laut PMI bedeutet Risiko „ein noch nicht eingetretenes Ereignis, welches einen positiven oder negativen Einfluss auf das Erreichen der Projektziele hat.“[123] Daraus geht hervor, dass Risiken nicht ausschließlich negativ sind. Versteegen ordnet Risiken zu Vorgängen, bei denen der Ausgang ungewiss ist und welche Auswirkungen dies haben kann [103].

Härterich differenziert Risiko als Möglichkeit der Zielverfehlung oder als Informationsdefizit [34]. Schierenbeck verwendet die Standardabweichung als Risikomaß [90]. In den weiteren Kapiteln wird von der Definition des Risikos als Möglichkeit der Zielverfehlung ausgegangen.

Ein Risiko hat immer eine positive und eine negative Seite [35]. Ein Ereignis mit positivem Einfluss wird im weiteren als Chance, ein Ereignis mit negativem Einfluss als Risiko betrachtet. Ein Risiko stellt eine bestimmte negative Abweichung, die eintreten oder nicht eintreten kann, dar. Daher wird für den Eintrittsfall des Risikos eine Wahrscheinlichkeit als maßgebend betrachtet. Darüber hinaus besitzt das Risiko einen Wert der Abweichung. Dieser ist das Ausmaß des Fehlers oder die Schwere der Abweichung. Im gleichen Maße kann auch für eine Chance die Wahrscheinlichkeit einer Abweichung in die positive Richtung und der Grad der Verbesserung betrachtet werden. Folglich lässt sich Risiko oder Chance immer als das Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit und deren Ausmaß betrachten.

$$R = P(R) \cdot A(R) \qquad C = P(C) \cdot A(C)$$

$R$  = Risiko;  $C$  = Chance,  $P$  = Wahrscheinlichkeit,  $A$  = Ausmaß

Somit kann anhand der Wahrscheinlichkeit die mögliche Abweichung direkt auf das zu erzielende Ergebnis eines Prozesses umgerechnet werden.

Allgemein kann das Risiko (oder die Chance) als die Möglichkeit der Abweichung betrachtet werden, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eintritt. Mathematisch betrachtet ist hier die Konstruktion einer Verteilungsfunktion vollkommen ausreichend. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit, jeden einzelnen potentiellen Fehlerfall als Einzelrisiko  $R$  zu betrachten. Jeder Abweichungsfall würde je einen Wert für Wahrscheinlichkeit  $P$  und für Ausmaß  $A$  erhalten. Es entsteht statt einer Verteilungsfunktion zur Beschreibung des Risikos eine Punktwolke von

Risiken. Jedes einzelne Risiko kann nun anhand von den drei Werten  $A$ ,  $P$  und  $R$  betrachtet werden.

Kaplan betrachtet diese Risikofälle als Risikotriplets [49,50]. Um Triplets auch für Chance zu verwenden, bedarf es ebenfalls der Identifizierung aller möglichen Einzelchancen zur Konstruierung der benötigten Chancenpunktewolke.

Da durch die Wahrscheinlichkeiten in Risiko und Chance zufällige Ereignisse abgebildet werden können, könnten sie in einer Simulation zur Zufallszahlen-erzeugung herangezogen werden. Wie Zufallszahlen ermittelt werden können, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

### 3.6.2 Ermittlung von Zufallszahlen

Durch Chancen und Risiken in Prozessen von komplexen Projekten entstehen eigendynamische Abweichungen. Diese Streuung basiert auf stochastischen Ereignissen, dem Element der Wahrscheinlichkeit  $P$  in der oben genannten Definition von Risiko und Chance.

Zur Bestimmung von Chancen- bzw. Risikoereignissen müssten Stichproben anhand von Simulationen ermittelt werden.

Diese Ereignisse können durch Nutzung von Zufallszahlen bestimmt werden. Anhand von geeigneten Fragen könnten die Elemente einer Chance oder eines Risikos bestimmt und eine prozessspezifische Verteilungsfunktion aufgestellt werden. Diese Funktion würde definitionsgemäß von der Wahrscheinlichkeit 0 über die möglichen Ausmaße bis zur Wahrscheinlichkeit 1 ansteigen. Im Simulationslauf wird eine Stichprobe mit Hilfe einer gleichverteilten Zufallszahl im Intervall von 0 bis 1 ermittelt. Dieser Wert wird an der konstruierten Wahrscheinlichkeit angetragen. Somit wird an der anderen Achse das entsprechende Ausmaß bestimmt. Die mögliche Vorgehensweise zur Bestimmung eines Risiko- bzw. Chancenausmaßes wird anhand einer Verteilungsfunktion eines normalen Würfels in Abbildung 3-10 erläutert.

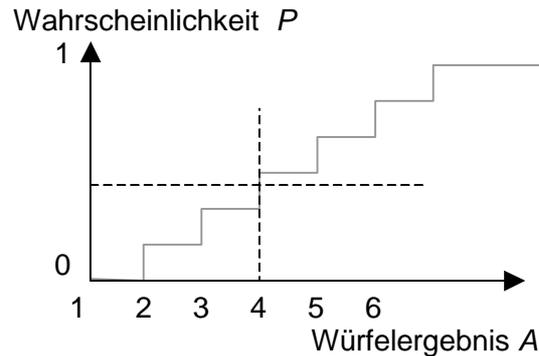


Abbildung 3-10: Darstellung eines Würfelergebnisses anhand der Verteilungsfunktion

In Anlehnung an die oben beschriebene Vorgehensweise wird eine Stichprobe anhand der Verteilungsfunktion eines Würfels im Intervall zwischen 0 und 1 ermittelt. Dieser Wert wird an der Wahrscheinlichkeitsachse angetragen und der Schnittpunkt ergibt das zufällige Ergebnis des Würfels. Diese Vorgehensweise wird in der Abbildung 3-10 mittels der gestrichelten Linie gezeigt. Da dies ein Ergebnis eines Laufes ist, muss durch mehrere unabhängige Replikationen ein repräsentatives Ergebnis ermittelt werden [2].

### 3.6.3 Unabhängige Replikationen

Bei der Verwendung von Zufallszahlen resultiert das Ergebnis eines Simulationslaufs aus einer gewissen Folge von einzelnen Zufallszahlen. Würde man aus dem Ergebnis dieses einzelnen Laufes eine Aussage ableiten, erhält man verfälschte Werte. Der einfache Wurf eines Würfels kann beispielsweise sechs unterschiedliche Ergebnisse haben. Wenn man diesen Würfel nun nur ein einziges Mal werfen würde, wäre fälschlicherweise die geworfene Augenzahl mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 zu interpretieren, während alle anderen fünf möglichen Ergebnisse die Wahrscheinlichkeit 0 haben. Es ist leicht erkennbar, dass öfters gewürfelt werden muss, um verwertbare Zahlenwerte für die Wahrscheinlichkeiten zu gewinnen.

Diese Versuchsiterationen mit mehreren Simulationsläufen werden Replikationen genannt. Eine Replikation besteht aus einem Simulationslauf mit einzigartiger Zufallszahlenfolge. Die Einzigartigkeit der Zufallszahlenfolge wird erreicht, indem der Zufallszahlengenerator mit einem neuen, bisher unbenutzten Wert initialisiert wird. Danach wird der Lauf mit den bekannten Parametern durchgeführt. Zu beachten ist,

dass ein solcher Lauf eine abgeschlossene und unabhängige Simulation des Modells darstellt. Anschließend werden alle Daten, die als Ergebnisse betrachtet werden sollen, aus dem Modell extrahiert und akkumuliert. Nach der Simulation aller geforderten Replikationen werden aus den entstandenen Daten Mittelwerte, Varianzen und Vertrauensintervalle gebildet [2].

Zum Abbilden der Dynamik in komplexen Projekten und zur Verfolgung von Ergebnisabweichungen sollten Risiken und Chancen in Prozessen berücksichtigt werden. Dies kann realisiert werden, indem die Funktion der Black Box dahingehend erweitert wird.

### **3.6.4 Möglichkeiten zur Bewertung von Simulationsergebnissen**

Wenn die projektplanspezifischen Daten sowie die Ergebnisse der Simulationen bekannt sind, können die Elemente eines Projektplans nach verschiedenen Gesichtspunkten bewertet werden. Eine Möglichkeit der Bewertung wurde bereits durch Aktiv- oder Passivklassifikationen von Prozessen im Abschnitt 2.3.2 aufgezeigt. Die Sensitivitätsanalyse könnte auf ein komplettes Projektnetzwerk angewendet werden, um kritische Prozesse, effiziente Einflussgrößen sowie „unwichtige“ Prozesse zu identifizieren. Es gilt, Lösungen zu finden, wie diese Methode in ein neues Modellierungskonzept eingearbeitet werden kann.

Eine Möglichkeit könnte in der Bestimmung der externen und internen Unsicherheiten bzw. Sicherheiten in den Prozessen liegen. Externe Unsicherheit ist die Abhängigkeit eines Prozesses von seinen Vorgängern, wobei berücksichtigt werden muss, wie stark Abweichungen von Vorgängern den Prozess negativ beeinflussen. Die externe Sicherheit wäre demzufolge der direkte Kehrwert.

Eine Unsicherheit ist groß, wenn eine prozentual kleine Abweichung der Vorgänger eine prozentual große Abweichung im Prozess verursacht. Umgekehrt ist die Unsicherheit klein, wenn eine große prozentuale Abweichung des Vorgängers nur eine prozentual kleine Abweichung erzeugt.

Interne Sicherheiten und Unsicherheiten könnten im Prozess selbst unabhängig von anderen Prozessen bestimmt werden. Um diese Werte zu ermitteln, könnten Simulationen ohne Berücksichtigung der Einflüsse von den Vorgängern einen Überblick über die möglichen Abweichungen in positiver und negativer Richtung

geben. Die Breite der Ergebnisstreuung könnte ein Indiz für die Eigendynamik in den Prozessen und somit ein Gradmesser für die interne Sicherheit bzw. Unsicherheit sein.

Eine weitere Interpretationsmöglichkeit von relevanten Steuergrößen könnte das Aufzeigen von kritischen Pfaden in Projekten sein. Dabei gilt es, die Stochastik in dynamischen Projekten bei der Ermittlung von kritischen und anderen Pfaden zu berücksichtigen.

Weitere Steuerungsgrößen könnten unter anderem durch die Zielerreichungsebenen von Beer abgeleitet werden. Er hat im Rahmen seines Modells drei Zielerreichungsebenen (*Realität*, *Kapazität* und *Potenzialität*) definiert, die zu drei verschiedenen Indikatoren (*Produktivität*, *Latenz* und *Gesamtleistung*) kombiniert werden können [5,6]. Diese Faktoren könnten mit den bereits genannten Projektkenngrößen Ergebnis, Risiko und Chance in Verbindung gebracht werden. Dabei könnte die Realität die momentane Ergebnisverteilung aus der Simulation darstellen. Kapazität zeigt, was bei gegebener Rahmenbedingung erreicht werden könnte, wenn alle Möglichkeiten ausgeschöpft werden. In diesem Gedankenspiel müssten somit alle Chancewahrscheinlichkeiten auf eins gesetzt werden. Somit könnten Verbesserungspotenziale identifiziert werden. Potenzialität bedeutet, die bestmögliche Ausnutzung und Weiterentwicklung der eigenen Mittel bei Beseitigung hindernder Bedingungen. In diesem Fall würden alle Chancen genutzt ( $P(C)=1$ ), darüber hinaus wird jedes Risiko verhindert ( $P(R)=0$ ). Die so ermittelten Ergebnisse würden, ausgehend von den aktuellen Vorgaben, das maximal erreichbare Ergebnis zeigen. Aus diesen Überlegungen könnten sich weitere Steuergrößen ableiten lassen. *Latenz* ( $=Kapazität/Potenzialität$ ) würde zeigen, ob Anstrengungen zur Risikovermeidung oder Bemühungen zur Chancennutzung lohnender wären. *Produktivität* ( $=Realität/Kapazität$ ) könnte die nicht ausgeschöpften Potenziale durch die Chance darstellen. *Gesamtleistung* ( $=Latenz*Produktivität$ ) würde somit den Gesamtspielraum nach oben betrachten [5,6].

### **3.7 Zusammenfassung der Einschränkungen in den bestehenden Ansätzen**

Es ist eine umfangreiche Betrachtung von Modellierungskonzepten zur Simulation von Ergebnisabweichungen und Verfolgung von Risiken in komplexen Projekten erfolgt.

Bekannte Projektplanungs- und Prozessmodellierungstechniken wurden auf ihre Anwendbarkeit hin diskutiert und bewertet. Ansätze zur Abbildung der Elastizität wurden erörtert. Die Methodik der Abstraktion als Abbild von komplexen Projektnetzwerken wurde näher betrachtet. Dabei konnten Potenziale aufgezeigt werden, u.a. die Black Box Methode, mit der die Dynamik von großen Projekten abgebildet werden kann. Zur Beschreibung der Ergebnisabhängigkeiten von Prozessen untereinander wurden erste Ansätze vorgestellt. Es wurden Möglichkeiten diskutiert wie die Dynamik von Projekten in neuen Größen wie Risiko bzw. Chance dargestellt, simuliert und bewertet werden kann.

Bei der Auswahl von Methoden sind Einschränkungen bei bekannten Methoden festgestellt worden. Die Situationsanalyse und die Methodenuntersuchung zeigen, dass bekannte Projektplanungstools und Prozessmodellierungsmethoden nur bedingt zur Verfolgung von Risiken geeignet sind. Die vorhandene Dynamik in großen Projekten wird nicht ausreichend abgebildet. Die damit verbundenen stochastischen Einflüsse werden nur beschränkt berücksichtigt. Auch der Einfluss eines Prozesses auf das Ergebnis seines Nachfolgers wird nicht befriedigend betrachtet und modelliert. Vor allem werden in der Abstraktion wichtige und in der Realität vorhandene Größen ungenügend berücksichtigt. Die Notwendigkeit, ein neues Modell zu entwickeln, um diese Anforderungen in komplexen Projekten gerecht zu werden, ist gegeben. Dafür konnten bereits vereinzelt aus bekannten Methoden gute Lösungsansätze gewonnen werden. Um alle Anforderungen zu erfüllen und somit einen wichtigen Beitrag für große Industrieprojekte leisten zu können, gilt es, anhand von den erarbeiteten Ansätzen ein neues Konzept zur Modellierung von Risiken in komplexen Projekten zu entwickeln.

## **4 Ein neues Modell zum Abbilden komplexer Projekte**

### **4.1 Übersicht**

Eine umfangreiche Basis an Lösungsmöglichkeiten wurde bisher herausgearbeitet. Diese Ideen werden spezifiziert und für das neue Modell konsolidiert und erweitert. Es werden die Erwartungen an das neu zu erarbeitende Modell angekündigt. Anschließend werden die wichtigsten Grundlagen erörtert. Dafür werden die Prozesse in Black Boxes modelliert. Die Erweiterung der Funktionalität der Black Boxes und die Funktionsweise des neuen Modells werden ausführlich hergeleitet. Der Ablauf der Simulation wird mit dem neuen Modell diskutiert. Die neue Konzeption bietet viel Potenzial, praxisrelevante Kenngrößen im Modell abzubilden.

### **4.2 Erwartungshaltung**

Mit dem neuen Modell sollen große Industrieprojekte abgebildet werden. Die Dynamik in den Projekten soll dabei berücksichtigt werden können. Die Abhängigkeit der Prozesse und ihr Einfluss voneinander soll sichtbar sein. Das Modell soll das prozessspezifische Verbesserungspotenzial berücksichtigen und dieses zur Verbesserung von Abweichungen gezielt heranziehen können. Abweichungen in Projekten sollen darstellbar und verfolgbar sein. Es muss möglich sein, die Ergebniserfüllung einzelner Prozesse und des Gesamtprojekts zu verfolgen. Die Unsicherheit in den Projekten soll durch stochastische Größen betrachtet und somit die Elastizität der Prozesse in der Prognose berücksichtigt werden können. Mit der Simulationsfunktion sollen wichtige Projektkenngrößen in die Zukunft prognostiziert und eine Entscheidungsgrundlage für die Projektbeteiligten angeboten werden können. Eine Auswahl von kritischen, gefährdeten, sicheren und neutralen Prozessen soll dabei zur Entscheidungsfindung aufgelistet werden können. Anhand der neuen Konzeption sollen neue Kenngrößen und Stellhebel gefunden werden, um die Realität besser darstellen zu können. Es soll ein Werkzeug entwickelt werden, das den Projektverantwortlichen die Möglichkeit bietet, seinen Projektverlauf zu verfolgen und sein Projekt aktiv zu kontrollieren.

### **4.3 Grundlagen des neuen Modells**

Die wichtigsten Grundlagen der neuen Konzeption werden folgendermaßen definiert.

#### **Projekt**

Ein Projekt ist eine Prozesslandschaft, d.h. ein vollständiger Verbund aus Einzelprozessen mit Abhängigkeitsbeziehungen. Ein Projekt hat genau einen Start- und einen Endzeitpunkt. Alle Einzelprozesse laufen im Rahmen dieser definierten Zeitspanne ab.

#### **Prozess**

Ein Prozess ist elementarer Bestandteil eines Projektes. In dem Modell wird ein Prozess als eine Black Box (Eingang, Funktion, Ausgang) dargestellt. Damit wird die systemtechnische Modellierung eines Projektplanes aufgebaut. Die Funktion der Black Box stellt die Dynamik des Prozesses dar.

#### **Prozesskategorie**

Ein Projekt beinhaltet beliebig viele Kategorien von Vorgängen (z.B. Montage, Logistik). Jeder in einem Projekt befindliche Prozess muss genau einer vorhandenen Kategorie zugeordnet werden. Damit wird eine Gruppierung ähnlicher Vorgänge erreicht.

#### **Ergebnis**

Ein Prozess erzeugt ein Arbeitsergebnis gemessen an seinen definierten Zielen. Das vom Prozess produzierte Ergebnis ist die Ausgangsgröße einer Black Box. Dieses Ergebnis wird an alle Nachfolgeprozesse weitergegeben und dient dort wiederum als Eingangswert. Die Eingangsgröße der Black Box stellt somit auch ein Ergebnis dar und wird ermittelt aus den Ergebniswerten und den Einflüssen der Vorgängerprozesse auf den eigenen Prozess. Die Funktion in der Black Box verschlechtert bzw. verbessert das Ergebnis. Ein optimales Ergebnis wird erreicht, wenn die Abarbeitung der Prozessvorgaben fehlerfrei und vollständig erfolgt und wenn es keine negative Ergebnisbeeinflussung durch die Vorgänger gibt. Ein schlechteres Ergebnis kommt dann zustande, wenn ein Prozess fehlerhaft oder nicht vollständig abläuft,

oder wenn er eine negative Vorgabe durch die Vorgängerprozesse erhält, die nicht abgepuffert werden kann.

### **Kanten**

Die Verbindung zwischen zwei Prozessen wird als Kante bezeichnet. Kanten stehen nicht nur für die Abfolge von Vorgängen, sie stellen darüber hinaus ein Übertragungsmedium von Flussgrößen wie z.B. Arbeitsergebnis oder Zeitverschiebung dar.

### **Ungewissheit der Erfüllung der Ergebnisse**

Die Ungewissheit der Ergebniserfüllung der Prozesse wird durch die Größen Risiko und Chance dargestellt. Somit wird die Eigendynamik der Prozesse abgebildet. Risiko und Chance sind Funktionen innerhalb der Black Box.

### **Risiko**

Risiko spiegelt die eigendynamischen Abweichungen eines Prozesses vom optimalen Arbeitsergebnis wider. Diese Abweichungen werden im Prozess selbst unabhängig von den Vorgängern erzeugt und als prozesseigene Risiken betrachtet. Dies stellt ein Gefährdungspotenzial für eine negative Abweichung vom optimalen Ergebnis eines Prozesses dar. Die positive Seite des Risikos wird als Chance definiert und erhält eine unabhängige Betrachtung.

Risiko ist das Ausmaß der Ergebnisabweichung multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit, dass das gewollte Arbeitsergebnis im Prozess nicht erreicht wird. Diese Abweichungen sind prozessspezifisch und wirken sich negativ auf das Ergebnis aus.

### **Chance**

In der Realität kommt es vor, dass Prozesse kleine Abweichungen ohne Kostenmehraufwand aufholen können. Diesen Prozessen kann ein Potenzial zugeschrieben werden, um Abweichungen abpuffern zu können. Die Abweichungen stammen von einer Verspätung des Vorgängers oder von eigenverursachtem Risiko. Damit wird als Chance die Möglichkeit bezeichnet, dass Prozesse später anfangen und trotzdem ohne Kostenaufwand pünktlich fertig werden oder kleine Abwei-

chungen im eigenen Prozess mit den vorhandenen Ressourcen abwenden können. Die Chance ist prozessspezifisch und wirkt sich positiv auf das Ergebnis aus.

Diese Potenziale sind Sicherheitsreserven in Prozessen (vgl. Abschnitt 2.4). Dieser Puffer soll gewährleisten, dass die Arbeitsvorgänge bei auftretenden Problemen in Vorgängerprozessen oder im eigenen Prozess mit einem möglichst guten Ergebnis in der angegebenen Zeit abgeschlossen werden können. In einem Beispiel soll dies verdeutlicht werden (vgl. Abbildung 4-1).

Ein Vorgang besitzt eine mittlere Bearbeitungszeit von fünf Monaten und eine maximale von 7 Monaten. Der Prozessverantwortlicher würde eine Bearbeitungszeit von sechs Monaten angeben, um einen Sicherheitspuffer von einem Monat einzuplanen. Was passiert in der Realität, wenn sich der Vorgängerprozess um einen halben Monat verspätet?

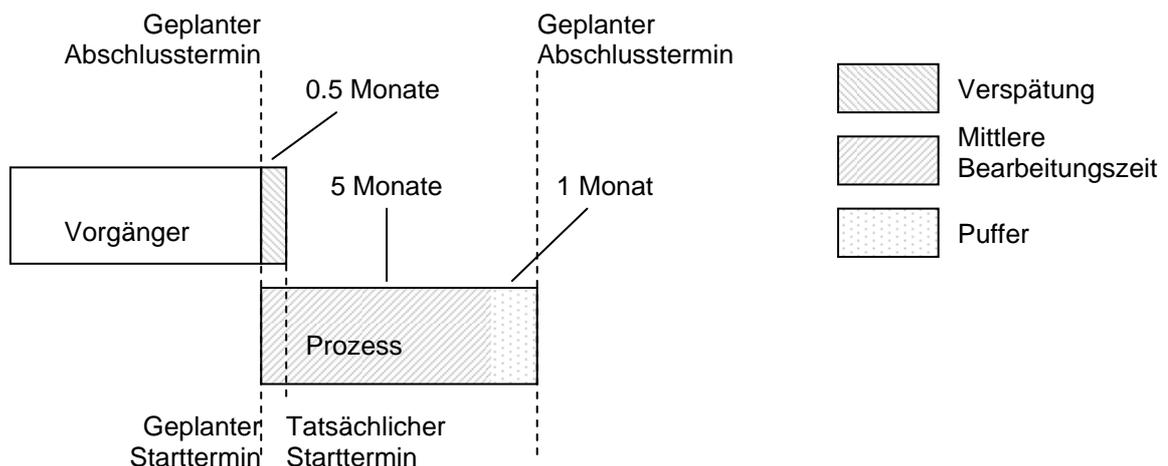


Abbildung 4-1: Darstellung von Prozessabläufen unter Berücksichtigung der Sicherheitsreserven

Der Prozess startet einen halben Monat später. Die Bearbeitungszeit verkürzt sich von sechs auf fünf und ein halbes Monate. Damit schrumpfen seine Sicherheitsreserven auf einen halben Monat. Mit höchster Wahrscheinlichkeit kann der geplante Abschlusstermin dennoch ohne Mehrkosten eingehalten werden. Der restliche Zeitpuffer von einem halben Monat kann für weitere interne Abweichungen genutzt werden.

Da das Eintreten einer Abweichung und die Möglichkeit, diese ohne Mehraufwand abzupuffern keine exakt ermittelbaren Größen sind, wird die Chance als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Ausmaß definiert.

### **Ressourcen**

Ressourcen sind eine Eigenschaft einer Black Box. Sie beinhalten den Grundaufwand zur Erreichung des geplanten Ergebnisses. Ressourcen können Mitarbeiter, Kosten oder Maschinen sein.

### **Zeit**

Zeit ist eine Ein- und Ausgangsgröße der Black Box und bezeichnet den Start- und Abschlusszeitpunkt eines Prozesses. In der Modellierung wird zwischen Plan- und tatsächlichen Zeitpunkten unterschieden.

### **Verbesserungspotenzial**

Verbesserungspotenzial ist eine Funktion innerhalb der Black Box. Es bietet Möglichkeiten, mittels Kostenaufwand Ergebnisse zu verbessern. Wird das optimale Prozessergebnis nicht erreicht, so kann Verbesserungspotenzial eingesetzt werden. Dies kann durch Zugabe von Ressourcen oder einer Bearbeitungszeitverlängerung erfolgen.

Die Vergrößerung von Ressourcen ist durch den Umfang der möglichen Zusatzressourcen und durch die Elastizität der Prozesslaufzeit begrenzt.[45] Zusatzressourcen werden bei Prozessdefinition durch den Verantwortlichen angegeben und bezeichnen Ressourcen, die zusätzlich zum Grundaufwand eingesetzt werden können. Dabei muss der Prozessverantwortliche entscheiden, ob durch Zusatzressourcen Prozessabweichungen abgepuffert werden können. Bei Abweichungen wie z.B. Verzögerung vom Vorgänger oder schlechtes Arbeitsergebnis, kann somit im Rahmen der Flexibilität durch Hinzufügen von zusätzlichen Ressourcen das Ergebnis verbessert oder die Verspätung aufgeholt werden.

Die zweite Möglichkeit zur Ergebnisverbesserung ist die Verlängerung der Bearbeitungszeit. Dies stellt ebenfalls einen erhöhten Kostenaufwand dar. Besitzt der Prozess zum zeitlich nächstliegenden Nachfolgeprozess einen Zeitpuffer, wirkt sich diese Zugabe so lange nicht negativ auf den Folgeprozess aus, bis der Zeitpuffer verbraucht ist. Ist kein Zeitpuffer vorhanden, verschiebt sich der Starttermin des Folgeprozesses. Das hat zur Folge, dass dieser Prozess weniger eigene Bearbeitungszeit erhält und somit entweder ein schlechtes Arbeitsergebnis erzeugt oder den eigenen Abschlusszeitpunkt nach hinten setzen muss.

Um die Definition der Grundelemente für ein neues Modell zu komplettieren, wird die Vorgehensweise zur Ermittlung von Risiko und Chance beschrieben.

#### 4.4 Ermitteln von Risiko und Chance in einem Prozess

##### Risiko

Zur Ermittlung des Risikos wird eine Fragetechnik eingeführt. Mit vordefinierten Fragen werden Prozessverantwortliche nach ihren Erfahrungen abgefragt, wie kritisch sie ihren eigenen Prozess sehen. In Tabelle 4-1 sind die möglichen Fragen dargestellt, die projektspezifisch angepasst werden können.

Ausmaß	Wahrscheinlichkeit
Wie wahrscheinlich erscheint es, dass Ihr Prozess <span style="background-color: #cccccc;">        </span> Abweichungen vom optimalen Ergebnis erzeugt? (ohne negative Einflüsse durch die Vorgänger)	
Frage 1: <span style="background-color: #cccccc;">keine</span> Abweichungen	Mögliche Antworten pro Frage: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unmöglich</li> <li>• Unwahrscheinlich</li> <li>• Wenig wahrscheinlich</li> <li>• Wahrscheinlich</li> <li>• Sehr wahrscheinlich</li> </ul>
Frage 2: <span style="background-color: #cccccc;">minimale</span> Abweichungen	
Frage 3: <span style="background-color: #cccccc;">mittelstarke</span> Abweichungen	
Frage 4: <span style="background-color: #cccccc;">starke</span> Abweichungen	
Frage 5: <span style="background-color: #cccccc;">katastrophale</span> Abweichungen <sup>5</sup>	

Tabelle 4-1: Frage-Antwort-Katalog zur Bestimmung der Risikowahrscheinlichkeit (Beispiel)

Zur Veranschaulichung werden zwei Fälle betrachtet:

a. Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten fallen eher gering aus.

In diesem Fall ist der Prozessverantwortliche der Meinung, dass sein Prozess sehr stabil und überschaubar ist und geringe eigene Abweichungen vom Soll erzeugt. Daraus folgt, dass das Risiko im Prozess eher klein ist.

b. Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten fallen eher hoch aus.

In diesem Fall ist die Ungewissheit groß, dass ein Prozess seinen Arbeitsumfang nicht 100% an den nächsten abgeben kann. Die Erfahrungswerte sagen, dass der Prozess hohe eigene Abweichungen vom Soll erzeugen kann. Daraus folgt, dass das Risiko im Prozess eher groß ist.

<sup>5</sup> Dabei wird im Fallbeispiel eine katastrophale Abweichung als 50% vom optimalen Ergebnis festgesetzt.

Aus den Antworten wird eine Punktwolke ermittelt, aus der daraufhin eine Verteilungsfunktion konstruiert werden kann. Mittels einer Frage wird die Wahrscheinlichkeit ermittelt, mit der keinerlei negative Abweichungen eintreten. Die Antwort auf diese Frage wird als Startpunkt der Verteilungsfunktion bei Ausmaß 0% verwendet. Die anderen Fragen dienen zur Konstruktion des weiteren Verlaufes der Verteilungsfunktion. Die genaue Überführung in eine abschnittsweise definierte Verteilungsfunktion wird im Kapitel 4.5.2 beschrieben.

### Chance

Da die Größe der Chance in einem Prozess nicht direkt in Erfahrung gebracht werden kann, wurden Möglichkeiten gesucht, durch Fragetechniken diesen Sicherheitspuffer zu ermitteln.

Die Fragen wurden vorab anhand einer umfangreichen Checkliste geprüft. Folgende Beispiele zeigen den Aufbau dieser Checkliste: „Ist die Frage klar formuliert und eindeutig verständlich?“ oder „Kann die Frage durch die Zielgruppe beantwortet werden?“ Anschließend durchgeführte Pre-Tests dienten der Evaluierung des Fragebogens durch Expertenwissen. Die aus den Pre-Tests gewonnenen Erkenntnisse tragen dazu bei, Fehler sowie Verständlichkeitsprobleme zu entdecken, diese zu beheben und anschließend die richtigen Fragen auszuwählen.<sup>6</sup> Mögliche Fragen zur Ermittlung der Chance sind in Tabelle 4-2 dargestellt.

Ausmaß	Wahrscheinlichkeit
Wie wahrscheinlich erscheint es, dass Ihr Prozess <span style="background-color: #cccccc;">        </span> Abweichungen vom optimalen Ergebnis <u>ohne Kostenmehraufwand</u> aufholen zu können?	
Frage 1: <span style="background-color: #cccccc;">keine</span> Abweichungen	Mögliche Antworten pro Frage: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unmöglich</li> <li>• Unwahrscheinlich</li> <li>• Wenig wahrscheinlich</li> <li>• Wahrscheinlich</li> <li>• Sehr wahrscheinlich</li> </ul>
Frage 2: <span style="background-color: #cccccc;">minimale</span> Abweichungen	
Frage 3: <span style="background-color: #cccccc;">mittelstarke</span> Abweichungen	
Frage 4: <span style="background-color: #cccccc;">starke</span> Abweichungen	
Frage 5: <span style="background-color: #cccccc;">katastrophale</span> Abweichungen	

Tabelle 4-2: Frage-Antwort-Katalog zur Bestimmung der Chancenwahrscheinlichkeit (Beispiel)

<sup>6</sup> Bei der Erstellung der Fragen und Durchführung der Pre-Test wurden Ideen aus [3,57] übernommen. Die Fragen für Risiko wurden mit der gleichen Vorgehensweise durchgeführt.

Zur Veranschaulichung werden zwei Fälle betrachtet.

a. Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten fallen eher gering aus.

In diesem Fall ist der Prozessverantwortliche der Meinung, dass bereits kleine Abweichungen im Prozess nicht mehr ohne Kostenmehraufwand ausgeglichen werden können. Seine Angabe über die Bearbeitungszeit bewegt sich folglich nahe an der mittleren Bearbeitungszeit. Daraus folgt, dass die Sicherheitsreserven eher klein sind.

b. Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten fallen eher hoch aus.

In diesem Fall ist der Prozessverantwortliche der Meinung, dass auch mittlere bis große Abweichungen im Prozess noch ohne Kostenmehraufwand ausgeglichen werden können. Seine Angabe über die Bearbeitungszeit bewegt sich folglich nahe an der maximalen Bearbeitungszeit. Daraus folgt, dass der Sicherheitspuffer eher groß ist.

Auch hier wird aus den Fragen eine Punktwolke ermittelt und daraus eine Verteilungsfunktion konstruiert. Eine genaue Beschreibung dieser Berechnung ist im Kapitel 4.5.3 zu finden. Nach der Definition der Grundelemente für ein neues Modell wird die Funktionsweise des Modellierungskonzeptes im Detail beschrieben.

## 4.5 Modellierung von Prozessen als Black Box

Die Black Box Methode wurde auf ihre Anwendbarkeit für komplexe Projektabläufe untersucht (vgl. Abschnitt 3.4.3). Die Eigenschaft, dynamische Vorgänge abbilden zu können, bietet eine ideale Modellierungsgrundlage für große Industrieprojekte. Um den Anforderungen an ein Modell zur Risikoverfolgung in komplexen Projekten gerecht zu werden, wird die Black Box um mehrere interne Funktionen erweitert [47]. Diese Funktionen beeinflussen das Ergebnis und die Laufzeit eines Prozesses. Sie werden im Folgenden als „Logiken“ bezeichnet. Jede Black Box enthält folgende Logiken:

- Eingangslogik *EL*: Beschreibt die Ergebnisabhängigkeiten des Prozesses zu seinen Vorgängerergebnissen.
- Risikologik *RL*: Modelliert das Prozessrisiko und somit die eigendynamischen negativen Abweichungen des Prozesses vom Soll-Ergebnis.

- Chancenlogik *CL*: Modelliert die Prozesschance und nutzt die vorhandenen Sicherheitsreserven zur Ergebnisverbesserung bzw. Zeitverkürzung.
- Verbesserungslogik *VL*: Berücksichtigt Verbesserungspotenzial zur Beeinflussung des Prozessergebnisses und der Bearbeitungszeit.

Die prozessspezifischen Informationen zur Beschreibung der Einzellogiken (z.B. produziertes Ergebnis, Startzeitpunkt, Abschlusszeitpunkt, benötigte Ressourcen) werden von Prozessverantwortlichen definiert und in einem Eingabedatensatz hinterlegt. Die Logiken werden in einer Black Box wie folgt dargestellt.

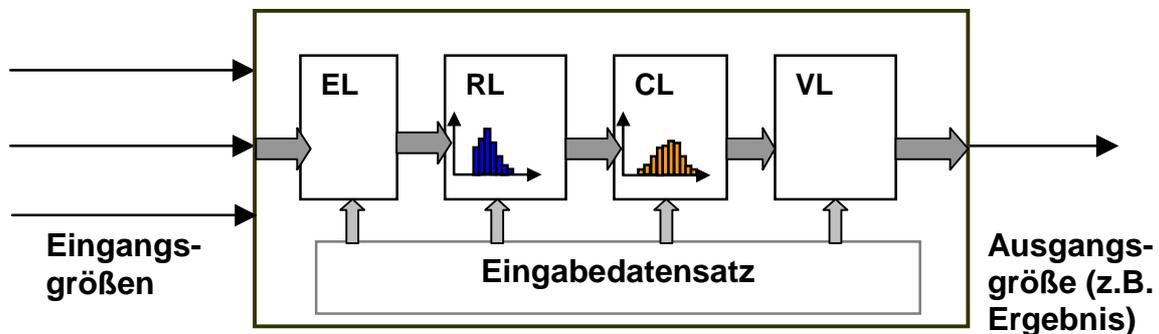


Abbildung 4-2: Schematischer Aufbau einer neuen Black Box mit mehreren Logiken

In der Eingangslogik *EL* werden alle Ergebnisse der Vorgänger zu einem Ergebnis zusammengefasst. Dieses Ergebnis stellt den Einfluss des Prozesses zu seinen Vorgängern dar. Weiterhin übernimmt die *EL* die maximale Verspätung seines Vorgängers. In der Risikologik *RL* wird anhand der Verteilungsfunktion das eigene Risiko, das Ergebnis zu verfehlen, ermittelt. Durch die *RL* wird das zu erreichende Ergebnis verschlechtert. Die *RL* hat keinen Einfluss auf die Prozesszeit. Das Ergebnis wird durch die Chancenlogik *CL* verbessert. In dieser wird die Wahrscheinlichkeit ermittelt, um wie viel das Ergebnis ohne Zusatzaufwand verbessert werden kann. In der Verbesserungslogik *VL* kann durch Nutzung des Verbesserungspotenzials nochmals positiv auf das Ergebnis gewirkt werden. Die *CL* und die *VL* haben dazu noch die Möglichkeit, eine Verspätung durch einen Vorgänger aufzuholen. Durch dieses Verhalten der Black Box kann die Dynamik von Prozessen dargestellt werden.

In Abbildung 4-3 ist ein mögliches Ergebnis dieses Zusammenspiels der Logiken abgebildet.

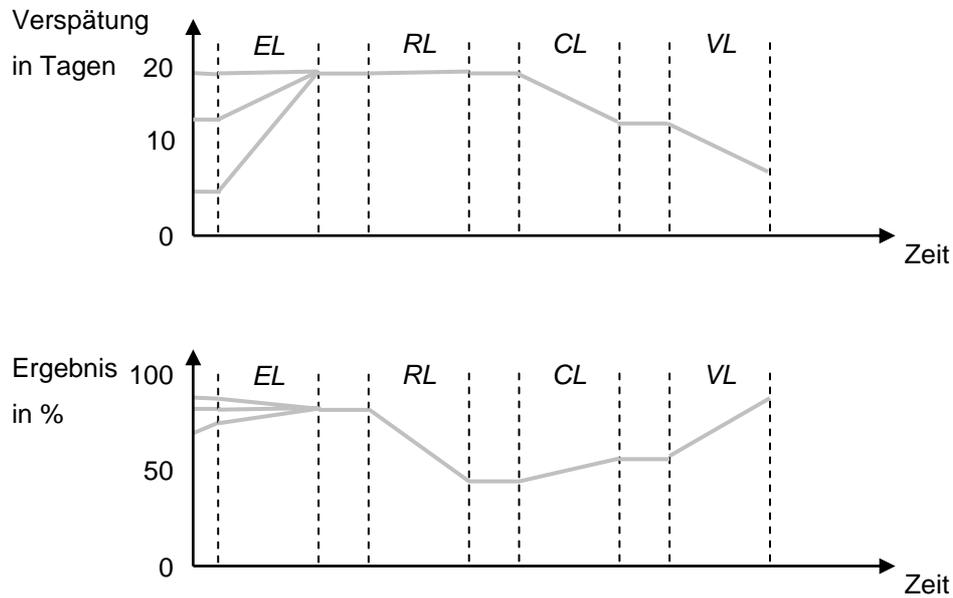


Abbildung 4-3: Beispiel für das Zusammenspiel der Logiken

Wird die Ergebnisbeeinflussung über mehrere Prozesse hinweg betrachtet, kann ein Ergebnisverlauf wie folgt dargestellt werden:

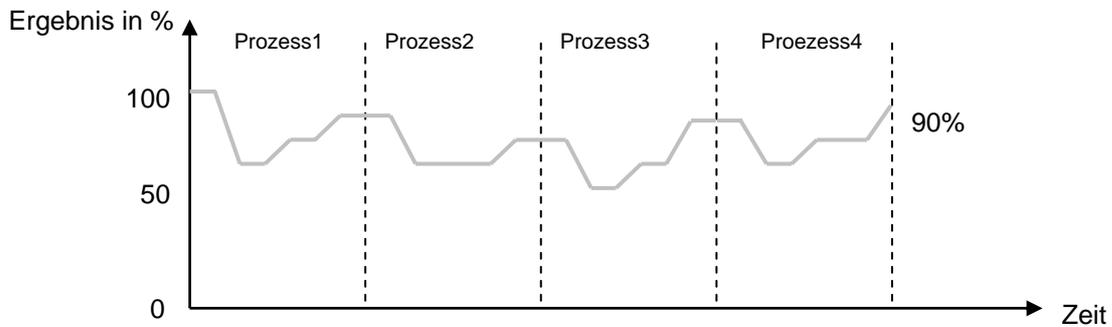


Abbildung 4-4: Verfolgung der Ergebnisse über mehrere Prozesse (Beispiel)

Es wird verdeutlicht, dass ein Ergebnis in jedem Prozess mehrmals beeinflusst wird. Bei Projektabschluss wird ein Ergebnis erreicht, dass von vielen Vorgängern geprägt wurde. Im Folgenden wird diese Funktionsweise der einzelnen Logiken näher betrachtet.

### 4.5.1 Eingangslogik

Wie bereits beschrieben wird das Arbeitsergebnis eines Prozesses von anderen Prozessen beeinflusst, falls er deren Arbeitsergebnis als Vorgabe verwendet. Es besteht für jede Verbindung eine mehr oder minder starke Abhängigkeit. Die Eingangslogik bildet diese Abhängigkeit ab. Die in den Abschnitten 3.5.1 und 3.5.2 betrachteten Logiken (Fuzzy Logik, kausale Abhängigkeit) werden als mögliche Ausprägungen der Eingangslogik verwendet.

### Funktionslogik

Ist die Abhängigkeit zu den Vorgängerprozessen bekannt, so kann das Ergebnis in der Eingangslogik durch Abhängigkeitsfunktionen direkt angegeben werden.

Eine große Flexibilität ergibt sich aus der Möglichkeit, abschnittsweise definierte Funktionen zu verwenden. Diese Funktionen sind stetig und können über beliebig viele Teilintervalle definiert werden. Jede Funktion ist über die Intervalle  $0 < x, y < 1$  vollständig beschreibbar. Abbildung 4-5 zeigt eine mögliche Abhängigkeitsfunktion  $f(x)$ .

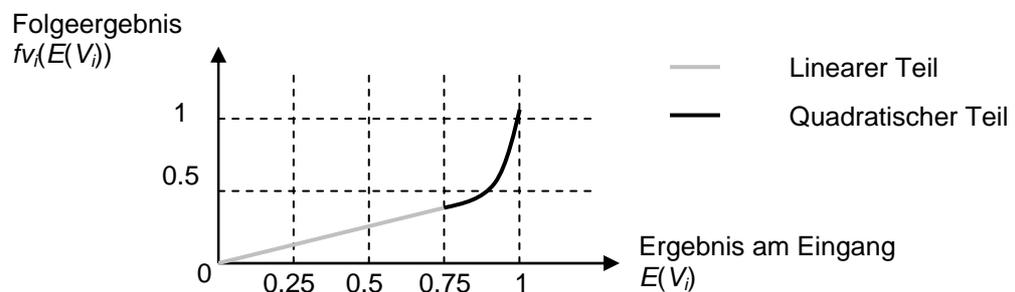


Abbildung 4-5: Kausale Funktionsabhängigkeit von Ergebnissen

Bei der Berechnung des Ergebnisses anhand der Eingänge werden die Werte am Eingang über die Übertragungsfunktionen umgerechnet. Bei mehreren Eingängen wird anschließend der gewichtete Mittelwert der Funktionsergebnisse ermittelt.

Dabei wird für jeden Vorgänger  $V_i$  ein Gewicht  $g(V_i)$  und eine Abhängigkeitsfunktion  $f(x)$  angegeben. Vor der Berechnung des zusammengesetzten Ergebnisses aus allen Vorgängerergebnissen  $E(V_i)$  müssen die Gewichte normiert werden.

$$G(V_i) = \frac{g(V_i)}{\sum_{z=0}^n g(V_z)}$$

Wobei  $g(V_i) = [1,2,3,\dots]$ ;  $n = \text{Anzahl Vorgänger}$  und  $\sum_i G(V_i) = 1$

Das zusammengefasste Ergebnis  $E$  aller Vorgängerergebnisse berechnet sich aus dem Produkt der jeweiligen genormten Gewichtungen  $G(V_i)$  und dem Ergebnis der Abhängigkeitsfunktion  $f_{V_i}(E(V_i))$ .

$$E = \sum_i G(V_i) * f_{V_i}(E(V_i))$$

Nach der Funktionslogik steht nun genau ein Wert für die weitere Verarbeitung in der Funktion der Black Box zur Verfügung.

### **Fuzzy Logik**

Ist die Abhängigkeit zu den Vorgängerprozessen nicht kausal bekannt, kann diese in der Eingangslogik durch Fuzzy Variablen bewertet und so das Folgeergebnis ermittelt werden. Die genaue Vorgehensweise wird im Folgenden beschrieben.

Jeder Prozess bewertet den Einfluss des Vorgängers auf das eigene Ergebnis. Dafür wird für jede Eingangsgröße ein Fuzzy Set definiert. Der Ergebnisbereich des jeweiligen Vorgängers bestimmt die Intervallbreite des Fuzzy Sets. Über dieses Intervall werden mehrere Fuzzy Variablen verteilt. Je näher eine Variable am optimalen Punkt des Ergebnisintervalls liegt, desto positiver ist die Auswirkung für den aktuellen Prozess. Die Entscheidung in welchen Ergebnisteilbereichen des Vorgängerprozesses der eigene Prozess positiv bzw. negativ beeinflusst wird trifft der jeweilige Prozessverantwortliche. Um diesen Einfluss zu beschreiben hat er mindestens zwei und höchstens acht Fuzzy Variablen zur Verfügung. Die Variablendefinition wird grundsätzlich so ermöglicht, dass sowohl dreieckige als auch trapezförmige Variablen definiert werden können.

Abbildung 4-6 zeigt den schematischen Ablauf bei der Definition.

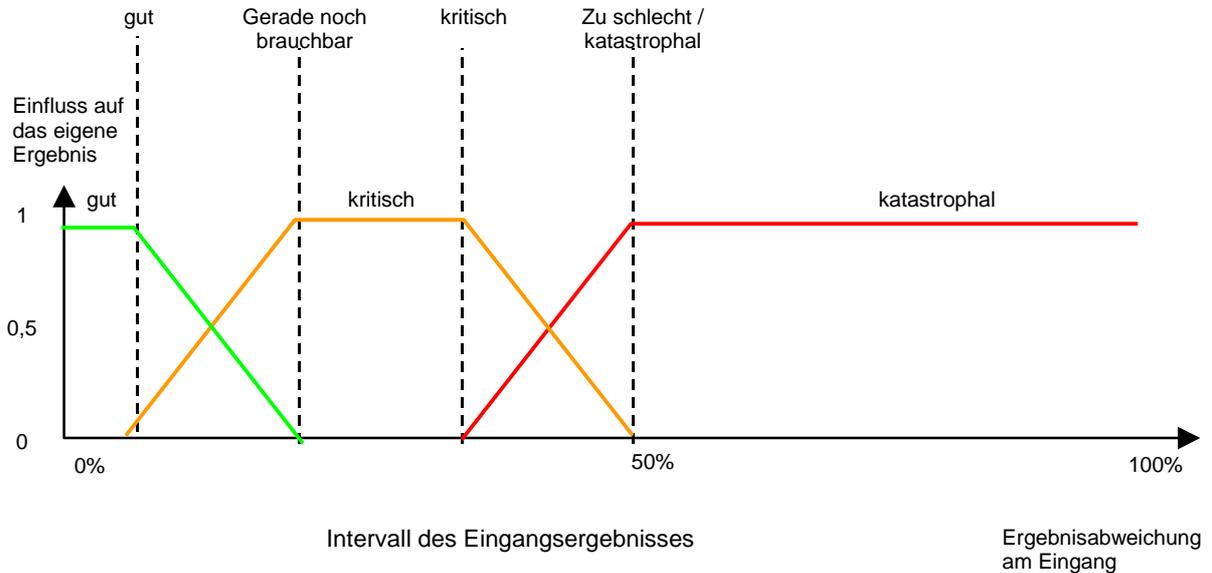


Abbildung 4-6: Fuzzy Logik als mögliche Eingangslogik

Anschließend wird das Ergebnis des zu definierenden Prozesses mit Fuzzy Set bewertet. Dabei werden mit Fuzzy Variablen Ergebnisbereiche definiert, indem die Ergebnisbreite aufgeteilt wird in linguistischen Größen wie z.B. katastrophales Ergebnis, kritisches Ergebnis oder gutes Ergebnis.

Das Ergebnis eines Prozesses wird so auf mehrere Arten mittels Fuzzy Variablen bewertet. Der Verantwortliche eines Prozesses beurteilt seine Ergebnisse nach eigenen Kriterien von optimal bis schlecht. Wird dieses Ergebnis von mehreren Nachfolgern verwendet, wird es von den Nachfolgern für ihren Prozess erneut bewertet. Hierbei definiert jeder Nachfolgeprozess den Einfluss des Ergebnisses auf das eigene Prozessziel. Aufgrund der Tatsache, dass die Anforderungen an ein Vorgängerergebnis prozessspezifisch unterschiedlich sind, entstehen dabei verschiedene Bewertungen.

In Abschnitt 3.5.1 wurden zwei Nachteile der Fuzzy Logik erkannt. Die Regelbasis steigt mit der Anzahl der verwendeten Eingänge und Variablen exponential an. Die bekannten Defuzzifizierungsmethoden decken nicht das gesamte Ergebnisintervall ab. Im Folgenden werden zwei Lösungen vorgestellt, die diese Nachteile der Fuzzy Logik nicht besitzen.

### **Automatische Generierung der Regelbasis**

Für die Verwendung der Fuzzy Logik in dieser Arbeit wurde die Definition der Regelbasis überarbeitet und die automatische Generierung der Regelbasis entwickelt. Eine Voraussetzung dafür ist die Berücksichtigung des Einflusses der Vorgänger auf den eigenen Prozess bei der Definition der Fuzzy Sets. Es muss bekannt sein, in welcher Reihenfolge die einzelnen Variablen, eine vom negativen zum positiven wachsende Auswirkung auf den Ausgang haben. Ebenso muss bekannt sein, welche Ergebnisse am Ausgang aufsteigend von schlecht bis gut bewertet sind. Somit ist der prozessspezifische Einfluss der Vorgänger bereits in den Fuzzy Sets bewertet und muss daher nicht noch einmal in der Regelbasis speziell unterschieden werden.

Nun können die Variablen sowohl am Eingang als auch am Ausgang durchnummeriert werden. Beginnend bei 0 werden die Variablen aufsteigend in Richtung optimales Ergebnis nummeriert: 0,1,2,... n. Anschließend kann eine Matrix mit allen möglichen Und-Regeln erzeugt werden.

Hierbei muss eine Normierung der Variablennummerierungen erfolgen. Dies ist nötig, um Eingänge nicht anhand der Variablenzahl ungewollt zu gewichten. Anschließend werden die Zeilensummen der Nummerierungen bestimmt und der Prozentsatz je Eingangsvariablenkombination bezogen auf die Maximalsumme ermittelt.

Weiterhin wird die Anzahl der Ausgangszustände nach Erfüllungsgrad unterteilt. Dadurch wird ein Intervall von 0% bis 100% in Abhängigkeit der Anzahl der Ausgangvariablen in Teilintervalle aufgeteilt. Nun werden die Kombinationen der Eingangsvariablen einer Ausgangsvariable zugeordnet. Dabei werden die Regeln mit den Eingangsvariablen anhand der berechneten Prozentzahl mit den Intervallbereichen der Ausgangsvariablen verglichen und der jeweiligen Ausgangsvariable zugewiesen.

Mit dieser neuen Vorgehensweise können Regelbasen beliebiger Größe vollkommen automatisch definiert werden. Diese Erweiterung erspart den Prozessverantwortlichen sehr viel Arbeit und beschränkt sie in der Modellierung nicht durch Begrenzungen der Vorgängeranzahl oder der Fuzzy Variablen. In der Umsetzung wird darüber hinaus nach der automatischen Generierung der Regelbasis noch die Möglichkeit angeboten, einige Regeln bei Bedarf durch den Prozessverantwortlichen zu ändern.

Abbildung 4-7 zeigt ein Ergebnis einer automatisch generierten Regelbasis und die Möglichkeit der prozessspezifischen Anpassung.

Eingang Prozess3	Eingang Prozess5	Eingang Prozess4	Ausgang Prozess6
0	0	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
1	1	0	0
0	2	0	0
1	2	0	1
0	0	1	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	1	1
0	2	1	1
1	2	1	2

Änderungen speichern

Abbildung 4-7: Beispiel einer automatisch generierten Regelbasis

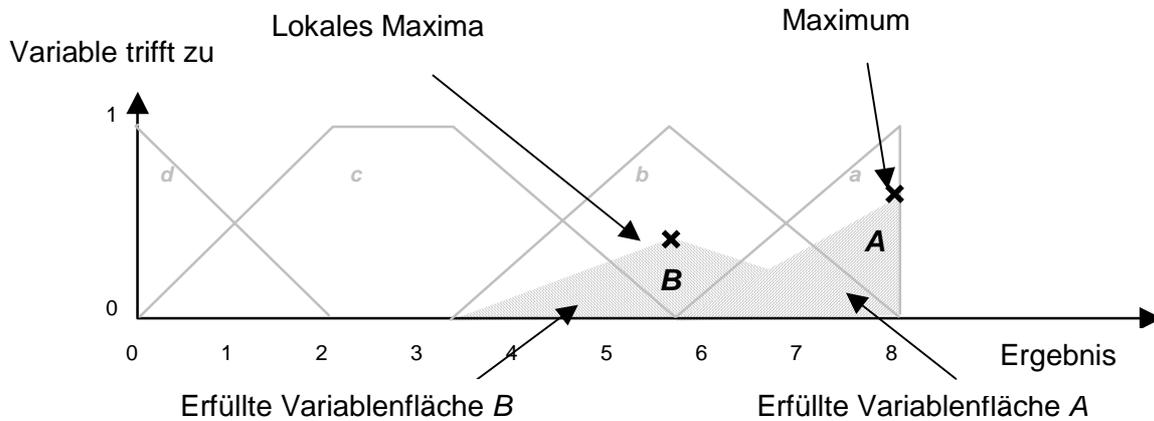
### Anpassung der Defuzzifizierungsmethode

Die Methoden der Defuzzifizierung (Schwerpunktmethode, Maximummethode) beschränken die Möglichkeiten, das gesamte Ergebnisintervall zu erreichen. Durch Anpassen der Defuzzifizierungsmethoden sollen diese Nachteile behoben werden.

Die Maximummethode ermöglicht unter einer Voraussetzung das Erreichen der Intervallgrenzen, wenn die Variablen an den Grenzen nur dreiecksförmig definiert werden. Jedoch werden in diesem Fall die lokalen Maximas, wie in Abbildung 4-8 zu sehen ist, in der Bewertung nicht betrachtet. Durch Kombination der Schwerpunkts- und der Maximummethode ist eine Lösung dafür gefunden worden. Dabei werden durch Gewichtung der erfüllten Variablenfläche die lokalen Maximas wieder im Endergebnis berücksichtigt. Das gesamte Ergebnisintervall kann dadurch erreicht werden. Zur Ermittlung der Variablenfläche wird die Max-Prod-Inferenz, wie in Abschnitt 3.5.1 beschrieben, verwendet.

Diese neue Vorgehensweise zur Defuzzifizierung wird anhand eines einfachen Beispiels in Abbildung 4-8 deutlich. Dabei werden für die Berechnung eines Ergebnisses zunächst die Flächen der Ergebnisfuzzyvariablen ermittelt. Anschließend erfolgt die Ermittlung der lokalen Maxima, einzeln für jede vorhandene Fuzzy Variable. Die Ergebniswerte, die anhand der lokalen Maxima ermittelt wurden,

werden anschließend mit der zugrunde liegenden Fläche gewichtet. Der somit errechenbare Mittelwert wird als Ergebnis weiterverarbeitet.



**Beispiel Ergebnisberechnung Defuzzifizierung**

Fläche Variable  $b$  ( $B$ ) = 1.5 ; Fläche Variable  $a$  ( $A$ ) = 1.0;  
 Position Maximum  $A$  ( $PMA$ ) = 8.0;  
 Position Maximum  $B$  ( $PMB$ ) = 5.7  
 Ergebniswert  $E$  =  $( A * PMA + B * PMB ) / ( A + B )$   
 =  $( 8.0 * 1.0 + 5.7 * 1.5 ) / ( 1.0 + 1.5 )$   
 = **6.62**

Abbildung 4-8: Fusion von Maximummethode und Schwerpunktmethode

Damit auch garantiert werden kann, dass das komplette Intervall erreicht wird, werden die Randvariablen nur in Dreiecksform definiert. Mit dieser Erweiterung der Defuzzifizierungsmethoden können die in Abschnitt 3.5.1 genannten Nachteile behoben und gleichzeitig die Vorteile der Schwerpunktmethode und der Maximummethode gleichermaßen genutzt werden.

Die Elemente der Eingangslogik sind nun vollständig definiert. Nach der Eingangslogik werden alle Ergebnisse der Vorgänger entweder durch eine Funktions- oder die Fuzzy Logik auf einen Ergebniswert  $E$  des aktuellen Prozesses umgerechnet. Dieses Ergebnis wird anschließend der Risikologik übergeben.

**4.5.2 Risikologik**

Die Risikologik bestimmt ein für den Prozess spezifisches Risiko. Dieses wird genutzt, um die eigendynamischen Abweichungen eines Prozesses vom Soll-Ergebnis zu modellieren. Die dazu benötigten Angaben Ausmaß  $A$  und Wahr-

scheinlichkeit  $p$  werden wie im Abschnitt 4.4 vom Benutzer angegeben. Diese angegebenen Wahrscheinlichkeiten können nicht in der Form verwendet werden, da sie in der Summe nicht eins ergeben. Folglich müssen diese Angaben zunächst normiert werden (vgl. Abbildung 4-9). Die Verteilungsfunktion steigt immer bei Ausmaß 0% (keine Abweichung) vom Wahrscheinlichkeitswert 0 senkrecht auf den durch die Fragen ermittelten Wahrscheinlichkeitswert bei 0%. Bei jedem Ausmaßwert liegen die folgenden Punkte um die in der Frage ermittelte normierte Wahrscheinlichkeitsdifferenz höher. Die Verteilungsfunktion wird durch Verbindung der Punkte fertig entworfen (vgl. Abbildung 4-9). Die genaue Verarbeitung des Ergebnisses in der Risikologik wird im Folgenden hergeleitet.

Die allgemeine Formel zur Berechnung des Risikos  $R_k$  pro Frage  $k$  lautet:

$R_k = p_k * A_k$ , wobei  $p_k$  =Wahrscheinlichkeit von Frage  $k$ , und  $A_k$ =Ausmaß von Frage  $k$ .

Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten  $p_k$  müssen normiert werden, da sie in Summe nicht 1 ergeben und so keine Verteilungsfunktion daraus ermittelt werden kann.

$$p_{normk} = \frac{p_k}{\sum_{z=0}^{n-1} p_z}$$

$n = \text{Gesamtanzahl der Fragen}$   
Die Summe aller  $p_{normk}$  ergibt 1

Die normierten Wahrscheinlichkeiten des Benutzers  $p_{normk}$  und die jeweiligen Ausmaßfragen  $A_k$  werden in eine abschnittsweise definierte Risiko-Verteilungsfunktion  $F_R(A)$  umgewandelt:

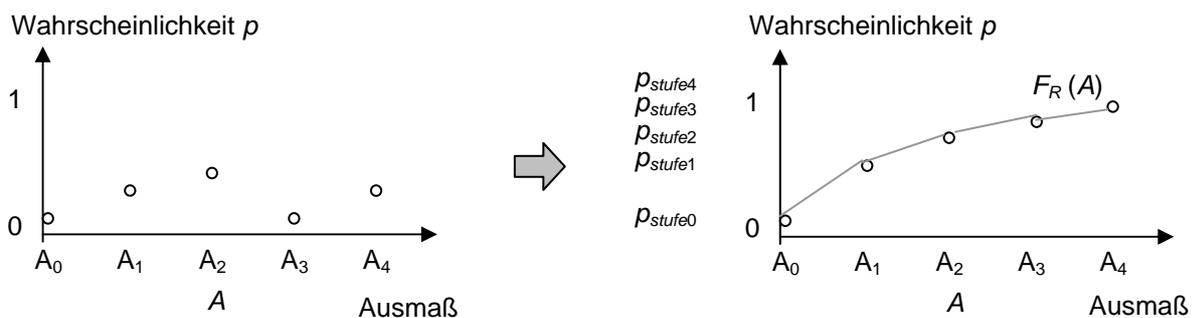


Abbildung 4-9: Darstellung der Ermittlung der normierten Verteilungsfunktion

Dabei setzen sich die Wahrscheinlichkeiten folgendermaßen zusammen:

$$p_{stufe0} = p_{norm0}$$

$$p_{stufe1} = p_{stufe0} + p_{norm1}$$

$$p_{stufe2} = p_{stufe1} + p_{norm2}$$

...

Die abschnittsweise definierte Verteilungsfunktion lässt sich wie folgt berechnen.

$$F_R(A) = \begin{cases} A_0 & , k=0 \\ \frac{p_{Stufe(k)} - p_{Stufe(k-1)}}{A_{Stufe(k)} - A_{Stufe(k-1)}} * (A - A_{Stufe(k)}) & , k=1..n-1 \end{cases}$$

Nun könnte ein Risiko anhand einer Stichprobe in einem Simulationslauf mit Hilfe eines gleichverteilten Zufallszahlengenerators  $U(0..1)$  und der inversen Transformation der Verteilungsfunktion  $F_R(A)$  ermittelt werden (vgl. Abbildung 4-10).

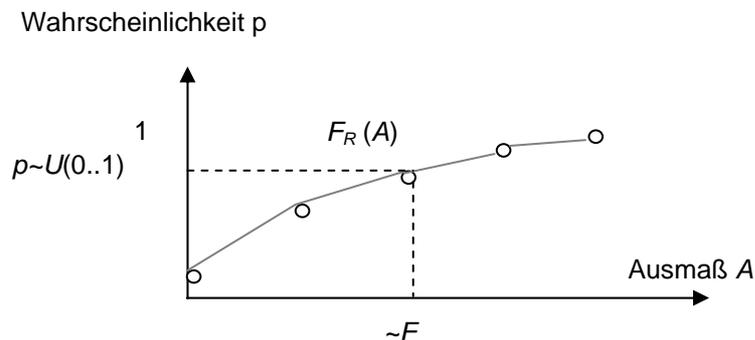


Abbildung 4-10: Ermittlung einer Stichprobe aus der Verteilungsfunktion

Die ermittelte Stichprobe für das Risiko des Prozesses setzt sich folglich zusammen aus:

$$A = F_R^{-1}(p) = \text{Risiko, wobei } 0 \leq \text{Risiko} \leq 0,5$$

Damit das Risiko mit dem Ergebnis verrechnet werden kann, muss es vorher in einen Ergebniswert umgewandelt werden. Dazu wird es mit der Ergebnisbreite  $E_b$  (=|optimales Ergebnis - minimal zulässiges Ergebnis|) des Prozesses multipliziert. Anschließend wird das umgerechnete Risiko vom ursprünglichen Ergebnis von der

Eingangslöge  $E_{alt}$  subtrahiert. Sollte das veränderte Ergebnis  $E_{neu}$  unter dem minimal zulässigen Ergebnis  $E_{min}$  liegen, so wird  $E_{neu}$  auf  $E_{min}$  gesetzt:

$$E_{neu} = \begin{cases} E_{alt} - Risiko * Ergebnisbreite, & , \text{ wenn } (E_{alt} - Risiko * Ergebnisbreite) > E_{min} \\ E_{min}, & , \text{ sonst} \end{cases}$$

Das neu berechnete Ergebnis  $E_{neu}$  wird anschließend der Chancenlogik übergeben.

### 4.5.3 Chancenlogik

Die Chancenlogik beschreibt eine für den Prozess spezifische Chance. Die dazu benötigten Angaben Ausmaß und Wahrscheinlichkeit werden wie im Abschnitt 4.4 vom Benutzer angegeben. Diese wird im gleichen Verfahren berechnet, wie in der Risikologik beschrieben. Die Chancenlogik hat zwei Möglichkeiten die Chance anzuwenden. Sie kann genutzt werden, um die durch Vorgängerprozesse verursachten Abweichungen abzufuffern und internen Risiken entgegenzuwirken. Die Chance wird zunächst dazu verwendet, um die Eingangsergebnisse der Vorgängerprozesse zu verbessern. Das kann erreicht werden, indem der Startzeitpunkt des aktuellen Prozesses um das Ausmaß der Chance verschoben und somit seine Laufzeit verkürzt wird (vgl. Abschnitt 4.3 → "Chance ist die Möglichkeit, später anzufangen und trotzdem ohne Zusatzaufwand pünktlich fertig zu werden"). Dadurch haben die Vorgängerprozesse die Möglichkeit ihren Endzeitpunkt nach hinten zu verschieben und damit ihre Laufzeit zu verlängern. Diese Laufzeitverlängerung der Vorgängerprozesse hat den gleichen Effekt wie das Anwenden von Verbesserungspotenzial (Zusatzzeit). Durch den vorhandenen Sicherheitspuffer des Nachfolgers kann der Vorgängerprozess länger arbeiten und sein Ergebnis verbessern. Der Nachfolger selbst hat damit bessere Ergebnisvorgaben und ein größeres Potenzial, sein eigenes Ergebnis zu erfüllen.

Wenn die Chance nicht komplett zur Laufzeitverkürzung aufgebraucht werden muss, entsteht eine Restchance. Diese Chance kann dazu genutzt werden, um interne Abweichungen, verursacht durch das Risiko, abzufuffern. Durch den Einsatz von Restchance wird das eigene Ergebnis verbessert.

Bevor diese beiden Möglichkeiten zur Chancenverwendung näher erläutert werden, muss das Bild der Black Box komplettiert werden: Die Logiken in der Black Box wurden bisher nacheinander abgearbeitet. Doch die Chancenlogik muss auf die Informationen der Eingangslogik zugreifen und dieser "neue Eingangswerte" zu spielen. Wenn in einem Simulationslauf eine Stichprobe für eine Chance ermittelt wird und zugleich die Vorgänger eine Abweichung von ihrem optimalen Ergebnis besitzen, wird die Berechnung in der Eingangslogik neu angestoßen und das in der Risikologik ermittelte Ausmaß auf das neue Ergebnis angewendet. Abbildung 4-11 zeigt diese Erweiterung der Black Box. Das ist wichtig, weil dadurch die Dynamik in Projekten besser dargestellt werden kann. Kleine Zeitverzögerungen können in der Realität ohne Kostenmehraufwand vom Nachfolger aufgeholt werden (vgl. Abschnitt 2.4). Durch die Nutzung der internen Sicherheitsreserven zur Laufzeitverkürzung kann dieses Verhalten abgebildet werden.

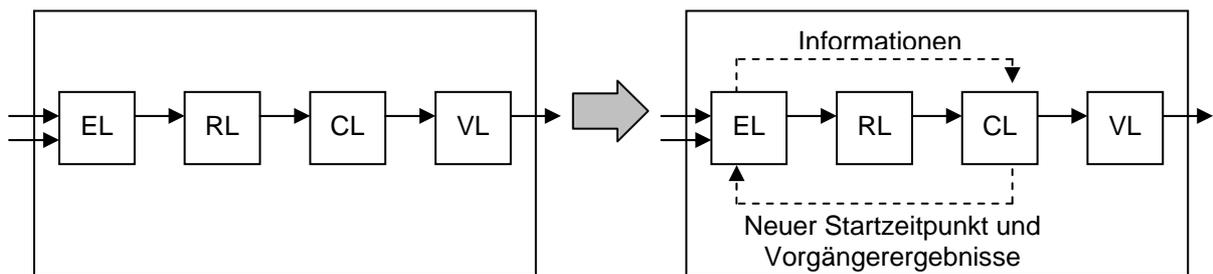


Abbildung 4-11: Erweiterung der Black Box

Die Berechnung der Chance entspricht der Vorgehensweise in der Risikologik und unterscheidet sich nur in der Verwendung entsprechender Frageergebnisse für die Chance. Daraus ergibt sich dann die Chance für den Prozess.

$A = F_C^{-1}(p) = \text{Chance}$ , wobei  $0 \leq \text{Chance} \leq 0,5$  und  $F_C^{-1}(p)$  die Inverse Transformation der Verteilungsfunktion der Chance.

Die beiden erwähnten Möglichkeiten, diese Chance zu verwenden, werden im Folgenden näher erläutert.

### Chance zur Laufzeitverkürzung

Durch Nutzung der Chance kann die Laufzeit des eigenen Prozesses verkürzt und den Vorgängerprozessen kostenneutral mehr Zeit zugeteilt werden. Dies ist möglich, da der Prozess ausreichend Sicherheitspuffer geplant hat, um bei kleinen Verzögerungen im Projektverlauf trotzdem den eigenen Arbeitsumfang rechtzeitig zu beenden. Diesen Zeitpuffer können die Vorgänger nutzen, um ihr Ergebnis zu verbessern. Zur Verdeutlichung ist eine Beispielsituation in Abbildung 4-12 dargestellt.

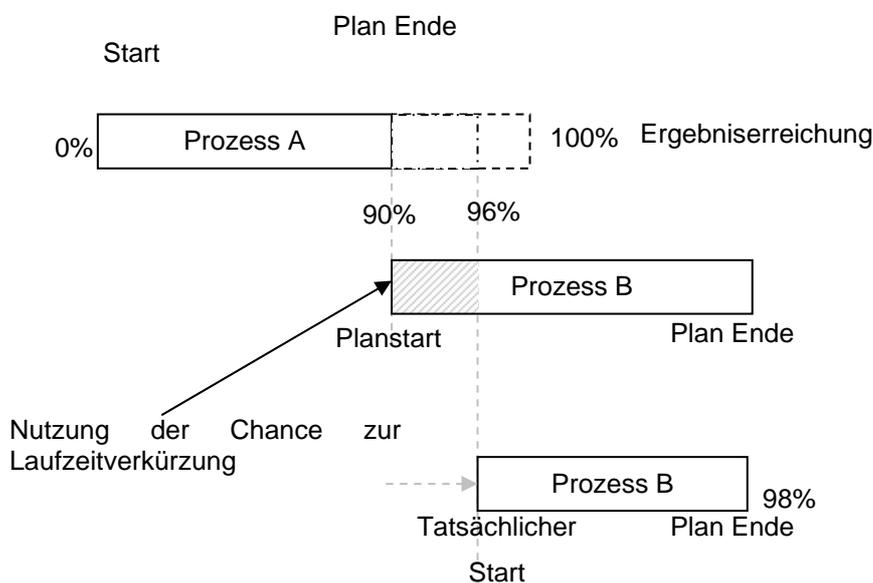


Abbildung 4-12: Laufzeitverkürzung eines Prozesses

In Abbildung 4-12 ist zu sehen, dass Prozess A am Ende der geplanten Laufzeit nicht das optimale Ergebnis erreicht. Aus diesem Grund erhält Prozess B ein unbefriedigendes Ergebnis von lediglich 90% am Prozesseingang. Da Prozess B jedoch Sicherheitspuffer enthält, könnte dieser seinen Startzeitpunkt um die Höhe der Chance verschieben und Prozess A somit die Möglichkeit geben, dessen Laufzeit zu verlängern. Somit verbraucht Prozess A den Sicherheitspuffer von Prozess B. Dafür erhält Prozess B ein verbessertes Ergebnis am Prozesseingang und kann folglich selbst ein besseres Ergebnis erreichen.

Die Berechnung des verbesserten Eingangsergebnisses durch kostenneutrale Laufzeitverkürzung erfolgt in vier Schritten.

- Mit der Chance lässt sich eine neue, kürzere Laufzeit berechnen.

$$\text{kürzere Laufzeit} = \frac{\text{aktuelle Laufzeit}}{1 + \text{Chance}}$$

- Weiterhin wird die eigene Chance in einen Chancenwert des jeweiligen Vorgängerprozesses  $V_i$  umgerechnet.

$$\text{Chance}(V_i) = \text{Chance} * \frac{\text{eigene Planlaufzeit}}{\text{Planlaufzeit}(V_i)}$$

- Die errechnete Chance wirkt auf den Vorgänger wie eine Laufzeitverlängerung. Damit kann ein neues Zwischenergebnis  $E_{temp}$  im Vorgänger berechnet werden. Dieses Ergebnis ist nur temporär, weil sich der Vorgängerprozess mit der gesamten Chancennutzung über sein optimales Ergebnis verbessern könnte.

$$E_{temp}(V_i) = \text{Chance}(V_i) * \text{Ergebnisbreite}(V_i) + \text{ursprüngliches Ergebnis}(V_i)$$

- Nun folgt eine Fallunterscheidung, ob das Zwischenergebnis im Vorgänger über dem optimal erreichbaren Ergebnis liegt. In beiden Fällen wird die neue Laufzeit des Prozesses und die Restchance des Prozesses berechnet. Während im ersten Fall das optimale Ergebnis des Vorgängers nicht erreicht werden konnte (und damit die Restchance aufgebraucht und die volle Laufzeitverkürzung genutzt wurde), wird dieses im zweiten Fall überboten. Die neue Laufzeit berechnet sich dann auf der Grundlage des maximal genutzten Zeitpuffers und die Restchance nach der minimal aus allen Prozessen übrig gebliebenen Restchance.  $E(V_i)$  ist das neue berechnete Eingangsergebnis, dass der Eingangslogik übergeben wird.

$$E(V_i) = \begin{cases} E_{temp}(V_i) & , \text{ wenn } E_{temp}(V_i) \leq E_{opt}(V_i) \\ E_{opt}(V_i) & , \text{ sonst} \end{cases} \begin{cases} \left. \begin{array}{l} \text{neue Laufzeit} = \text{kürzeste Laufzeit} \\ \text{Restchance} = 0 \end{array} \right\} \\ \left. \begin{array}{l} \text{neue Laufzeit} = \frac{\text{eigene Planlaufzeit}}{1 + \text{MAX}\left(\frac{E_{temp}(V_i) - E_{opt}(V_i)}{\text{Ergebnisbreite}(V_i)}\right)} \\ \text{Restchance}(V_i) = \text{MIN}|E_{temp}(V_i) - E_{opt}(V_i)| \\ \text{Restchance}(V_i) \% = \frac{\text{MIN}|E_{temp}(V_i) - E_{opt}(V_i)|}{\text{Ergebnisbreite}(V_i)} \end{array} \right\} \end{cases}$$

Die tatsächlich verkürzte Laufzeit berechnet sich letztendlich aus der Differenz zwischen der ursprünglichen Laufzeit und der neuen Laufzeit. Um diesen Betrag kann der Prozess später anfangen.

$$\text{Zeitverkürzung} = |\text{neue Laufzeit} - \text{eigene Planlaufzeit}|$$

Die Chance kann zur Laufzeiteinsparung genutzt werden, um eine schlechte Ergebnisvorgabe oder eine zeitliche Verspätung durch den Vorgänger abzufuffern. Wenn die Verspätung der Vorgänger durch die Chance nicht aufgeholt werden kann, wird der geplante Abschlusszeitpunkt des Prozesses verschoben und in der Black Box neu berechnet.

$$\text{Neuer Abschlusszeitpunkt} = \text{neue Laufzeit} + \text{MAX}(T_{Ptat}(V_0), T_{Ptat}(V_1), \dots, T_{Ptat}(V_n)),$$

wobei  $T_{Ptat}(V_i)$ : tatsächlicher Abschlusszeitpunkt des Vorgängers und  $\text{MAX}(T_{Ptat}(V_i)) > \text{geplanter Startzeitpunkt des Prozesses}$

Wie bereits erwähnt, kann die Chance auch verwendet werden, um eigenverschuldete Abweichungen aufzuholen. Voraussetzung dafür ist, dass die Vorgänger die Sicherheitsreserven des Prozesses nicht komplett verbrauchen und dadurch ausreichend Restchance übrig bleibt.

In diesem Fall muss die kleinste Restchance aus allen Vorgängerprozessen in einen Chancenwert für den eigenen Prozess umgerechnet werden.

$$\text{Restchance} = \text{Restchance}(V_i) \% * E_b$$

### Restchance zur Ergebnisverbesserung

Nachdem die Eingangs- und Risikologik mit den neuen Werten durchlaufen wurden, besteht die Möglichkeit, die Auswirkungen des Risikos mittels Nutzung der Restchance zu mildern. Das Nutzungspotenzial der Restchance hängt jedoch vom Eintrittszeitpunkt des Risikos ab. Da aber Fehler zu jedem Zeitpunkt während eines Prozessverlaufes auftreten können, darf die Chancenlogik auch nur die verbleibende Zeit des Prozesslaufes benutzen, um diese Abweichung abzupuffern. Demzufolge wird ein Zeitpunkt eines Risikos gleichverteilt über die Prozesslaufzeit angesehen und der Ausmaßwert der Chance je nach Zeitpunkt konstant fallend berechnet. Dies bedeutet, die volle Abpufferung durch die Chance kann nur berechnet werden, wenn der Risikofall zu Beginn des Prozesses auftritt. Folglich kann dieser Zeitpunkt durch eine gleichverteilte Zufallszahl errechnet werden.

$$\text{Risikoeintrittszeitpunkt} = \text{Uniform}[0..1]$$

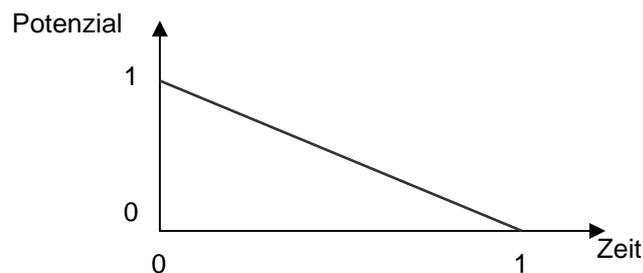


Abbildung 4-13: Einfluss des Risikoeintrittszeitpunktes auf das Chancenpotenzial

Abbildung 4-13 zeigt die Abhängigkeit des Potenzials der Restchancennutzung von dem Risikoeintrittszeitpunkt. Je später das Risiko eintritt, desto geringer ist das Potenzial der Restchance, um das Ergebnis zu verbessern. Tritt der Risikofall erst zum Ende des Prozesses auf, geht das Ausmaß der Abpufferung gegen Null.

Das Ergebnis berechnet sich folgendermaßen:

$$E_{temp} = E_{bisher} + Restchance * (1 - Risikoeintrittszeitpunkt)$$

Dabei ist zu beachten, dass das Zwischenergebnis rein rechnerisch über dem maximal erreichbaren Ergebnis liegen kann, so dass wiederum eine Fallunterscheidung notwendig ist.

$$E_{neu} = \begin{cases} E_{temp} , E_{temp} \leq E_{opt} & \rightarrow Restchance = 0 \\ E_{opt} , E_{temp} > E_{opt} & \rightarrow Restchance = E_{temp} - E_{opt} \end{cases}$$

Sollte das maximal erreichbare Ergebnis des Prozesses übertroffen werden, so wird der Prozess auf den optimalen Wert gesetzt und der „Ergebnisrest“ als Restchance gespeichert. Im anderen Fall ist die Restchance gleich Null. Das Ergebnis  $E_{neu}$  ist das reguläre Ergebnis, das ein Vorgang durch prozessspezifische Eigendynamik ohne zusätzliche Ressourcen erreichen kann.

Anschließend wird die letzte Logik in der Black Box vorgestellt. In dieser wird die kostenintensive Ergebnisverbesserung betrachtet.

#### 4.5.4 Verbesserungslogik

In der Verbesserungslogik findet die Berechnung des Einflusses von Zusatzressourcen bzw. Zusatzzeit auf die Ergebnis- und Terminerfüllung statt.

##### Verwendung von Zusatzressourcen

Wird die Verwendung von Zusatzressourcen erlaubt, können diese zur Verbesserung des Prozessergebnisses bei Ergebnisabweichung und zur Verkürzung der Bearbeitungszeit bei Terminverzug eingesetzt werden. Dabei werden für die Berechnungen im Modell folgende Annahmen getroffen.

- Zusatzressourcen können über die gesamte Prozessbearbeitungszeit eingesetzt werden.

- Zusatzressourcen wirken sich linear auf die Ergebnisverbesserung und Zeitverkürzung aus.
- Die tatsächliche Effizienz der zusätzlichen Ressourcen wird mitbetrachtet.

Dabei entscheidet der Prozessverantwortliche, ob der Prozess durch Zusatzressourcen sein Ergebnis anteilig verbessern kann. Wenn Zusatzressourcen als Mitarbeiter definiert sind, legt der Prozessverantwortliche fest, ob diese sofort 100% arbeitsfähig sind oder ob der Prozess hohe Qualifikationsansprüche fordert und somit die Lernkurve für die zusätzlichen Ressourcen flach ist. Er hat dabei die Möglichkeit, beim Zuweisen der Zusatzressourcen diese Einarbeitungskurve zu berücksichtigen. Durch Angabe eines Faktors zwischen [0..1] kann die Effizienz der zusätzlichen Ressourcen betrachtet werden. Mit diesem Faktor werden die zusätzlichen Ressourcen multipliziert. Das Ergebnis stellt die effektiv nutzbaren Zusatzressourcen dar. Damit sind sie mit den Grundressourcen direkt vergleichbar. Im Folgenden wird unter Zusatzressourcen nur die effektiv nutzbaren Ressourcen verstanden.

### **Ergebnisverbesserung durch Zusatzressourcen**

Durch die Abhängigkeit der Ergebniserreichung von den eingesetzten Ressourcen kann ein neues Ergebnis  $E_{neu}$  durch Hinzunahme von Zusatzressourcen berechnet werden. Die Planressourcen stellen dabei den Grundaufwand an Ressourcen zur Erreichung des Ergebnisses dar.

$$Faktor = \frac{Planressourcen + Zusatzressourcen}{Planressourcen}$$

Das bisherige Ergebnis  $E$  wird anschließend mit diesem *Faktor* verrechnet, so dass ein verbessertes Ergebnis  $E_{temp}$  ermittelt werden kann. Da Anfang  $E_{unt}$  und Ende  $E_{opt}$  eines Ergebnisintervalls bei Prozessen verschieden sein können, muss dies bei der Berechnung berücksichtigt werden.

$$E_{temp} = (E - E_{unt}) * (Faktor - 1) + E$$

Das verbesserte Ergebnis wurde unter vollem Einsatz der Zusatzressourcen erreicht und kann evtl. rechnerisch besser als das optimal erreichbare Ergebnis  $E_{opt}$  sein. Mit einer Fallunterscheidung wird diese Möglichkeit kontrolliert.

$$E_{neu} = \begin{cases} E & , \text{wenn } E \geq E_{opt} & \text{(Fall 1)} \\ E_{opt} & , \text{wenn } E_{temp} > E_{opt} \wedge E < E_{opt} & \text{(Fall 2)} \\ E_{temp} & , \text{sonst} & \text{(Fall 3)} \end{cases}$$

Im Fall 1 war das Ergebnis bereits optimal und es werden keine Zusatzressourcen mehr benötigt.

$$\text{restliche Zusatzressourcen} = \text{Zusatzressourcen}$$

Im Fall 2 wurde rein rechnerisch ein Ergebnis über dem optimalen Wert erreicht, so dass  $E_{temp}$  auf optimal gesetzt werden kann. Anschließend werden die verbrauchten und die restlichen Zusatzressourcen berechnet.

$$\text{verbrauchte Zusatzressourcen} = \frac{(E_{opt} - E_{unt}) * \text{Planressourcen}}{E - E_{unt}} - \text{Planressourcen}$$

$$\text{restliche Zusatzressourcen} = \text{Zusatzressourcen} - \text{verbrauchte Zusatzressourcen}$$

Im Fall 3 konnte auch mit allen verfügbaren Zusatzressourcen kein optimales Ergebnis erreicht werden, so dass alle Zusatzressourcen aufgebraucht wurden.

$$\text{restliche Zusatzressourcen} = 0$$

### **Laufzeiteinsparung durch Zusatzressourcen**

Mit den restlichen Zusatzressourcen aus der Ergebnisverbesserung kann die Laufzeit des Prozesses verbessert werden. Durch den Einsatz von Mehrressourcen kann rein theoretisch der Abschlusszeitpunkt nach vorn gezogen werden. Als erstes wird dafür ein Faktor zur Verkürzung der Bearbeitungszeit  $T$  des Prozesses berechnet.

$$Faktor = \frac{Planressourcen + verbrauchte Zusatzressourcen}{Planressourcen + Zusatzressourcen}$$

Mit diesem Faktor wird anschließend die kürzere Laufzeit  $T_{temp}$  berechnet, die mit vollem Einsatz der restlichen Ressourcen erreicht werden kann.

$$T_{temp} = T * Faktor$$

Ein neuer Endzeitpunkt lässt sich hiermit berechnen. Dabei wird diese Laufzeit auf den spätesten Abschlusszeitpunkt des Vorgängers  $T_{Ptat}(V_i)$  bzw. auf den Startzeitpunkt des Prozesses  $T_{StartPlan}$  addiert.

$$T_{Ptemp} = T_{temp} + MAX(T_{Ptat}(V_i), T_{StartPlan})$$

Durch die neue Bearbeitungszeit  $T_{temp}$ , kann der Prozess rechnerisch vor der geplanten Abschlusszeit  $T_{Plan}$  beendet werden. Eine Falluntersuchung überprüft die neue Laufzeit.

$$T_{neu} = \begin{cases} T_{temp} & , \text{wenn } T_{Ptemp} \geq T_{Pplan} & \text{(Fall 1)} \\ T_{Plan} - MAX(T_{Ptat}(V_i), T_{StartPlan}) & , \text{sonst} & \text{(Fall 2)} \end{cases}$$

In Fall 1 konnte die Terminabweichung trotz Einsatz der restlichen Zusatzressourcen nicht ausgeglichen werden. Die Bearbeitungszeit ist noch immer länger, als die geplante Bearbeitungszeit, so dass alle restlichen Zusatzressourcen aufgebraucht werden und der Abschlusszeitpunkt  $T_{Pneu}$  neu festgesetzt wird.

*restliche Zusatzressourcen = 0* und

$$T_{Pneu} = T_{Ptemp}$$

Im Fall 2 konnte die Bearbeitungszeit so weit verkürzt werden, dass der tatsächliche Abschlusszeitpunkt vor dem geplanten Abschlusszeitpunkt liegt. In diesem Fall werden die restlichen Zusatzressourcen nicht komplett aufgebraucht. Es wird jedoch im Modell nicht automatisch eine Prozesslaufzeit soweit gekürzt, dass ein Vorgang

(Black Box) vor dem geplanten Abschlusszeitpunkt fertig wird. Vielmehr wird das Potenzial an vorhandenen restlichen Zusatzressourcen als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung gestellt. Daraus ergeben sich die folgenden Kennzahlen.

$$\frac{\text{tatsächlich genutzte Gesamtressourcen}}{T_{neu}} = \frac{T_{Plan} * (\text{Planressourcen} + \text{restliche Zusatzressourcen})}{T_{neu}}$$

$$\text{restliche Zusatzressourcen} = \text{Planressourcen} + \text{Zusatzressourcen} - \text{tatsächlich genutzte Gesamtressourcen}$$

$$T_{Pneu} = T_{PPlan}$$

### Verwendung von Zusatzzeit

Wird die Verwendung von Zusatzzeit erlaubt, kann diese zur Verbesserung des Prozessergebnisses eingesetzt werden. Dabei wird für die Berechnungen folgende Annahme getroffen. Die Zusatzzeit wirkt sich linear auf die Ergebnisverbesserung aus.

Wie schon in der Anwendung der Zusatzressourcen kann ein Faktor aus der bisherigen Laufzeit und der Zusatzzeit gebildet werden.

$$\text{Faktor} = \frac{\text{bisherige Bearbeitungszeit} + \text{Zusatzzeit}}{\text{bisherige Bearbeitungszeit}}$$

Das bisherige Ergebnis  $E$  wird mit dem Faktor verrechnet, so dass ein verbessertes Zwischenergebnis  $E_{temp}$  berechnet werden kann.

$$E_{temp} = (E - E_{unt}) * (\text{Faktor} - 1) + E$$

Das Zwischenergebnis kann über dem optimalen Ergebnis  $E_{opt}$  liegen. Durch eine Fallunterscheidung wird diese Möglichkeit untersucht.

$$E_{neu} = \begin{cases} E & , \text{ wenn } E \geq E_{opt} & \text{(Fall 1)} \\ E_{opt} & , \text{ wenn } E_{temp} > E_{opt} \wedge E < E_{opt} & \text{(Fall 2)} \\ E_{temp} & , \text{ sonst} & \text{(Fall 3)} \end{cases}$$

Im Fall 1 war das Ergebnis bereits optimal und es wird keine Zusatzzeit benötigt.

*restliche Zusatzzeit = Zusatzzeit*

*tatsächlich genutzte Zusatzzeit = 0*

Im Fall 2 würde ein Ergebnis über dem optimalen Wert erreicht, so dass  $E_{neu}$  auf optimal gesetzt werden kann. Anschließend wird die verbrauchte und die restliche Zusatzzeit berechnet.

*Tatsächlich genutzte Zusatzzeit =*

$$\frac{(E_{opt} - E_{unt}) * \textit{bisherige Bearbeitungszeit}}{E - E_{unt}} - \textit{bisherige Bearbeitungszeit}$$

*restliche Zusatzzeit = Zusatzzeit – tatsächlich genutzte Zusatzzeit*

Im Fall 3 konnte auch mit vollem Einsatz der gegebenen Zusatzzeit kein optimales Ergebnis erreicht werden, so dass alle Zusatzressourcen aufgebraucht wurden.

*restliche Zusatzzeit = 0*

*tatsächlich genutzte Zusatzzeit = Zusatzzeit*

Der neue Abschlusszeitpunkt des Prozesses kann wie folgt berechnet werden.

$$T_{P_{neu}} = \textit{bisherige Abschlusszeitpunkt} + \textit{tatsächlich genutzte Zusatzzeit}$$

Die tatsächliche Abschlusszeitpunkt in einem Projekt kann folglich an dem letzten Prozess berechnet werden.

$$T_{PTatProj} = T_{PTat} + T_{LZusatzTat} + \textit{MAX} (T_{PTat} (V_0), T_{PTat} (V_1), \dots, T_{PTat} (V_n))$$

Mit der Definition der Verbesserungslogik ist der letzte Schritt in der Black Box beschrieben. Das Ergebnis und die eventuelle Verspätung werden nach der Verbesserungslogik an die nachfolgenden Prozesse weitergegeben. Wenn ein Prozessverantwortlicher keine kostenintensive Verbesserung von Abweichungen

zulässt, werden die Daten nach der Chancenlogik an die Nachfolger übermittelt. Diese Prozesse verarbeiten die Inputdaten mit der gleichen Vorgehensweise und leiten sie an die nächsten Prozesse weiter.

Durch diese neue Modellierung eröffnen sich neue Perspektiven in der Projektplanung. Es könnten somit Fragen wie z.B. Welche Prozesse tragen am meisten zum Gelingen des Projektergebnisses bei? Welche Prozesse reagieren sehr sensibel auf Vorgänger? In welchen Prozessen ist die Unsicherheit am größten? oder Welche Prozesse haben das größte Potenzial, Abweichungen zu kompensieren? beantwortet werden

#### 4.6 Konsequenzen für die Simulation

Eine Monte Carlo Simulation kann verwendet werden, um den Verlauf des Ergebnisses im Projekt zu verfolgen. Die Voraussetzung für eine Monte Carlo Simulation ist durch die definierten Verteilungsfunktionen der Chance bzw. Risiko erfüllt. Weiterhin können Aspekte der diskreten Ereignissimulation berücksichtigt und an das neue Modell angepasst werden. Bei der diskreten Ereignissimulation werden die **Zustände** eines **Systems** über dessen gesamte, simulierte Laufzeit betrachtet. Übertragen auf das neue Modell stellt jeder zeitlich festgelegte **Ergebniswert den Zustand** und das **System den Prozess** zur betrachteten Zeit dar. Ein zum nächsten Zeitpunkt erreichtes Ergebnis (Zustand) ist einerseits vom vorherigen Prozessergebnis (Systemzustand) abhängig. Andererseits hat die Eigendynamik eines Prozesses (Systems) einen Einfluss auf den Ergebniswert (Zustandswert) und verändert diesen. Für eine gewöhnliche diskrete Ereignissimulation müsste über die gesamte Simulationszeit eine Ergebnisfunktion pro Prozess ermittelt werden, welche die Ergebnisse des Prozesses, über die Simulationszeit betrachtet, darstellt. Um dies zu ermöglichen, müsste der genaue Ergebnisverlauf eines Vorgangs als geplante Sollfunktion über die Prozesslaufzeit vorliegen. Doch für ein Projekt ist nicht ein Ergebnisverlauf innerhalb eines Prozesses von Interesse, sondern das konkrete Ergebnis zum Prozessabschlusszeitpunkt. Nur dieser Wert ist relevant für den weiteren Projektverbund und muss beachtet werden. Deswegen wird in dieser Arbeit auf einen Zeitfaktor, der den Ergebnisverlauf in einem Prozess protokolliert,

verzichtet. Die positiven und negativen Ergebnisabweichungen im Prozessverlauf werden mittels stochastischer Einflüsse durch Risiko und Chance dargestellt.

Vor allem kann die komplizierte und in der Realität in vielen Prozessstrukturen unmögliche Datenerhebung, um den Ergebnisverlauf eines Prozesses zu beschreiben, dadurch entfallen.

Die Konsequenzen für die Simulation daraus können wie folgt beschrieben werden. Die Simulation startet bei einem beliebigen Startprozess und ermittelt eine Stichprobe aufgrund von Risiko und Chance für das Ergebnis. Das ermittelte Ergebnis kann z.B. verbessert werden, wenn der Prozessverantwortliche für den Vorgang Zusatzressourcen definiert hat. Ist eine Zeitverlängerung erlaubt, so arbeitet die Simulation entweder bis diese verbraucht oder das optimale Ergebnis erreicht worden ist. Das simulierte Ergebnis, die tatsächliche Abschlusszeit und die Zeitverlängerung vom Startprozess werden an die direkten Nachfolger weitergegeben. Wenn die Nachfolger alle Vorgängerergebnisse erhalten, kann die Simulation in der Eingangslogik den Einfluss der Vorgängerergebnisse auf den eigenen Prozess berechnen. Anschließend wird wieder eine Stichprobe gemäß der prozessspezifischen Verteilungsfunktion von Chance bzw. Risiko ermittelt. Die Simulation überprüft dabei, ob der Prozess am Eingang nicht die optimalen Vorgaben bekommen hat. Falls dies der Fall ist, wird die eigene Prozesslaufzeit maximal bis zur Höhe des Sicherheitspuffers reduziert. Die direkten Vorgänger erhalten für diesen Prozess mehr Zeit, ihr Ergebnis zu verbessern. Die Eingangslogik wird wieder neu durchgeführt. Das Ergebnis wird durch das ermittelte Risiko verschlechtert und durch eine mögliche Restchance wieder verbessert. Falls Verbesserungspotenzial erlaubt ist, wird dieses herangezogen, um das Ergebnis in der gleichen oder einer kürzeren Zeit mit mehr Ressourcen oder in einer längeren Zeit mit den geplanten Ressourcen zu verbessern. Der tatsächliche Abschlusszeitpunkt, die Zeitverspätung und das Ergebnis werden an die Nachfolger weitergereicht. Die Simulation arbeitet so lange, bis sie bei den Endprozessen ankommt. Anschließend werden weitere neue unabhängige Simulationen gestartet. Pro Simulationsdurchlauf können so alle prozessspezifischen Kenngrößen ermittelt und bei Bedarf an die nächsten Prozesse übergeben werden. Somit bietet sich die Möglichkeit an, alle relevante Größen über den gesamten Projektverlauf zu verfolgen.

#### **4.7 Merkmale und Potenzial der neuen Methode zur Risikoverfolgung**

Mit der neuen Methode zur Modellierung von komplexen Projekten wurden neue Größen eingeführt, die von nun an in Projekten verfolgt werden können. Dazu zählt unter anderem die Ergebniseinwirkung durch Chance und Risiko. Dabei wurde die Stochastik in die Modellierung eingeführt. Durch die Eingangslogik können die Abhängigkeiten eines Prozesses zu den Vorgängerprozessen quantitativ und qualitativ beschrieben werden. Dies bildet in Verbindung mit dem Risiko, der Chance und dem Verbesserungspotenzial die Grundvoraussetzung zur Abbildung der Dynamiken und Elastizität in den Prozessen.

Weiterhin neu ist die Verfolgung der Ergebnisabweichungen. Mit ihr können nicht nur der Abschlusstermin oder die Projektkosten, sondern auch das wahrscheinliche Ergebnis des Projektes prognostiziert werden. Die Entwicklung dieser Methode ist der erste Weg zu einer aktiven Projektplanung und -steuerung.

Das Ziel mit diesem Modell besteht darin, die wichtigsten Kenngrößen zum Erkennen von Abweichungen dem Anwender realitätsnah und transparent darzustellen. Der Projektverantwortliche kann mit dem Verbesserungspotenzial auf Abweichungen reagieren und die Auswirkungen der Veränderungen beobachten. Dabei kann er die Faktoren Kosten, Ergebnis und Zeit im gesamten Projekt verfolgen und durch Simulationen anhand verschiedener Gesichtspunkte variieren und neu berechnen. Er hat die Möglichkeit, verschiedene Maßnahmen zu überprüfen, deren Ergebnisse zu analysieren und mit neuen Erkenntnissen weitere Szenarien zu definieren.

Ein Ergebnis kann verbessert werden, indem mehr Ressourcen bei gleichem Zeitaufwand eingesetzt werden (erhöhte Kosten). Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Laufzeit einzelner elementarer Prozesse zu erhöhen (erhöhte Kosten). Dies sorgt entweder für eine zeitliche Verschiebung des Projektes nach hinten, oder es werden zeitliche Optimierungen (durch Zusatzressourcen oder Chance) in nachfolgenden Prozessen als Ausgleich gefunden.

Ist ein Prozess verspätet, versucht die Simulation diese Zeit durch Nutzen der erlaubten Zusatzressourcen oder Sicherheitsreserven wieder aufzuholen. Mit der Anpassung der diskreten Ereignissimulation auf das neue Modell können Simulationen in großen Projektnetzwerken ohne großen Rechenaufwand durchgeführt werden.

Dabei eröffnet sich das Potenzial, dass durch diese Methode dem Projektleiter für seine Analysen und Entscheidungen neue Kenngrößen und Stellhebel aufgezeigt werden, die er mit den bisherigen Vorgehensweisen nur beschränkt in einem Modell verfolgen konnte. Im nächsten Abschnitt werden die wichtigsten Kenngrößen und Stellhebel näher erläutert, die im Rahmen des neuen Modells zur Steuerung des Projektes abgebildet werden können.

Diese Kenngrößen, die einerseits dem Projektleiter Abweichungen in den Vorgängen signalisieren und andererseits die besten Eingriffsmöglichkeiten hervorheben, werden in den Abschnitten 5.2 - 5.4 aus dem neuen Modell abgeleitet. Dabei werden die wichtigsten Merkmale und Eigenschaften der neuen Kennzahlen erörtert.

## 5 Abbilden neuer Kenngrößen mit dem stochastischen Risikomodell

### 5.1 Übersicht

Das neu entwickelte Modell wird auf Grund von Berücksichtigung der Stochastik, der Risiken und Chancen als **stochastisches Risikomodell** definiert.

Basierend auf dem stochastischen Risikomodell werden neue Kennzahlen definiert, die den Projektverantwortlichen beim Leiten eines großen Projektes unterstützen. Die Kennzahlen sollen dem Projektleiter aktiv bei der Ursachenanalyse und Maßnahmendefinition helfen. Es werden Kenngrößen untersucht, die Abweichungen signalisieren, optimale Verbesserungspotenziale darstellen, Sicherheiten und kritische Prozessketten im Projekt ersichtlich machen. Der Projektleiter soll die Möglichkeit durch eine geeignete Kombination von Kennzahlen haben, Risiken im Projekt zu erkennen und kosteneffiziente und effektive Maßnahmen zu definieren. Er muss einen Überblick darüber besitzen, in welchen Prozessen noch Potenzial steckt, welche Prozesse die größte Belastung haben, welche Vorgangsketten die höchste Abweichung besitzen und welche Ereignisse andere am stärksten beeinflussen. Durch Berücksichtigen der Stochastik in der Modellierung gibt es keine eindeutigen kritischen Pfade mehr. Dafür wird die Definition des kritischen Pfades erweitert. Anhand der neuen Kenngrößen werden weitere Pfade abgeleitet. Da nicht alle wichtigen Größen auf einer Prozesskette von Projektstart bis Projektende liegen müssen, werden in Abschnitt 5.4 sortierte Projektlisten ermittelt. Anschließend werden die wichtigsten Neuerungen des stochastischen Risikomodells zusammengefasst.

### 5.2 Definition neuer Kennzahlen

Nach Burghardt sind die am meisten im Projektmanagement verfolgten Größen zur Analyse, Beschreibung, Planung, Kontrolle und Steuerung von Projektabläufen der Start- und Endtermin eines Prozesses, Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen von Prozessen, Kosten, Ressourcen (Mitarbeiter, Maschinen,...) und Betriebsmittel [12].

Es wurde bereits diskutiert, dass Indikatoren wie ein kritischer Pfad, die Klassifikation in aktive und passive Prozesse oder in sichere und unsichere Prozesse dem Projektverantwortlichen eine weitere Entscheidungsgrundlage bieten.

Durch die neue Modellierung der Dynamik und der Stochastik in den Prozessen ist es möglich, weitere Projektkenngößen für die Verantwortlichen sichtbar zu machen. In der Modellierung sind Eigenschaften wie Risiko, Chance, Verbesserungspotenziale mittels Zeitverlängerung bzw. Zusatzressourcen, produziertes Ergebnis und Ergebnisabhängigkeit zwischen Prozessen bereits eingeführt. Dadurch ist aus einer statischen Modellierung der Vorgänge eine elastische und stochastische Abbildung entstanden. Basierend auf dem neuen Risikomodell werden weitere wichtige Größen abgeleitet, um Gefährdungsquellen im Projekt zu identifizieren und die kosteneffizienten Maßnahmen einzuleiten. Im Folgenden werden diese Größen, deren Herleitung und der erwartete Nutzen im Einzelnen vorgestellt.

### 5.2.1 Restrisiko

Die Kenngröße **Restrisiko** ist eine Zufallsvariable. Sie stellt im Ergebnis die positive Differenz zwischen den Größen Risiko und Chance in jedem Prozess dar, d.h. das Risiko ist größer als die Chance. Diese Größe kann während der Simulation aus den ermittelten Stichproben von Risiko und Chance berechnet werden.

*Restrisiko = Ergebnisverschlechterung durch Risiko – Ergebnisverbesserung durch Chance*

$$Risiko_{Rest} = (Risiko - Chance) * E_b$$

Das Restrisiko zeigt dem Projektleiter, ob die vorhandenen Sicherheitsreserven in den Prozessen ausreichen, um die internen Abweichungen abzupuffern. Prozesse mit Restrisiko werden ihr optimales Ergebnis ohne Kostenmehraufwand wahrscheinlich nicht erreichen. Weiterhin haben diese Prozesse kein kostenneutrales Potenzial zum Abfangen von Ergebnisabweichungen der Vorgänger. Je größer die Kenngröße Restrisiko ausfällt, desto gefährdeter ist der Prozess, sein Ergebnis zu verfehlen und desto geringer ist die Aussicht, dass Abweichungen von Vorgängerprozessen ohne Kostenmehraufwand aufgeholt werden können.

### 5.2.2 Restchance

Die **Restchance** bleibt übrig, wenn der Prozess ausreichend Chancenpotenzial besitzt, und der Prozess sowie seine direkten Vorgänger nach Chancennutzung ihr Ergebnis übererfüllen würden. Sie stellt das Potenzial dar, dass weitere Abweichungen kostenneutral abgepuffert werden können und zeigt die noch vorhandenen Sicherheitsreserven an. Eine verfügbare Restchance reflektiert dem Projektleiter, dass der Prozess bereits sein optimales Ergebnis in der vereinbarten Zeit und mit den geplanten Mitteln erreicht hat und seine Vorgänger ebenfalls optimale Vorgaben liefern. Eine sehr große Restchance ist ein Anzeichen dafür, dass der Prozess zu viele Sicherheitsreserven besitzt und somit unnötig den Projektverlauf verzögert.

Besitzt ein Prozess keine Restchance, so kann er weitere Abweichungen nicht kostenneutral aufholen. Weiterhin reflektiert diese Größe, dass entweder die Vorgänger schlechte Vorgaben liefern oder dass das Risiko im Prozess sehr groß ist und die geplanten Sicherheitsreserven nicht ausreichen. Werden im Projekt keine kostenintensiven Maßnahmen zur Abpufferung von Abweichungen zugelassen, so sind Prozesse ohne Restchance gefährdet, die Prozessziele zu erreichen.

### 5.2.3 Restzusatzressourcen

**Restzusatzressourcen** stellen alle noch zur Verfügung stehenden, aber nicht benötigten Zusatzressourcen dar. Sind diese vorhanden, so stehen dem Prozess noch Mittel zur Verfügung, um bei Abweichungen im Projektverlauf das Prozessergebnis durch Zugabe von Zusatzressourcen in konstanter Bearbeitungszeit zu verbessern oder die Bearbeitungszeit mit konstantem Prozessergebnis zu verkürzen.

Nicht genutzte Zusatzressourcen stellen ebenso wie die Restchance das Potenzial dar, Abweichungen der Vorgänger ohne negative Auswirkung auf das eigene Prozessergebnis abpuffern zu können. Wenn in einem Projekt Zusatzressourcen erlaubt und nach der Simulation keine (Restzusatzressourcen) mehr vorhanden sind, zeigt diese Kenngröße, dass das optimale Ergebnis mit den zur Verfügung stehenden Zusatzressourcen mit großer Wahrscheinlichkeit nicht erreicht wird bzw. Verzögerungen durch Vorgänger nicht aufgeholt werden. Andersrum spiegelt das Vorhandensein von Restzusatzressourcen wider, dass der Prozess alle

bisherigen Abweichungen mit den eingesetzten Mitteln abpuffern kann und noch Potenzial besitzt, um weitere Abweichungen aufzuholen. Es werden Prozesse ersichtlich, die mit zu vielen Zusatzressourcen geplant wurden.

Im Gegensatz zur Restchance ist dieses Verbesserungspotenzial kostenintensiv. Prozesse die keine Restchancen und Restzusatzressourcen enthalten, sind für weitere Abweichungen empfindlich. Hierbei ist es zielführend, in vorausgehenden Prozessen nach Verbesserungspotenzialen zu suchen.

Das neue Modell bietet die Möglichkeit, die Ressourcenverteilung über alle Prozesse miteinander zu vergleichen, indem für alle Prozesse die Nutzung der spezifischen Zusatzressourcen erlaubt wird. Die Prozesse, die nach der Simulation keine restlichen Zusatzressourcen besitzen, werden mit hoher Wahrscheinlichkeit ihr Ergebnis in der geplanten Zeit nicht erreichen. Diejenigen, die noch Restzusatzressourcen aufweisen, könnten auch mit weniger Zusatzressourcen auskommen. Eine gleichzeitig hohe Projektzielabweichung ist ein eindeutiger Indikator, dass die Ressourcen- und Zeitplanung nicht ausgereift ist. Das Projekt kann nicht mit dem geforderten Ergebnis in der zur Verfügung stehenden Zeit fertig gestellt werden, obwohl alle Zusatzressourcen im Projekt verteilt sind.

#### 5.2.4 Restzeit

Unter **Restzeit** ist der Zeitpuffer zu verstehen, den ein Prozess zu seinem frühesten Nachfolger besitzt. Um diesen Betrag können die Laufzeiten der jeweiligen Prozesse verlängert werden, damit ihre Ergebnisse verbessert und gleichzeitig die Startzeitpunkte der Folgeprozesse nicht gefährdet werden.

In Abbildung 5-1 stellen die Prozesse P2, P4 und P5 eine zusammenhängende Prozesskette dar, in der es keinen Zeitpuffer gibt. Im Gegensatz dazu existiert in der Prozesskette bestehend aus P1, P3 und P5 ein Zeitpuffer.

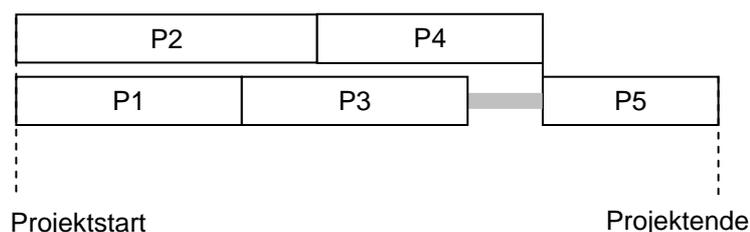


Abbildung 5-1: Exemplarische Darstellung der Restzeit

In diesem Beispiel kann der Prozess P3 seine Bearbeitungszeit durch Nutzung des Puffers verlängern und sein Ergebnis verbessern. Die Projektlaufzeit wird dabei nicht beeinflusst. Die Ausdehnung der Bearbeitungszeit ist kostenintensiv, da der Prozess die eingebundenen Ressourcen länger nutzt als geplant. Der Projektleiter hat ebenfalls die Möglichkeit, P1 anstatt von P3 länger laufen zu lassen.

Die Größe Restzeit ist somit ein Indikator dafür, dass ein Verbesserungspotenzial im Projekt vorhanden ist, ohne dabei die Projektlaufzeit zu verlängern. Sie zeigt jedoch nicht, welcher Prozess die kostengünstigste Wirkung auf das Projektziel besitzt. Die Kenngröße Restzeit ist für den Projektleiter hilfreich, um vorhandene Zeitpuffer zu identifizieren. Es werden jedoch weitere Eigenschaften von den Prozessen benötigt, damit durch gezielte Steuerung das optimal mögliche Ziel erreicht werden kann.

Bei der Entscheidung, den verfügbaren Zeitpuffer zu nutzen, muss beachtet werden, dass sich dadurch der kritische Zeitpfad im Projekt ändern kann. Dies ist besonders problematisch, wenn die Prozesse keine Restchance und Restressourcen mehr besitzen. Bei weiteren Abweichungen sind in diesen Prozessketten keine Abpufferungsmöglichkeiten mehr vorhanden, so dass das Projektziel negativ beeinflusst wird.

Sind die Kenngrößen Restchance, Restzusatzressourcen bzw. Restzeit ungleich Null, signalisieren sie das Vorhandensein ausreichender Reserven, um kostenneutral bzw. kostenintensiv Abweichungen abzapuffern. Sind diese Kenngrößen gleich Null, wird der Prozess höchstwahrscheinlich sein Ergebnis nicht erreichen und anfällig für weitere Abweichungen sein.

### 5.2.5 Druck

In der Modellierung von Projekten werden meist nur nahe liegende Parameter wie zum Beispiel Ressourcen, Kosten und Zeit betrachtet. Der psychologischen Belastung der Prozessverantwortlichen im Projekt wird weniger Beachtung beigemessen. Mit der Kennzahl **Druck** wird eine neue, psychologische Größe eingeführt. Diese Variable beschreibt das Verhältnis der psychologischen Belastung auf die Prozessverantwortlichen und der Fähigkeit dieser entgegenzuwirken. Die Belastung kommt aus Zeitverspätung und Ergebnisabweichung der Vorgänger zustande. Die Fähigkeit besteht im eigenen Potenzial, Abweichungen abzapuffern. Mit dieser neu-

artigen Kennzahl kann die jeweilige Belastung auf die Prozessverantwortlichen im Projektverlauf bestimmt und verfolgt werden.

Zur Modellierung dieser Kennzahl wird eine Analogie aus der Physik herangezogen. Hierbei lässt sich der Druck in Projekten ähnlich wie dem tatsächlichen Druck in der Physik berechnen. Die physikalische Formel für Druck lautet:

$$\text{Druck (in Pascal): } p = \frac{F}{A} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$$

Fläche  $A$  steht Kraft  $F$  entgegen. Je größer die Fläche, desto geringer der entstehende Druck. Fläche  $A$  und Kraft  $F$  setzen sich in der Physik wie folgt zusammen:

Fläche (in qm):  $A = l * b = \text{Länge} * \text{Breite}$  (z.B. für eine rechteckige Fläche)

Kraft (in Newton):  $F = m * a = \text{Masse} * \text{Beschleunigung}$

Für eine Anwendung dieser Formeln in Projekten werden die Größen Kraft und Fläche auf das Projektmanagement übertragen. Kraft  $F$  symbolisiert, wie stark der Vorgängerprozess den aktuellen Prozess beeinflusst. Das Produkt aus  $m*a$  wird im Projektmanagement durch Ergebnisabweichung und Prozessverspätung ersetzt.

$$F \cong \text{Ergebnisabweichung} * \text{Prozessverspätung}$$

Je höher die Ergebnisabweichung und die Verspätung eines Prozesses sind, desto größer wird die auf den Nachfolger wirkende Kraft.

Fläche  $A$  zeigt das Potenzial eines Prozesses zum Abfangen von Abweichungen. Sie verdeutlicht die Fähigkeit eines Prozesses, der ankommenden Kraft entgegenzuwirken. Daraus folgt:

$$A \cong \text{Chance} * \text{Zusatzressourcen} * \text{Zeitverlängerung} * \text{Risiko}^{-1}$$

Im Gegensatz zur Ermittlung einer physikalischen Fläche wird die Fläche im Projektmanagement durch die Faktoren Chance, Zusatzressourcen, Zeitverlängerung und Risiko aufgespannt. Dabei trägt prozesseigenes Risiko zur Verkleinerung der Fläche bei.

In der Berechnung werden die durch die Simulation ermittelten Stichproben für Chance und Risiko, die eingesetzten Zusatzressourcen und die dem Prozess zugestandene Zeitverlängerung berücksichtigt. Dabei ist die Zugabe von Zeit unkritisch, wenn dem Prozess ein Zeitpuffer folgt und die Verlängerung kleiner als der Zeitpuffer ist. Andererseits erhöht eine Zeitzugabe die Kraft auf nachfolgende Prozesse (senkt aber den Druck im eigenen Prozess).

Der Druck  $p$  kann nun wie folgt berechnet werden.

$$p = \frac{\text{Ergebnisabweichung} * \text{Prozessverspätung}}{\text{Chance} * \text{Zusatzressourcen} * \text{Zeitverlängerung} * \frac{1}{\text{Risiko}}}$$

Detailliert kann diese Formel wie folgt dargestellt werden.

$$p = \frac{\frac{E_b}{E_{nE} - E_{unt}} * \frac{T_{LPlan} + T_{PStartTat} - T_{PStartPlan}}{T_{LPlan}}}{\frac{E_{nC} - E_{vC} + E_{RC} + E_b}{E_b} * \frac{Re_{Zusatz} + Re_{Plan}}{Re_{Plan}} * \frac{T_{LPlan} + T_{LZusatz}}{T_{LPlan}} * \frac{E_b}{E_{vR} - E_{nR} + E_b}},$$

wobei  $E_b$  =Ergebnisbreite,  $E_{nE}$  =Ergebnis nach der Eingangslogik,  $E_{nC}$  =Ergebnis nach der Chancenlogik,  $E_{vC}$  = Ergebnis vor der Chancenlogik,  $E_{RC}$  = mögliche Ergebnisverbesserung durch die Restchance,  $E_{nR}$  = Ergebnis nach der Risikologik,  $E_{vR}$  = Ergebnis vor der Risikologik,  $T_{LPlan}$  =geplante Laufzeit,  $T_{LZusatz}$  = erlaubte Zeitverlängerung,  $T_{PstartTat}$  = tatsächlicher Startzeitpunkt,  $T_{PstartPlan}$  =geplanter Startzeitpunkt,  $Re_{Zusatz}$  = Zusatzressourcen,  $Re_{Plan}$  =geplante Ressourcen sind.

Der Druck kann durch Einsatz von Zusatzressourcen und Zugabe von Zeitverlängerung gesenkt werden. Der Einfluss von Chance und Risiko ist in diesem Zusammenhang nicht direkt veränderbar und wird anhand der jeweiligen Verteilungsfunktion ermittelt. Die Größen Ergebnisabweichung und Prozessverspätung werden so normiert, dass sie bei keiner Abweichung bzw. Verspätung den Wert eins erhalten. Um die Vergleichbarkeit der Kenngrößen zu gewährleisten, werden auch Chance, Zusatzressourcen, Zeitverlängerung und Risiko so normiert, dass sie jeweils nicht kleiner als eins werden können. Dies wird erreicht, indem der Einfluss der

Größen Chance, Risiko und Ergebnisabweichung immer im Bezug zur gesamten Ergebnisbreite betrachtet werden. Bei den Größen Zusatzressourcen, Zeitverlängerung und Prozessverspätung werden deren Veränderung gegenüber den geplanten Ressourcen bzw. der Projektlaufzeit berücksichtigt. Daraus ergibt sich der folgende Wertebereich.

$$p = \frac{F}{A} \rightarrow \frac{1 \leq F \leq \infty}{0 < A \leq \infty} \left[ \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \right]$$

Die anschließende Betrachtung der Kennzahl Druck zeigt deren Aussagekraft.

- $p > 1$  bei  $F > A$ :  
Der Vorgang ist überlastet. Er steht einer größeren Abweichung gegenüber, als er durch eigenes Verbesserungspotenzial ausgleichen kann. Daraus folgt, dass eine ankommende Abweichung bzw. Verspätung nicht abgepuffert werden kann und an die Nachfolger weitergegeben wird. Es besteht zusätzlich die Gefahr, dass der Prozess nicht nur durch Abweichungen von Vorgängern, sondern auch durch erhöhtes eigenes Risiko eine große Kraft auf die Nachfolger ausübt. Diese Kraft ist prozessspezifisch, denn die Auswirkung einer Ergebnisabweichung eines Prozesses auf die Nachfolger kann unterschiedlich sein. Auch der Einfluss einer Verspätung eines Vorgangs auf die Nachfolger hängt von dem geplanten Startzeitpunkt der Folgeprozesse ab. Ein hoher Druck ist somit ein Indikator dafür, dass der Prozess das gewünschte Ergebnis und die geplante Laufzeit verfehlen wird und keine internen Mittel besitzt, dem entgegenzuwirken.
- $p = 1$  bei  $F=A$ :  
Im Vorgang herrscht Normaldruck. Die Abweichungen und das Potenzial diese abzupuffern, halten sich genau in Waage. Der Vorgang übt auf die Folgeprozesse keine Kraft aus, da er die vorhandenen Ergebnisabweichungen und Verspätungen sehr wahrscheinlich aufholen kann und ein optimales Ergebnis in der geplanten Zeit an die Folgeprozesse übermittelt. Der Prozess ist anfällig für weitere Abweichungen, da keine internen Verbesserungsmöglichkeiten mehr vorhanden sind. Eine Verstärkung des Krafteinflusses durch die Vorgänger bedeutet eine unmittelbare Ergebnisverschlechterung bzw. Laufzeitverlängerung.

- $p < 1$  bei  $F < A$ :

Der Vorgang ist verbesserungsfähig. In ihm überwiegt das Potenzial, Abweichungen aufzufangen. Eine ankommende Kraft kann durch das interne Verbesserungspotenzial abgeschwächt werden. Auch in diesem Fall übt der Prozess auf Nachfolger keine Kraft aus, da alle Abweichungen und Verspätungen höchstwahrscheinlich abgefangen werden können. Der Prozess ist so gut, dass sogar noch für weitere Abweichungen interne Reserven vorhanden wären, diese abzupuffern.

Mit der Kennzahl Druck ist eine neue Flussgröße für komplexe Projekte entwickelt worden. Mit dieser kann im ganzen Projekt die jeweilige Belastung auf die Prozessverantwortlichen verfolgt werden. Die Höhe des Drucks zeigt, ob der Prozess überlastet ist bzw. ausreichend Verbesserungsmöglichkeiten besitzt, Abweichungen entgegenzuwirken. Der Projektleiter erhält einen schnellen Überblick, welche Prozesse die höchste Belastung besitzen und durch eigene Mittel nicht behoben werden können. Er könnte diesen Prozessen noch mehr Zusatzressourcen bzw. Zusatzzeit zuteilen. Doch es gibt Vorgänge, die keine Zusatzressourcen aufnehmen können bzw. bei denen eine Erhöhung der Laufzeit eine Verlängerung der Projektlaufzeit bedeutet. In diesen Fällen muss der Projektleiter versuchen, andere Prozesse zu verbessern. Die Schwierigkeit besteht darin, kostengünstige und effektvolle Maßnahmen zu definieren, um den Druck im Projekt senken und das Projektziel erreichen zu können. Es werden im Folgenden Größen eingeführt, die dem Projektleiter eine Auswahl von effektiven, effizienten und kosteneffizienten Maßnahmen anbieten.

### **5.2.6 Effektive, effiziente und kosteneffiziente Ergebnissensitivität**

Die **Ergebnissensitivität** ist eine Erweiterung der Ansätze des Sensitivitätsmodells (vgl. Abschnitt 2.3.2). Im Sensitivitätsmodell wurde nur qualitativ die Stärke der Prozessabhängigkeiten betrachtet. Durch die neue Größe Ergebnissensitivität wird nun quantitativ beschrieben, wie sensibel ein Prozess auf die Ergebnisabweichung eines Vorgängers reagiert. Sie ist eine Kennzahl, die die prozentuale Ergebnisverbesserung eines Prozesses angibt, wenn der Vorgänger ein besseres Ergebnis liefert. Die Ergebnissensitivität beschreibt somit die Abhängigkeit des Prozessergebnisses von seinen Vorgängern. Sie findet Anwendung in Fällen, in denen das

Ergebnis eines Prozesses verbessert werden soll. Dies geschieht entweder indem der Prozess eigenes Verbesserungspotenzial nutzt oder die Vorgänger verbessert werden müssen. Dabei unterstützt die effektive, effiziente bzw. kosteneffiziente Ergebnissensitivität den Prozessverantwortlichen bei der Festlegung von Gegenmaßnahmen. Im Folgenden werden die Merkmale dieser Kennzahlen vorgestellt.

### Effektive Ergebnissensitivität

Die **effektive Ergebnissensitivität** zeigt die prozentuale Ergebnisverbesserung eines Prozesses an, wenn der Vorgänger sein optimales Ergebnis liefern würde. Mit dieser Größe werden Vorgängerprozesse sichtbar, auf dessen Ergebnisverbesserung der Prozess selbst eine große Ergebnisverbesserung erfährt.

Anhand eines Beispiels in Abbildung 5-2 wird diese Kennzahl näher dargestellt. Der Prozess P besitzt drei Vorgänger (A, B und C). Diese liefern dem Prozess ein nicht optimales Ergebnis ( $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$ ). Die Vorgängerergebnisse werden in der Eingangslogik des Prozesses P zum Ergebnis  $E_P$  zusammengefasst.

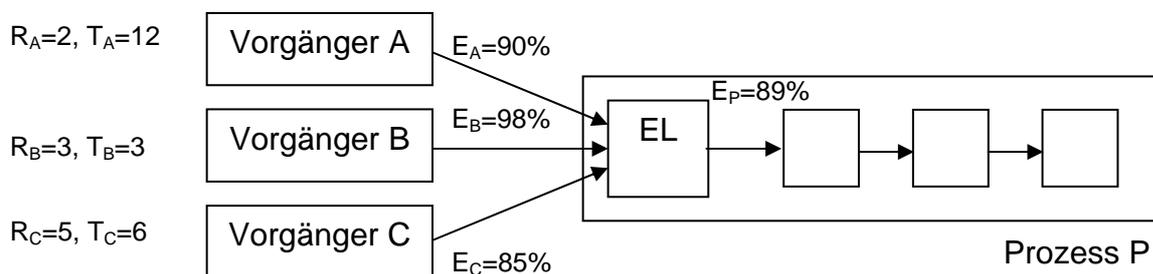


Abbildung 5-2: Beeinflussung des Eingangsergebnisses durch die Vorgänger (Beispiel)

Im ersten Schritt der Ergebnissensitivitätsberechnung wird  $E_A$  auf optimal ( $E_A=100\%$ ) gesetzt,  $E_B$  und  $E_C$  bleiben unverändert. Das Ergebnis in der Eingangslogik vom Prozess P wird als  $E_{AP}$  bezeichnet. Im zweiten Schritt wird  $E_A$  auf sein ursprüngliches Ergebnis zurückgesetzt und  $E_B$  ein optimales Ergebnis gegeben. Daraus folgt im Prozess P das Ergebnis  $E_{BP}$ . Ebenso verhält es sich mit  $E_C$ . Nun kann für jeden Vorgänger eine Ergebnissensitivität anhand der Formel berechnet werden.

*Effektive Ergebnissensitivität durch optimales Ergebnis eines Vorgängers*  
*= neues Ergebnis im Prozess P – ursprüngliches Ergebnis des Prozesses P*

$$\text{Effektive Ergebnissensitivität}(V_i) = E_{V_i,P} - E_P$$

Anhand des Rechenbeispiels ergeben sich die folgenden Ergebnisverbesserungen im Prozess P.

$$E_{AP} = 92\% \quad \text{Ergebnissensitivität}(A) = E_{AP} - E_P = 3\%$$

$$E_{BP} = 90\% \quad \text{Ergebnissensitivität}(B) = E_{BP} - E_P = 1\%$$

$$E_{CP} = 97\% \quad \text{Ergebnissensitivität}(C) = E_{CP} - E_P = 8\%$$

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verbesserung von Vorgänger C die größte Wirkung im Prozess P nach sich zieht.

Die effektive Ergebnissensitivität stellt folglich dar, wie stark die Abweichung eines Vorgängers das Ergebnis des Nachfolgeprozesses beeinflusst. Sie gibt somit an, um wie viel Prozent das Ergebnis eines Prozesses sich verbessern würde, wenn ein bestimmter Vorgängerprozess das optimale Ergebnis erreicht. Diese Information hilft dem Projektleiter zum Einleiten der richtigen und effektiven Maßnahmen.

### **Effiziente Ergebnissensitivität**

Der notwendige Aufwand beim Vorgänger zum Erhalten des optimalen Ergebnisses wird in der effektiven Ergebnissensitivität nicht betrachtet. Zu diesem Zweck wird die **effiziente Ergebnissensitivität** eingeführt. Sie betrachtet den Grad der Verbesserung im Vorgänger und die dadurch erreichte Ergebnisverbesserung in seinem Nachfolgeprozess. Der Projektleiter kann durch diese Größe die Vorgänger identifizieren, in denen mit geringstem Aufwand im Vorgänger die größte Ergebnisverbesserung im Nachfolger erreicht werden kann.

Die effiziente Ergebnissensitivität berechnet sich nun aus dem Quotienten der effektiven Ergebnissensitivität zu einem Vorgänger und dem Aufwand des Vorgängers zur Erreichung des optimalen Ergebnisses.

$$\text{Effiziente Ergebnissensitivität}(V_i) = \frac{\text{Effektive Ergebnissensitivität}(V_i)}{\text{Aufwand}(V_i)}$$

Dazu wird das Beispiel aus Abbildung 5-2 herangezogen. Der Aufwand, den Prozess A zur Erreichung eines optimalen Ergebnisses tätigen muss, beträgt 10% der Ergebnisverbesserung des eigenen Prozesses. Bei Prozess B sind es 2% und bei Prozess C 15%.

Hierzu ein Rechenbeispiel:

$$\text{Aufwand}(A) = 100\% - 90\% = 10\%$$

$$\text{Aufwand}(B) = 100\% - 98\% = 2\%$$

$$\text{Aufwand}(C) = 100\% - 85\% = 15\%$$

$$\text{Effiziente Ergebnissensitivität}(A) = \frac{3\%}{10\%} = 0.33$$

$$\text{Effiziente Ergebnissensitivität}(B) = \frac{1\%}{2\%} = 0.5$$

$$\text{Effiziente Ergebnissensitivität}(C) = \frac{8\%}{15\%} = 0.53$$

Die effiziente Ergebnissensitivität zeigt auf, wie sich der getätigte Aufwand eines Vorgängerprozesses auf das Nachfolgerergebnis auswirkt: Die Verbesserung des Ergebnisses um 10% im Prozess A bewirkt eine 0.3-fache Ergebniskorrektur von 3% im Prozess P. Dieser Faktor kann Richtung Null tendieren, wenn die Verbesserung eines Vorgängers minimale Auswirkung auf den Nachfolger hat.

Soll beispielsweise das Ergebnis von Prozess P um 6% auf 95% verbessert werden, kann der benötigte Aufwand dafür berechnet werden. Die gewünschte Ergebnisverbesserung wird durch die effiziente Ergebnissensitivität des entsprechenden Vorgängers geteilt.

$$\text{Aufwand}(V_i) = \frac{6\%}{\text{Effiziente Ergebnissensitivität}(V_i)}$$

Somit müsste sich Prozess A um 20%, Prozess B um 12% oder Prozess C um 11.3% verbessern. Vorgang C benötigt den geringsten Aufwand, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen. Dieser besitzt die größte effiziente Ergebnissensitivität.

Mit dieser Kenngröße wird der Vorgängerprozess ermittelt, der mit dem geringsten Aufwand die größte Ergebnisverbesserung im eigenen Prozess zur Folge hat.

### **Kosteneffiziente Ergebnissensitivität**

Die im Vorgängerprozess entstehenden Kosten werden in der effizienten Ergebnissensitivität nicht berücksichtigt. Hierzu wird die **kosteneffiziente Ergebnissensitivität** eingeführt. In dieser wird der im Vorgänger getätigte Aufwand zur Ergebnisoptimierung in die dadurch entstandenen Zusatzkosten umgerechnet. Diese Größe ermöglicht dem Projektleiter Prozesse zu finden, bei denen die Erhöhung der Ressourcen die größte Verbesserung für den Nachfolger mit sich bringt.

Aus der Formel für die effiziente Ergebnissensitivität

$$\text{Effiziente Ergebnissensitivität}(V_i) = \frac{\text{Effektive Ergebnissensitivität}(V_i)}{\text{Aufwand}(V_i)}$$

folgt die Formel für die kosteneffiziente Ergebnissensitivität:

$$\text{Kosteneffiziente Ergebnissensitivität}(V_i) = \frac{\text{Effektive Ergebnissensensitivität}(V_i)}{\text{Aufwandskosten im Vorgänger}}$$

Die Zusatzkosten des Vorgängers  $K(V_i)$  errechnen sich aus dem Produkt der benötigten Zusatzressourcen des Vorgängers  $\Delta Re(V_i)$  und der aktuellen Bearbeitungszeit  $T(V_i)$  des Prozesses.

$$K(V_i) = \Delta Re(V_i) * T(V_i)$$

Die benötigten Zusatzressourcen lassen sich aus den bisherigen Ressourcen  $Re(V_i)$  und dem Faktor der möglichen Verbesserung des Ergebnisses im Vorgänger berechnen. Dabei wird eine lineare Abhängigkeit angenommen.

$$\Delta Re(V_i) = Re(V_i) * \left( \frac{E_{opt}(V_i)}{E(V_i)} - 1 \right), \text{ wobei: } E_{opt}: \text{optimales und } E: \text{erreichtes Ergebnis}$$

Daraus ergibt sich die vollständige Formel für:

$$\text{Kosteneffiziente Ergebnissensitivität}(V_i) = \frac{\text{Effektive Ergebnissensitivität}(V_i)}{\text{Re}(V_i) * \left( \frac{E_{opt}(V_i)}{E(V_i)} - 1 \right) * T(V_i)}$$

$$= \left[ \frac{\text{Ergebnisverbesserung des Prozesses}}{\text{zusätzlich benötigte Ressourcen im Vorgänger}} \right]$$

Anhand Abbildung 5-2 wird die Formel der kosteneffizienten Ergebnissensitivität im Folgenden näher erläutert.

$E_{A/B/C}$  sind die Originalergebnisse der Vorgänger,  $E_P$  das resultierende Ergebnis im Prozess P. Weiterhin werden die prozessspezifischen Größen  $Re_{A/B/C}$  und  $T_{A/B/C}$  berücksichtigt. Dabei sind  $Re_{A/B/C}$  die bisher eingesetzten Ressourcen der Vorgänger und  $T_{A/B/C}$  die aktuelle Bearbeitungszeit der Vorgänger. Die effektiven Ergebnissensitivitäten sind bereits ermittelt.

Die kosteneffiziente Ergebnissensitivität wird nun für jeden Vorgänger berechnet.

$$\text{Kosteneffiziente Ergebnissensitivität}(A) = \frac{3\%}{2 * \left( \frac{100}{90} - 1 \right) * 12} = \frac{3\%}{2.66} = 1.1\%$$

$$\text{Kosteneffiziente Ergebnissensitivität}(B) = \frac{1\%}{3 * \left( \frac{100}{98} - 1 \right) * 3} = \frac{1\%}{0.18} = 5.4\%$$

$$\text{Kosteneffiziente Ergebnissensitivität}(C) = \frac{8\%}{5 * \left( \frac{100}{85} - 1 \right) * 6} = \frac{8\%}{5.29} = 1.5\%$$

Die kosteneffiziente Ergebnissensitivität zeigt auf, wie sich der Mehraufwand von Zusatzressourcen eines Vorgängerprozesses auf das eigene Ergebnis auswirkt. Prozess C könnte mit seinem optimalen Prozessabschluss den Vorgang P um 8% verbessern. Für das Erreichen seines optimalen Ergebnisses müsste Prozess C 5.29 Zusatzressourcen investieren. Mit einer weiteren Ressource würde der Prozess C eine 1.5-prozentige Verbesserung im Eingangsergebnis des Prozesses P bewirken.

Im Vergleich dazu kann der Prozess B mit einer weiteren Ressource den Prozess P um 5.4% verbessern.

Diese (beispielhaften) Resultate decken sich nicht mit den Erkenntnissen aus der effizienten Ergebnissensitivität. Denn dort wurde Prozess C als optimaler Stellhebel für Prozess P berechnet. Das ist aber kein Widerspruch, da die Ergebnisverbesserung im Prozess C mehr Zusatzressourcen benötigt als die Verbesserung in B. Die Kosten betrachtend wäre es also sinnvoller, in Prozess B zu investieren.

Aus theoretischer Sicht könnte Prozess B diese Verbesserung mit einer zusätzlichen Ressource bewerkstelligen. Aus praktischer Sicht reichen weitere 0.18 zusätzliche Mittel aus, um das optimale Ergebnis in Prozess B zu erreichen. Jede weitere Investition in Prozess B wäre daher ohne Nutzen. Zur weiteren Ergebnisverbesserung im Prozess P müssen im nächstgünstigsten Prozess (also Prozess C) Zusatzressourcen eingesetzt werden.

Die drei eingeführten Ergebnissensitivitäten bilden unterschiedliche Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Prozessen ab. Mit der effektiven Ergebnissensitivität werden die Vorgänger ermittelt, die den größten Einfluss haben, dass der Prozess sein Ergebnis nicht erreicht. Die effiziente Ergebnissensitivität stellt dar, welcher Prozess sein Ergebnis prozentual am geringsten verbessern muss, um beim Nachfolger die höchste Ergebnisverbesserung zu erreichen. Die kosteneffiziente Ergebnissensitivität zeigt, was der Einsatz einer zusätzlichen Ressource beim Vorgänger für positive Effekte im Nachfolgerergebnis bewirkt.

### 5.2.7 Aktive und passive Prozesse

Die Kategorisierung von Prozessen als **aktiv** und **passiv** wird von Vester im Zusammenhang mit der Sensitivitätsanalyse vorgeschlagen [104]. Ein Prozess wird als aktiv bezeichnet, wenn seine Aktivsumme stärker als seine Passivsumme ist. Sie wird als passiv charakterisiert, wenn die Passivsumme überwiegt (vgl. Abschnitt 2.3.2.). Dies beruht bei Vester auf eine grobe und qualitative Analyse. Durch die eingeführten Ergebnissensitivitäten können nun die Abhängigkeiten viel präziser ermittelt und quantifiziert werden. Die Berechnung der Summen wird anhand der

bereits eingeführten effektiven Ergebnissensitivität vorgenommen, welche in Abbildung 5-3 dargestellt ist.

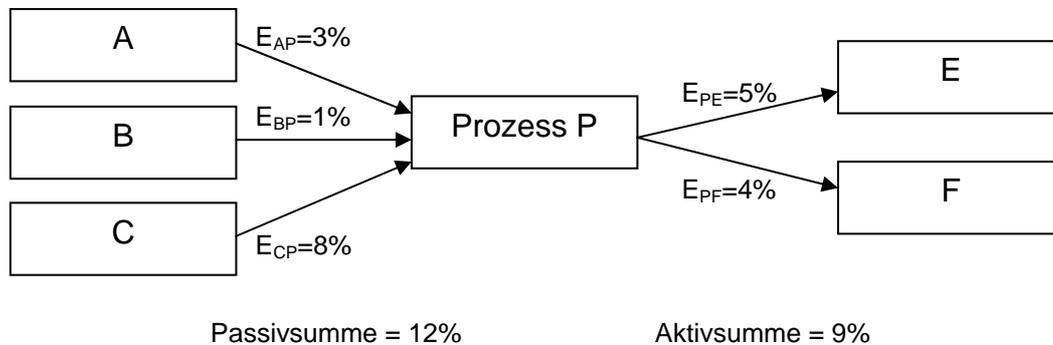


Abbildung 5-3: Berechnung von Aktiv- und Passivsumme

Die Prozesse A, B und C sind Vorgänger von P. Prozesse E und F bilden die direkten Nachfolger. Die Passivsumme setzt sich aus der Summe der effektiven Ergebnissensitivitäten aller Vorgänger von P zusammen. Die Aktivsumme wird aus den effektiven Ergebnissensitivitäten gebildet, die für die Nachfolgeprozesse berechnet worden sind.

In Abbildung 5-3 ist zu sehen, dass die Passivsumme die Aktivsumme überwiegt. Das bedeutet, dass Prozess P als passiv eingestuft wird. Er wird mehr von seinen Vorgängern beherrscht, als dass er seine Nachfolger beeinflusst.

Mit den Aktiv- und Passivsummen kann dem Projektleiter gezeigt werden, welche Prozesse einen starken Einfluss auf Nachfolger haben (aktiv) und welche von einer Verbesserung der Vorgänger profitieren bzw. von einer Verschlechterung der Vorgänger am meisten betroffen sind (passiv).

Die vorausgegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass die neu eingeführten Kenngrößen ein wichtiges Vergleichsmerkmal unter den Prozessen darstellen. Diese Kenngrößen werden als Zufallsvariablen berechnet, weil Risiko und Chance durch Zufallsvariablen beschrieben werden. Als Ergebnis der Simulation werden Stichproben ermittelt, die in Mittelwert, Streuung bzw. Vertrauensbereich dargestellt werden können.

Eine Übersicht der Kenngrößen im Projektverbund liefert ein globales Merkmal des Projektstandes. Wie der nächste Abschnitt zeigen wird, kann durch eine globale Betrachtung der Kennzahlen neue, wichtige Erkenntnisse über die aktuelle Projektsituation gewonnen werden.

### 5.3 Definition neuer Projektpfade

Durch Verwendung unabhängiger Replikationen, der Einführung der Stochastik in die Modellierung, die Verfolgung der Ergebnisse im Projektverbund und die neu eingeführten Kenngrößen in der Modellierung muss die Ermittlung von kritischen Pfaden neu überdacht werden. Zum Einen existieren durch die eingeführte Stochastik kritische Pfade im klassischen Fall nicht mehr. Zum Anderen erlauben die eingeführten Kenngrößen neue Pfade zu entwickeln. Diese beinhalten eine neue Aussagekraft, liefern zusätzliche Erkenntnisse und erhöhen das Verständnis für komplexe Projekte. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Definition eines kritischen Pfades überarbeitet und es werden neue Projektpfade eingeführt.

#### 5.3.1 Definition eines stochastischen, kritischen Pfades

Durch Berücksichtigung der stochastischen Modellierung und der damit verbundenen Verwendung von Zufallszahlen müssen unabhängige Replikationen durchgeführt werden, um ein aussagekräftiges Bild über die aktuelle Projektsituation zu erhalten.

Bei einer Replikation wird je Prozess eine Stichprobe aus Risiko und Chance ermittelt, aus denen sich ein kritischer Pfad ergeben kann. In diesem Fall wird der kritische Pfad als eine zusammenhängende Prozesskette definiert, die von Projektstart bis Projektende keinen Puffer enthält.

Da Risiko und Chance als Zufallsvariablen definiert wurden, folgt daraus, dass es bei mehreren Replikationen auch mehrere kritische Pfade geben kann. Die gleiche zusammenhängende Prozesskette wird dadurch nicht bei allen Replikationen als kritischer Pfad ermittelt. Die kritischen Pfade können pro Replikation durch verschiedene Prozessketten dargestellt werden. Somit ist ein kritischer Pfad selbst wieder verteilt, da er sich aus einem Geflecht von Prozessketten zusammensetzt.

Ein **stochastischer, kritischer Pfad** ist die Prozesskette, deren Prozesse mit der höchsten Wahrscheinlichkeit kritisch sind und heißt „Pfad mit der höchsten Wahrscheinlichkeit, kritisch zu sein“. Eine Prozessverzögerung auf diesem Pfad hat die höchste Wahrscheinlichkeit, die Projektlaufzeit oder das -ergebnis negativ zu beeinflussen. Sie wird berechnet, indem die Replikationen pro Prozess im Verhältnis zur allen Replikationen auf dem kritischen Pfad zusammengezählt werden.

Anschließend wird von Projektstart bis -ende eine Prozesskette gesucht, die an maximalen Simulationsläufen auf dem kritischen Pfad liegt.

Bisher wurde nur der Zeitpuffer zwischen Prozessen betrachtet, um einen kritischen Pfad zu berechnen. Wie in den Abschnitten 4.5 und 5.2 gezeigt wurde, ist es möglich andere Prozesseigenschaften zu definieren, die ebenso als „Puffer“ angesehen werden können. Der Begriff vom kritischen Pfad wird erweitert. Analog zum Zeitpuffer können auch kritische Pfade von folgenden Größen ermittelt werden:

- Zeitpuffer,
- Restchance,
- Restchance und Restzusatzressourcen,
- Restchance und Restzusatzressourcen und Zeitpuffer.

Durch diese Erweiterung des kritischen Pfades besteht nun die Möglichkeit, dass immer ein kleiner Puffer (Restchance, Restzusatzressourcen bzw. Restzeit) in einer Prozesskette existiert und somit in keiner Replikation ein kritischer Pfad gefunden werden kann. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt eine neue Pfaddefinition eingeführt.

### 5.3.2 Definition eines stochastischen, minimal elastischen Pfades

Der **stochastische, minimal elastische Pfad** stellt eine Prozesskette von Projektstart bis Projektende dar, auf dem die Summe eine der folgenden Kenngrößen (Restchance, Restzusatzressourcen, Restzeit oder deren Kombination) im gesamten Projekt über alle Replikationen minimal ist. Er ist somit der Pfad mit der höchsten Wahrscheinlichkeit, kritisch in Bezug auf diese Kenngrößen zu werden. Er wird berechnet, indem über alle Replikationen die Mittelwerte und die Konfidenzintervalle der Prozesse bestimmt werden. Anschließend wird von Projektstart bis Projektende nach einer Prozesskette gesucht, in der der kumulierte Mittelwert über alle Prozesse am kleinsten ist. Sollten zwei Prozessketten fast gleiche Mittelwerte haben, wird diejenige gewählt, die die geringere Konfidenzbreite besitzt.

Minimal elastisch bedeutet, dass dieser Pfad das geringste Potenzial zur Abpufferung von Abweichungen durch Chance, Zusatzressourcen, Zeitpuffer oder deren Kombination hat. Im Gegensatz zum kritischen Pfad haben Abweichungen auf dem minimal elastischen Pfad nicht zwingend Auswirkungen auf die Termin- und

Ergebniserreichung des Gesamtprojektes. Prozesse auf minimal elastischem Pfad sind Abweichungen gegenüber geringfügig elastisch.

Die folgenden drei Pfade bauen sukzessive aufeinander auf und stellen eine zunehmende Restriktion dar. Sie können alle als stochastischer, kritischer oder als stochastischer, minimal elastischer Pfad berechnet werden.

### 5.3.3 Restchancenpfad

Bei einer Replikation beschreibt ein kritischer **Restchancenpfad** eine Prozesskette, indem alle Chancen der enthaltenen Prozesse aufgebraucht sind. In dieser Prozesskette sind keine kostenneutralen Verbesserungsmöglichkeiten mehr vorhanden. Kommt es zu weiteren Abweichungen, wirken sich diese direkt auf das Projektende aus. Nur durch kostenverursachende Verbesserungsmöglichkeiten kann hier entgegengewirkt werden. Ein kritischer Restchancenpfad ist somit eine „kostenneutral starre“ und „kostenintensiv elastische“ Prozesskette.

Wird in einem Simulationslauf kein kritischer Restchancenpfad ermittelt, so ist mindestens ein minimal elastischer Restchancenpfad vorhanden. Einerseits besitzt dieser Pfad die Möglichkeit, geringfügige Abweichungen kosten- und zeitneutral abpuffern zu können, andererseits hat er die höchste Wahrscheinlichkeit, durch diese Abpufferung kritisch in Bezug auf die Restchance zu werden.

Nach  $n$  Replikationen lassen sich die Potenziale auf einem kritischen Restchancenpfad folgendermaßen zusammenfassen:

Die Vorgänge auf dieser Prozesskette besitzen die höchste Wahrscheinlichkeit,

- kein Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Chance (kostenneutral) zu haben.

Sie besitzen weiterhin

- Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Zusatzressourcen (kostenintensiv),
- Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Zeitpuffer (kostenintensiv),
- Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Projektlaufzeitverlängerung (kostenintensiv),
- Potenzial zur Abpufferung von Zeitverschiebungen durch Zusatzressourcen (kostenintensiv),
- Potenzial zur Abpufferung von Zeitverschiebungen durch Zeitpuffer (kostenintensiv).

### 5.3.4 Restchance-Restzusatzressourcenpfad

Wenn in einer Prozesskette alle Chancen und alle Zusatzressourcen aufgebraucht sind, existiert ein kritischer **Restchancen-Restzusatzressourcenpfad**. Das bedeutet, dass es in dieser Prozesskette keine kostenneutralen und keine zeitneutralen Verbesserungsmöglichkeiten mehr gibt. Kommt es zu weiteren Abweichungen, so wirken sich diese direkt auf das Projektende aus. Diesen Abweichungen kann nur durch kostenverursachende Verbesserungsmöglichkeiten entgegengewirkt werden. Ein solcher kritischer Pfad ist somit eine kostenneutral starre und kostenintensiv minimal elastische Prozesskette.

Existiert in einer Replikation kein kritischer Pfad, so gibt es mindestens einen Pfad durch das Projekt, in dem das vorhandene Chancen- und Zusatzressourcenpotenzial von Null verschieden ist. Auch in diesem Fall kann ein minimal elastischer Pfad bestimmt werden. Diese Prozesse können geringe Abweichungen zwar zeitneutral abpuffern, besitzen aber die höchste Wahrscheinlichkeit kritisch zu werden.

Nach  $n$  Replikationen lassen sich die Potenziale der Prozesse auf einem kritischen Restchance-Restzusatzressourcenpfad folgendermaßen zusammenfassen:

Die Vorgänge auf diese Prozesskette besitzen die größte Wahrscheinlichkeit,

- kein Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Chance (kostenneutral),
- kein Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Zusatzressourcen (kostenintensiv),
- kein Potenzial zur Abpufferung von Zeitverschiebungen durch Zusatzressourcen (kostenintensiv) zu haben.

Sie besitzen weiterhin

- Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Zeitpuffer (kostenintensiv),
- Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Projektlaufzeitverlängerung (kostenintensiv),
- Potenzial zur Abpufferung von Zeitverschiebungen durch Zeitpuffer (kostenintensiv).

### 5.3.5 Restchance-Restzusatzressourcen-Restzeitpfad

Nun wird die Restzeit, d.h. der Zeitpuffer zwischen Prozessen, betrachtet. Eine Prozesskette in der keine kostenneutralen, keine zeitneutralen und auch keine kostenintensiven Verbesserungspotenziale mehr vorhanden sind, wird kritischer **Restchance-Restzusatzressourcen-Restzeitpfad** genannt. Auftretende Abweichungen wirken sich direkt auf das Projektende aus und können durch kein Verbesserungspotenzial abgefangen werden. Bestehen die Abweichungen aus mangelhafter Ergebniserreichung, so kann diese nur durch Verschiebung des Projektendtermins auf einen späteren Abschlusszeitpunkt verbessert werden.

Existiert in einer Replikation kein kritischer Pfad, so beschreibt auch hier der minimal elastische Pfad die Prozesskette mit der höchsten Wahrscheinlichkeit, kritisch in Bezug auf Restchance, Restzusatzressourcen und Restzeit zu werden. Bereits geringe Abweichungen können den vorhandenen Puffer aus diesen drei Größen aufbrauchen und somit das Projektende beeinflussen.

Nach n Replikationen lassen sich auch hierfür die Potenziale der Prozesse auf einem kritischen Restchance-Restzusatzressourcen-Restzeitpfad folgendermaßen zusammenfassen:

Diese Prozesse besitzen die höchste Wahrscheinlichkeit,

- kein Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Chance (kostenneutral),
- kein Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Zusatzressourcen (kostenintensiv),
- kein Potenzial zur Abpufferung von Zeitverschiebungen durch Zusatzressourcen (kostenintensiv),
- kein Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Zeitpuffer (kostenintensiv),
- kein Potenzial zur Abpufferung von Zeitverschiebungen durch Zeitpuffer (kostenintensiv) zu haben

Sie besitzen lediglich noch

- Potenzial zur Ergebnisverbesserung durch Projektlaufzeitverlängerung (kostenintensiv).

Es wurden stochastische, kritische bzw. stochastische, minimal elastische Pfade vorgestellt, die sich auf Puffergrößen bezogen haben. Im weiteren Verlauf werden basierend auf den neuen Kennzahlen von Kapitel 4.5 und 5.2 zusätzliche Pfade

identifiziert, die in komplexen Projekten dem Projektleiter wichtige Entscheidungsunterstützung bieten.

### 5.3.6 Sicherer Pfad bzw. unsicherer Pfad

Ein **sicherer Pfad** beschreibt eine Prozesskette, indem die Kombination der Prozessgrößen Chance, Zusatzressourcen und Zeitpuffer maximal und das prozess-eigene Risiko minimal ist. Diese zusammenhängenden Prozesse besitzen viel Verbesserungspotenzial, um eventuelle Abweichungen abpuffern zu können. Prozesse auf diesem Pfad besitzen eine hohe Wahrscheinlichkeit, das Projektergebnis nicht zu gefährden und kleine Abweichungen abzufangen.

Die Kombination der Größen ist durch die Umrechnung in prozentuale Ergebniswerte möglich. Diese Ergebniswerte geben an, um wie viel sich das Prozessergebnis verbessert bzw. verschlechtert, wenn die betreffende Größe angewendet wird. Die Formel zur Bestimmung der Suchgröße für den sicheren Pfad setzt sich folgendermaßen zusammen (alle Größen sind auf prozentuale Ergebniswerte umgerechnet):

$$\text{Sicherheit im Prozess} = \text{Chance} + \text{Zusatzressourcen} + \text{Zeitpuffer} - \text{Risiko}$$

Die Kennzahl **Sicherheit im Prozess** gibt an, um wie viel Prozent sich das Ergebnis verändert, wenn die Chance voll genutzt wird, das Risiko eintritt, alle Zusatzressourcen eingesetzt und der Zeitpuffer verwendet werden. Eine Sicherheit im Prozess ist dann vorhanden, wenn das Ergebnis positiv ausfällt. Diese Kennzahl wird in jeder Replikation für alle Prozesse ermittelt. Anschließend wird eine Prozesskette vom Projektstart bis zum Projektende gesucht, bei der der Mittelwert dieser Kenngröße aus n Replikationen maximal ist. Sollten zwei Prozessketten fast gleiche Mittelwerte haben, wird diejenige gewählt, die die geringere Konfidenzbreite besitzt.

Ein **unsicherer Pfad** besteht aus Prozessen, die ein äußerst geringes Verbesserungspotenzial besitzen, um eventuelle Abweichungen abpuffern zu können. Bei ihm sind die Kombination aus geringer Chance, wenigen Zusatzressourcen, kleinen Zeitpuffern und hohem Risiko minimal. Die Prozesse dieses Pfades besitzen die größte Wahrscheinlichkeit, kritisch zu werden und damit das Projektergebnis negativ zu beeinflussen.

Die Formel zur Bestimmung einer Suchgröße für den unsicheren Pfad setzt sich analog der Formel für die Sicherheit im Prozess zusammen. Es besteht nur der Unterschied, dass nicht nach einem maximalen sondern nach einem minimalen Wert gesucht wird. Eine Unsicherheit im Prozess ist erst dann vorhanden, wenn das Ergebnis negativ ausfällt. In diesem Fall wird in der Pfadbestimmung nach dem minimalen Mittelwert gesucht. Sollten zwei Prozessketten fast gleiche Mittelwerte haben, wird auch hier diejenige gewählt, die die geringere Konfidenzbreite besitzt.

### 5.3.7 Maximaler Druckpfad

Ein **maximaler Druckpfad** existiert in einem Projekt nur dann, wenn es eine Prozesskette von Projektstart bis Projektende gibt, bei der in jedem Prozess Druck herrscht ( $p > 1$ ). Das sind alle Prozesse, bei denen der Druck größer als eins ist. Auch in diesem Fall wird über alle Replikationen der Mittelwert und das Konfidenzintervall der Kennzahl Druck pro Prozess ermittelt. Der maximale Druckpfad kennzeichnet den Pfad, in dem der kumulierte Druck der Einzelprozesse (die Mittelwerte) maximal ist und die Konfidenzbreite (bei fast gleichen Mittelwerten) minimal ist.

Prozesse, in denen Druck herrscht, können ohne Zugabe von Verbesserungspotenzial die Abweichungen von Vorgängern nicht abpuffern und verfehlen mit hoher Wahrscheinlichkeit ihr Ergebnis bzw. überziehen die geplante Prozesslaufzeit. Somit geben Prozesse in einem maximalen Druckpfad selber starke Abweichungen an ihre Nachfolger weiter und gefährden damit stark das Projektziel. Der maximale Druckpfad ist die Prozesskette mit der höchsten Wahrscheinlichkeit, überlastete und somit verbesserungsbedürftige Prozesse zu enthalten.

Er ist ein wichtiger Indikator für den Projektleiter, da die Prozesse gezeigt werden, die eine hohe Belastung erfahren und das Projektziel direkt negativ beeinflussen können. Es muss versucht werden, diese Prozesse zu verbessern, indem diesen mehr Zusatzressourcen zugeteilt bzw. durch die definierten Ergebnissensitivitäten effektive und kosteneffiziente Maßnahmen abgeleitet werden.

### 5.3.8 Effektiver, effizienter und kosteneffizienter Ergebnissensitivitätspfad

Durch die Ergebnissensitivitätspfade wird eine Folge von Prozessen von Projektende bis Projektstart beschrieben, deren effektive, effiziente und kosteneffiziente Ergebnissensitivität maximal ist.

Der **effektive Ergebnissensitivitätspfad** beschreibt eine Prozesskette, durch die das Projektergebnis am stärksten verbessert werden kann. Der **effiziente Ergebnissensitivitätspfad** enthält Prozesse, die mit minimaler Verbesserung des eigenen Prozesses die beste Ergebnisverbesserung der Nachfolger erhalten. Der **kosteneffiziente Ergebnissensitivitätspfad** besteht aus Prozessen, die mit kostengünstigsten Investitionen im eigenen Prozess das Nachfolgerergebnis am Positivsten beeinflussen.

Der Anwender wird mit den erhaltenen Informationen über die Herkunft und Entwicklung von Ergebnisabweichungen in die Lage gesetzt, potenzielle Stellhebel zur Verbesserung der Ergebnisse zu erkennen und geeignete Maßnahmen zu definieren.

Zum besseren Verständnis der in diesem Abschnitt neu eingeführten Pfade wird deren Ermittlung detaillierter erläutert. Pro Replikation werden die in Abschnitt 5.2.6 hergeleiteten effektiven, effizienten bzw. kosteneffizienten Ergebnissensitivitäten berechnet. Anhand des effektiven Ergebnissensitivitätspfades wird die Pfadermittlung näher beschrieben. Die Berechnung der Pfade für effiziente und kosteneffiziente Ergebnissensitivitäten ist äquivalent.

Bei der klassischen Ermittlung von zeitkritischen Pfaden wird der Weg durch einen Prozessverbund gesucht, der die höchste Zeitdauer durch den Gesamtnetzplan bestimmt. Analog dazu kann eine Prozesskette ermittelt werden, auf dem die stärkste Ergebnisabweichung verursacht wird. Für die Berechnung dieser Pfade wird für jede Vorgängerverbindung (Kante im Projektplan) das mögliche Ergebnis unter positiveren Vorgaben des Vorgängerprozesses betrachtet (vgl. Abschnitt 5.2.6). Die Kantenbewertung erfolgt während eines Simulationslaufes. Nachdem die Eingangslogik eines Prozesses die Vorgaben verarbeitet hat, werden die Kantenbewertungen ermittelt. Dafür wird das Ergebnis des jeweiligen Vorgängers auf sein optimales Ergebnis geändert. Anschließend erfolgt eine neue Berechnung des Ergebnisses des Nachfolgers. Für jeden Simulationslauf wird jede Kante als „auf dem Pfad liegend“ (1) oder „nicht auf dem Pfad liegend“ (0) bewertet. Wird von

einem Vorgängerprozess bereits ein optimales Ergebnis vorgegeben, so wird die Kante automatisch mit 0 bewertet. Die Kante mit der höchsten Ergebnisverbesserung im Nachfolger erhält die Bewertung 1. Um den Pfad zu ermitteln, wird entlang der Kantenverbindungen zu den Vorgängern des gewählten Prozesses sowie den Vorvorgängern usw. der Weg des Ergebnispfades gesucht. Es wird immer nur der Weg über die Kante aufgenommen, der als Element des Pfades identifiziert wurde. So entsteht ein Pfad, der die Herkunft der Zielabweichung beschreibt. Wird auf diesem Weg keine weitere Kante mit der Bewertung 1 gefunden, so ist der aktuelle Pfad beendet (vgl. Abbildung 5-5). Diese Vorgehensweise erfolgt für jede Replikation.

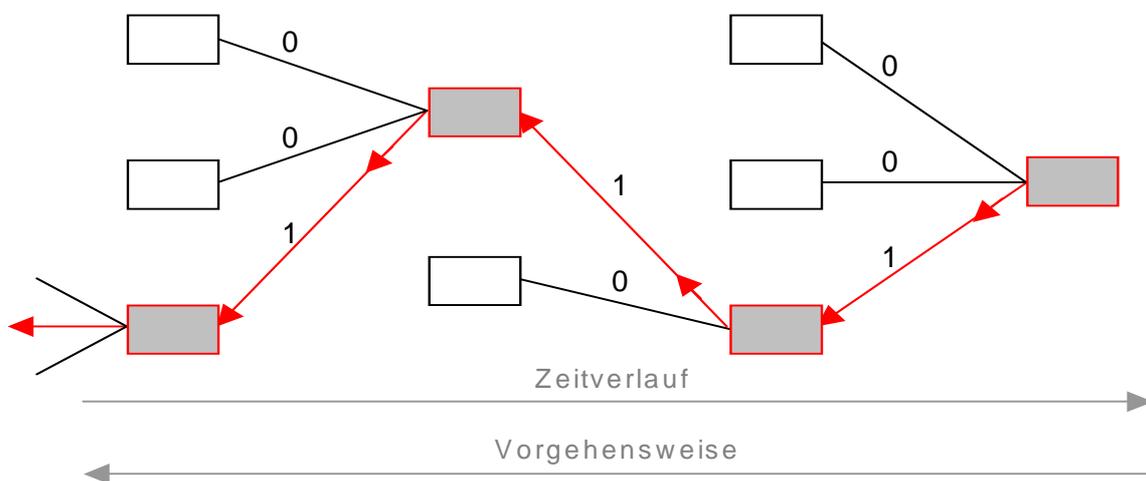


Abbildung 5-4: Ermittlung eines Ergebnissensitivitätspfades in einer Replikation

Es wird abschließend ermittelt, wie oft über alle Replikationen eine einzelne Verbindung ein Element des gesuchten Pfades war. Somit entsteht letztendlich nicht nur ein einzelner Weg durch die Prozesslandschaft, der die Herkunft der Abweichung zeigt. Statt dessen wird eine baumartige Struktur erzeugt, indem die Stärke der Verbindung das Ausmaß des kritischen Pfades angibt. Es kann durch die Breite der einzelnen Pfadverästelungen dargestellt werden, wie oft die entsprechende Kante auf dem kritischen Pfad liegt, d.h. es entsteht eine zusätzliche Bewertung der Kanten untereinander.

Die hervorgehobenen Prozesse in Abbildung 5-5 liegen auf dem effektiven Ergebnissensitivitätspfad und besitzen die höchste Wahrscheinlichkeit, den stärksten Einfluss auf das Ergebnis im Prozess I auszuüben.

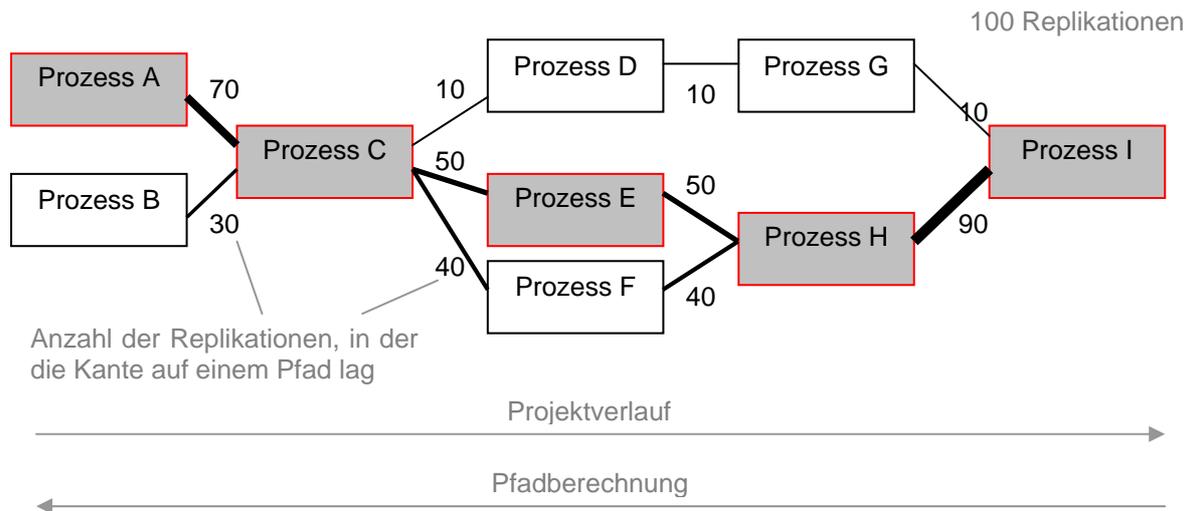


Abbildung 5-5: Schematische Darstellung eines effektiven Ergebnissensitivitätspfades

Es wurden mehrere Möglichkeiten vorgestellt, um kritische Pfade bzw. minimal elastische Pfade zu berechnen. Dabei hat jeder Pfad eine eigene Aussagekraft für den Projektleiter. Die verschiedenen Pfade ermöglichen den Anwendern, potentielle Gefahren sichtbar zu machen, die Herkunft von Abweichungen zu analysieren, deren Gründe zu untersuchen und Elemente im Projektnetzwerk als mögliche Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Diese Indikatoren bieten eine gute Entscheidungsgrundlage, um Maßnahmen zu definieren und mit Hilfe der Simulationsfunktion ihre Wirkung zu testen.

## 5.4 Definition neuer Projektlisten

In Projektlisten sind alle Prozesse nach verschiedenen Attributen sortiert. Im Folgenden werden einige ausgewählte Projektlisten vorgestellt.

### Höchster Druck-Liste

In der **Höchster Druck-Liste** werden die Prozesse absteigend nach dem höchsten Druck sortiert ausgegeben.

Prozesse, die zwar durch einen hohen Druck gekennzeichnet sind, aber nicht auf dem maximalen Druckpfad liegen, haben einen geringen direkten Einfluss auf das Projektziel. Trotzdem ist es wichtig, den Druck in diesen Prozessen zu senken. Ein hoher Druck bedeutet eine interne Abweichung und bewirkt in den meisten Fällen eine Verschlechterung des Ergebnisses bzw. eine Verzögerung in den Folge-

prozessen. Er erhöht dadurch den Einsatz von (kostenintensivem) Verbesserungspotenzial in den Folgeprozessen. Wenn ein Prozess auf einem maximalen Druckpfad liegt und gleichzeitig in der Liste mit dem höchsten Druck ganz oben vorkommt, ist er ein Indikator für einen starken negativen Einfluss auf die Projektziele.

### **Restrisiko-Liste**

In der **Restrisiko-Liste** werden alle betroffenen Prozesse nach dem Grad der Differenz zwischen Risiko und Chance absteigend sortiert ausgegeben. Diese Liste ermöglicht einen Vergleich über die internen Abweichungen aller Prozesse, die ihr Ergebnis ohne kostenintensivem Verbesserungspotenzial nicht erreichen können. Wenn gleichzeitig diese Prozesse auf dem unsicheren Pfad liegen, bedeutet es, dass sie sehr kritisch sind. Sie haben zum Einen keine interne Möglichkeit, das Prozessergebnis zu erreichen. Zum Anderen sind sie Teil einer Prozesskette, deren Potenzial minimal ist, Abweichungen abzupuffern.

### **Sichere Prozesse-Liste**

Sichere Prozesse stellen durch ihr hohes Verbesserungspotenzial die idealen Stellhebel dar. Da nicht alle sicheren Prozesse automatisch auf dem sicheren Pfad liegen müssen, werden diese der vorhandenen Sicherheit nach absteigend in der **Sichere Prozesse-Liste** aufgeführt. Diese Liste ist in Kombination mit den Ergebnissensitivitäten hilfreich. Der Projektleiter erkennt über die Ergebnissensitivitäten, welche Prozesse kostengünstige und effektive Verbesserungen im Nachfolgeprozess hervor bringen können. Wenn diese Prozesse gleichzeitig in der Sichere Prozesse-Liste enthalten sind, erhält der Projektleiter optimale Prozesse, die die größte positive Ergebniswirkung ausüben und ausreichend Verbesserungspotenzial besitzen.

### **Aktive und Passive Prozesse-Liste**

In der **Aktive Prozesse-Liste** werden alle aktiven Prozesse nach dem Wert ihrer Aktivsumme fallend sortiert ausgegeben. Sie lässt Prozesse erkennen, die ihren Nachfolger am stärksten negativ beeinflussen und somit ein Potenzial darstellen, die Nachfolgergebnisse zu verbessern.

In der **Passive Prozesse-Liste** werden alle passiven Prozesse nach dem Wert ihrer Passivsumme fallend sortiert dargestellt. Diese Liste ermöglicht die

Identifizierung derjenigen Prozesse, die von den Abweichungen der Vorgänger am stärksten beeinflusst werden und somit durch eine Verbesserung ihrer Vorgänger profitieren können.

Anhand der aufgeführten Kenngrößen wird verdeutlicht, dass nur durch ein geeignetes Kennzahlensystem eine optimale Steuerung des Projektes möglich ist. Der Projektleiter hat durch die eingeführten Kennzahlen, Projektpfade und Prozesslisten ein Set an Indikatoren, um ein großes Projekt aktiv zu steuern. Mit der Entwicklung des stochastischen Risikomodells ist ein entscheidender Schritt getan, um das dynamische und stochastische Projektgeschehen in einem Modell abzubilden und mit geeigneten Kenngrößen Abweichungen zu verfolgen. Die wichtigen Projektgrößen wie Ergebnis, Termin und Ressourcen wurden um viele weitere relevante Kennzahlen erweitert. Die neuen Kenngrößen dienen der Identifikation von Abweichungen und der Findung von optimalen Entscheidungen. Diese personal- und projektbezogenen Kennzahlen erfüllen die von Burghardt aufgestellten Kriterien (vgl. Abschnitt 2.2). Sie sind quantifizierbar, erhebbar, vergleichbar, relevant und aktuell. Sie bilden harte und weiche Kennzahlen ab. Einige sind einfach erhebbar (z.B. benötigte Ressourcen, gewünschtes Ergebnis) und bei anderen wiederum ist die Datenerhebung aufwendig (z.B. Druck oder Ergebnissensitivität).

### **5.5 Zusammenfassung der Neuerungen der stochastischen Risikomodellierung**

Es wurden die Grundlagen und die Funktionsweise des stochastischen Risikomodells detailliert herausgearbeitet. Durch das Abbilden von Prozessen mit Black Boxes können komplizierte Abhängigkeiten und die Dynamik von komplexen Projekten bei der Modellierung berücksichtigt werden.

Die Funktion der Black Box Methode wurde auf vier verschiedene Logiken erweitert, die ein dynamisches, stochastisches, mathematisches, aber auch ein qualitatives Verhalten abbilden können. Das Modell ist so aufgebaut, dass durch Anwendung von Funktionslogik und Fuzzy Logik sowohl lineare direkte als auch unscharfe Abhängigkeiten der Prozessergebnisse darstellbar sind. Beim Aufbau des Projektverbundes fließt so der Einfluss der Prozessergebnisse jeweils zwischen den einzelnen Vorgängen mit in die Betrachtung ein. Bei der Modellierung wird das

erzeugte Ergebnis pro Prozess und dessen Wirkung auf den Nachfolger bewertet. Dadurch ist es möglich, die Ergebnissensitivitäten von Prozessen auf ihre Nachfolger zu bestimmen. Dafür wurden Kenngrößen erarbeitet, die für jeden Vorgang die effektiven, effizienten und kosteneffizienten Einflussfaktoren sichtbar machen. Die Eigendynamik eines Projektes ist in der Black Box durch Berücksichtigen von stochastischen Größen wie Chance und Risiko dargestellt. Somit können prozessspezifische Abweichungen nach unten bzw. nach oben abgebildet werden. Durch Einführen der Größe Chance wird die interne Flexibilität des Prozesses abgebildet, die durch das Modell automatisch berücksichtigt wird. Abgeleitet aus den wichtigen Kennzahlen Chance und Risiko wurden neue sensible Kenngrößen wie Unsicherheit, Sicherheit bzw. Restchance in der Modellierung erzeugt. Diese stellen gute Indikatoren dar, damit der Projektleiter die interne Flexibilität und das Gefährdungspotenzial der Prozesse einordnen kann.

Um die Dynamik in Projekten insgesamt abbilden zu können, wurde das Verbesserungspotenzial je Prozess eingeführt. Das Modell berücksichtigt damit die von den eingesetzten Ressourcen abhängige Prozessbearbeitungszeit. Die Entscheidung, wie elastisch die Bearbeitungszeit ist und wie viel qualifizierte Ressourcen mobilisiert werden können, obliegt dem Prozessverantwortlichen. Das Modellieren von möglichen Zusatzressourcen je Prozess liefert dem Projektleiter eine Einschätzung seines Potenzials, um eine Ergebnisabweichung wettzumachen bzw. eine Verspätung aufzuholen. Es gibt ihm die Möglichkeit, kostenwirksame Maßnahmen zu definieren, diese in der Simulation überprüfen zu lassen und die beste Lösung auszuwählen. Zur Entscheidungsunterstützung, welche Prozesse das Vermögen haben, die Bearbeitungszeit zu reduzieren, wurden geeignete Kenngrößen ausgesucht. Dabei wurde eine neue Kenngröße erarbeitet, die die nicht eingesetzten Zusatzressourcen im Modell sichtbar macht. Der Projektleiter erhält einen Überblick, ob seine Zusatzressourcenverteilung dem tatsächlichen Projektablauf gerecht wird. Somit besteht für ihn die Möglichkeit, nicht benötigte Ressourcen an Prozesse mit hoher Abweichung weiterzugeben.

Wenn Prozesse ihren planmäßigen Abschlusszeitpunkt überziehen, kann der Verantwortliche den Abschlusszeitpunkt nach hinten setzen, was die Nachfolgeprozesse beeinflusst. Trotz gutem Prozessergebnis wird eine Zeitverspätung übergeben. Diese Tatsache wurde im Modell beachtet. Durch die Simulation kann nun

dieser Einfluss auf die Projektabschlusszeit und auf das Projektergebnis überprüft werden.

Damit die Verantwortlichen die richtigen Maßnahmen auswählen, wurden neue Indikatoren entwickelt. Diese zeigen an, ob die nachfolgenden bzw. vorgelagerten Prozesse noch Zeitpuffer, Restchance oder Restzusatzressourcen besitzen und ob der Prozess eventuell ein Teil einer kritischen oder sicheren Prozesskette ist.

Die Definition des kritischen Pfades wurde dafür neu überarbeitet. Die Stochastik wurde in der Pfadbestimmung eingeführt, wodurch es in die Modellierung keinen eindeutigen kritischen Pfad mehr gibt. Es sind aussagekräftige Pfade gefunden worden, die die größte Wahrscheinlichkeit haben, kritisch zu sein bzw. kritisch zu werden. Diese Pfade enthalten Prozesse mit geringer Elastizität, d.h. mit kleiner oder fehlender Pufferwirkung. Es werden auch Pfade mit Prozessen mittlerer und hoher Elastizität definiert, deren Pufferwirkung auf Abweichungen ohne Verlängerung der Projektlaufzeit ausreicht.

Weiterhin wurden Pfade definiert, die Prozesse mit dem größten Einfluss auf das Projektziel beinhalten. Diese Größen geben einen optimalen Überblick über aktive oder passive Prozessketten. Die erarbeiteten Methoden kennzeichnen Prozesse, welche mit minimalem Aufwand das bestmögliche Projektergebnis erreichen können.

Gleiche Kenngrößen verschiedener Prozesse werden in sortierten Listen dargestellt. In absteigender Reihenfolge werden diese Kenngrößen, in denen das Risiko höher ist als Chance, die Sicherheit oder die Abweichungen am größten sind, aufgelistet.

Eine weitere relevante Kennzahl spiegelt die psychologische Größe Druck wider, die als wichtige Flussgröße in das Modell implementiert wurde. Mit dieser Größe wird die Zeitverspätung und Ergebnisabweichung des Vorgängers dem Potenzial gegenübergestellt, diese Abweichungen abpuffern zu können. Der Projektleiter erkennt, welche Prozesse mit sehr großer Wahrscheinlichkeit das Ergebnis nicht erreichen und welche Prozessverantwortlichen die größte Belastung spüren.

Mit dem stochastischen Risikomodell können einige Mängel in der Modellierung von komplexen Projekten behoben und die Herausforderungen in der Verfolgung von Abweichungen gemeistert werden. Die Anforderungen und die Erwartungshaltung an eine neue Modellierung in den Abschnitten 3.2 und 4.2 sind mit diesem

stochastischen Risikomodell erfüllt. In die Projektplanung und -steuerung kann durch das neue Modell aktiv eingegriffen werden. Um diese Aussagen zu beweisen, wurde das neue Modell mit den Gestaltungsmerkmalen von Kapitel 6 umgesetzt und anschließend anhand eines Fallbeispiels verifiziert und validiert. Im nächsten Abschnitt wird die Entwicklung eines Simulations- und Modellierungswerkzeuges beschrieben, welches auf dem stochastischen Risikomodell basiert. Anschließend werden im Abschnitt 7 die Erkenntnisse aus den Simulationsexperimenten näher erläutert.

## 6 Realisierung

### 6.1 Übersicht

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Visualisierungs- und Realisierungsmerkmale sowie die Funktionsweise des Tools zur stochastischen Risikomodellierung und -verfolgung in komplexen Projekten erörtert. Das entwickelte Modellierungs- und Simulationswerkzeug erhält den Namen **ProViS**. Der Name ProViS bedeutet **Projekt- Visualisierung** und **Simulation**.

### 6.2 Auswahl geeigneter Visualisierungstechniken

Neben der umfangreichen Betrachtung der Modellierung komplexer dynamischer Projektstrukturen stellt die benutzerfreundliche Darstellung der Prozessabhängigkeiten untereinander sowie die aus der Simulation ermittelten Ergebnisse einen ebenso wichtigen Teil dieser Arbeit dar.

Es ist wichtig, Möglichkeiten zu finden, um umfangreiche projektbeschreibende Daten und Abhängigkeiten zwischen den Prozessen anschaulich darzustellen. Es sollen Visualisierungstechniken ausgewählt werden, die in der Lage sind, Abweichungen und Verbesserungspotenziale in Projekten transparent darzustellen. Dazu gehört das Aufzeigen von kritischen bzw. sicheren Prozessen, kritischen Pfaden und weiteren wichtigen Stellhebeln. Der Anwender muss in der Lage sein, sich jederzeit in den abgebildeten Informationen zurechtzufinden. Trotz der Fülle von Kenngrößen auf der einen Seite und der hohen Anzahl von Prozessen auf der anderen Seite ist es notwendig, eine ganzheitliche Betrachtungsweise auf das Projekt zu gewährleisten. Eine Informationshäufung darf nicht stattfinden. Die Daten sollen deutliche Abweichungen und relevante Einflussgrößen schnell ersichtlich machen und zur Entscheidungsfindung beitragen. Um diese Ziele zu realisieren, werden Konzepte zur Darstellung von Projektplänen, zum Visualisieren von Abhängigkeiten und zur transparenten Kommunikation von Prognoseergebnissen untersucht.

### 6.2.1 Herausforderung der Visualisierung

Da kaum Zeit zur Informationssuche und geduldigen Analyse der möglichen Abhängigkeiten besteht, ist es sehr wichtig, in der Visualisierung eine klare transparente Darstellung umzusetzen. Gerade in der Entscheidungsfindung ist eine auf das Wesentliche konzentrierte Darstellung von großer Bedeutung. Dafür können sich grafische oder tabellarische Darstellungen eignen. Der hohe Informationsgehalt der tabellarischen Form steht den Vorteilen der anschaulichen, aussagekräftigen grafischen Informationsdarstellung gegenüber. Auf der anderen Seite sind tabellarische Darstellungen zu unübersichtlich und grafische Darstellungsformen können nur eine begrenzte Informationsmenge anzeigen [12]. Mit textbasierten Darstellungen können Werte mit hoher Genauigkeit schnell und unkompliziert abgebildet werden. Für große Projekte ist eine Gesamtübersicht in tabellarischer Darstellung nicht möglich und der Vergleich der Ergebnisse wird erschwert. Die Übersichtlichkeit in tabellarischen Darstellungen kann durch Ergänzung mit graphischen Abbildungen verbessert werden. 2D-Darstellungen haben den Vorteil, dass sie einen akzeptablen Visualisierungsaufwand und annehmbare Übertragungsvolumen in webbasierten Anwendungen besitzen. Sie können jedoch nur einen Ausschnitt der Daten anzeigen. Mit 3D-Darstellungen kann ein größerer Teil der Daten gleichzeitig abgebildet werden. Nachteil hierbei ist, dass diese Grafiken aufwendig generiert werden müssen und Perspektiv- und Sichtbarkeitsberechnungen einen höheren Rechenaufwand zur Darstellung benötigen.

Alle drei Darstellungsformen verfolgen ein eigenes Konzept der Visualisierung. Die textbasierte Darstellung ist besonders für die quantitative Präsentation der Simulationsergebnisse geeignet. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, viele Werte in unkomplizierter Form zu präsentieren, so dass Experten uneingeschränkter Zugriff auf genaue Simulationsergebnisse erhalten. Die zweidimensionale Darstellung eignet sich besonders zur Erstellung einer Übersicht über das gesamte Projekt. Sie bietet die Möglichkeit der qualitativen Darstellung der Simulationsergebnisse. Dabei ist der Aufwand zur Generierung und Darstellung zweidimensionaler Grafiken akzeptabel. In der dreidimensionalen Darstellung erhöht sich der abbildbare Umfang an Informationen durch die zusätzliche Dimension erheblich. Daher empfiehlt sich diese Technik nur dann, wenn der abbildbare Informationsgehalt den Rahmen einer zweidimensionalen Darstellung überschreitet.

Mit einer dreidimensionalen Darstellung kann eine höhere Informationskapazität und eine bessere Übersicht gewonnen werden. Als Beispiel lassen sich hier Darstellungen von technischen Zeichnungen nennen. Doch um ein Grad an Ordnung in der 3D-Darstellung von komplexen Netzstrukturen zu erhalten, bedarf es komplizierter Algorithmen. Die Entwicklung entsprechender Algorithmen stellt eine interessante Aufgabe dar, ist jedoch sehr zeitaufwendig und steht in Hinblick auf das Ziel, Abweichungen und Verbesserungspotenziale transparent darzustellen, nicht im erwarteten Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand.

Zur Kontrolle von Projekten werden bereits diverse grafische Informationsdarstellungen wie z.B. Balkenpläne, Auslastungspläne, Plan/Ist-Vergleiche, Trendanalysen, Netzpläne, Kreisgrafiken oder Strukturgrafiken, herangezogen [12]. Ausreichend PC-Programme zur Abbildung diverser Projektinformationen sind vorhanden. Es gibt bereits so viele Anbieter von PC-unterstützten Netzplanverfahren, dass ein vollständiger Überblick über die Angebote unmöglich ist. Eine Aufstellung von fünfzehn PC-Netzplanverfahren in [12] macht deutlich, dass die Tools zwar zur Termin-, Kapazitäts- und Kostenüberwachung dienen. Sie sind aber nicht geeignet, Größen wie Risiko und Chance stochastisch zu betrachten und zu verfolgen.

Der Anspruch der Visualisierung dieser Arbeit ist es, dass nicht nur Experten des Tools damit umgehen können. Die Projektverantwortlichen sollen zur Entscheidungsunterstützung ihrer Arbeit ein Werkzeug in die Hand bekommen, mit dem sie selbständig arbeiten können. Es gilt Konzepte zu finden, die die Methode der stochastischen Risikomodellierung so abbilden, dass problemlos „Laien ohne Methodenkompetenz“ das Tool bedienen und die Ergebnisse mit ihrem Fachverstand interpretieren können.

Es werden Möglichkeiten aus dem großen Feld der Visualisierungsarten ausgewählt, um den graphischen Anforderungen einer Projektergebnisprognose gerecht zu werden. Diese Arbeit hat nicht den Anspruch, neue Visualisierungstechniken zu entwickeln. Ideen von bereits vorhandenen Techniken werden übernommen und auf die Verfolgung von Risiken und Ergebnisabweichungen in komplexen Projekten angewandt und erweitert. Die potentiellen Konzepte werden im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt.

## 6.2.2 Mögliche Visualisierungsansätze

Anhand der vorausgehenden Überlegungen werden folgende Visualisierungsansätze verfolgt.

Die prozessspezifischen Kenngrößen können in einer tabellarischen Darstellung sehr gut abgebildet werden. Vor allem die Vergleichbarkeit der Prozesse untereinander ist dadurch gut gegeben. Dieser Visualisierungsansatz wird im Weiteren als **Werteansicht** gekennzeichnet.

Eine zweidimensionale Darstellung, wie im Tool Microsoft Projekt<sup>7</sup>, kann einen guten Überblick über den Projektverlauf geben, obwohl Abhängigkeiten nicht direkt ersichtlich sind. Eine einfache zweidimensionale Auflistung (z.B. eine Matrix) ist zur ersten Informationsgewinnung ausreichend. Eine Dimension ist dabei die Zeit, in der zweiten Dimension wird eine Ordnung nach Kategorien (z.B. Logistik, Montage) vorgenommen. Alle relevanten Prozesse und ihre zeitliche Anordnung sind auf einem Blick sichtbar. Der Informationsgehalt der Darstellung erhält somit eine hohe Dichte. In Projekten wird der Begriff Leitstand für diese Art der Abbildung verwendet.

Leider bleiben Informationen über die Projektstruktur und die direkten Abhängigkeiten der Prozesse untereinander außen vor. Eine Erweiterung dieser **Matrixansicht** könnte durch das Einbauen der Abhängigkeitsbeziehungen der Prozesse erreicht werden. Dafür werden in der Umsetzung Möglichkeiten gefunden.

Durch Auswahl eines Prozesses aus dem Leitstand können in einer **Detailansicht** die direkten Verbindungen und Abhängigkeiten sichtbar gemacht werden.

Zum Darstellen von komplizierten Verbindungen sind bereits gute Ansätze in Routenplanern vorhanden. Grundlage dieser Systeme ist die genaue Darstellung der Landkarten. Es werden bei der Ansicht je nach Detaillierungsebene mehr oder weniger große Ausschnitte der Gesamtlandkarte angezeigt. Dies ist in bekannten Routenplanern wie beispielsweise Map24 [120] gut gelöst, in dem Kartenausschnitte vergrößert werden können. So wird die Komplexität der Darstellung gering gehalten, und die Übersichtlichkeit leidet nicht.

Es werden Möglichkeiten geprüft, wie durch den Projektplan navigiert werden kann und dabei nur eine geeignete Anzahl an Verbindungsebenen angezeigt wird. In der Detailansicht wird darüber hinaus das Ziel verfolgt, die Ergebnissensitivität zwischen

den Prozessen graphisch darzustellen. Somit kann der Einfluss einer Ergebnisabweichung auf den Folgeprozess transparent abgebildet werden.

In den vorhergehenden Abschnitten wurden neue Pfade und Listen entwickelt. Die Herausforderung in der Visualisierung ist, diese transparent abzubilden. Durch den Einbau der Stochastik in die Modellierung kann es mehrere Pfade und Listen geben. Interessant in der Visualisierung wird sein, diese zu zeigen, die die höchste Wahrscheinlichkeit besitzen auf einem der definierten Pfade zu liegen, bzw. in einer der hergeleiteten Listen ganz oben zu stehen. Durch eine **Pfad- und Listenansicht** kann ein sehr guter Überblick über wichtige Einflussgrößen gefunden werden.

Bei den Visualisierungsansätzen Matrix-, Pfad-, Listen- und Detailansicht ist es sinnvoll, dass bei der Darstellung der Prozesse die prognostizierte Ergebnisverteilung nach der Simulation abgebildet wird.

Abbildung 6-1 zeigt eine Darstellung eines Prozesses mit einer prognostizierten Ergebnisverteilung. Durch Einführung einer Farbskala [92] kann der Prozessverantwortliche erkennen, ob sein Ergebnis im kritischen (rechts; roter Bereich) bzw. im sicheren Bereich (links; grüner Bereich) liegt. Dieser Visualisierungsansatz wird weiter verfolgt.

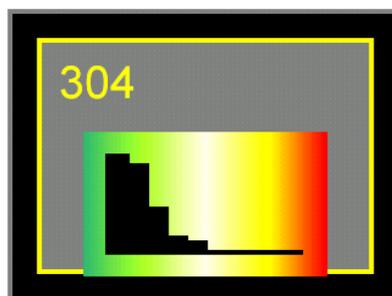


Abbildung 6-1: Darstellung eines Prozesses und dessen prognostizierte Ergebnisverteilung

Die vorgestellten Ansätze ermöglichen die Darstellung der benötigten Informationen von komplexen Projekten. Die Visualisierungsumfänge werden in Abschnitt 6.5.3 genauer spezifiziert. Um diese Darstellungen und die geforderten Modellierungs- und Simulationsumfänge zu realisieren, werden im folgenden Abschnitt Entwicklungstechniken und Systemumgebungen ausgewählt.

<sup>7</sup> Microsoft Projekt: Projektplanungstool von Microsoft, vgl. [121].

### 6.3 Auswahl geeigneter Realisierungswerkzeuge

Bei der Auswahl von Softwaretechnologien und Applikationen werden wichtige Prämissen wie Multiuserfähigkeit, Intranetfähigkeit, Bediener- und Wartungsfreundlichkeit beachtet. Da gleichzeitig mehrere Anwender mit dem Tool arbeiten sollen, müssen ausreichend Sperrkonzepte für die Anwendung und für die Datenbasis entwickelt werden. Konflikte durch zeitgleichen Zugriff auf Anwendungsressourcen müssen vermieden werden. Das Tool sollte an verschiedenen Arbeitsplätzen ohne zusätzliche Installationen verfügbar und lauffähig sein. Die Anwendungsplattform muss die Dynamik und die komplexen Abhängigkeiten zwischen den Prozessen abbilden. Dafür muss sie sowohl die Modellierungsaspekte als auch die Simulationsanforderungen unterstützen und Möglichkeiten bieten, diese bedarfsgerecht anzupassen. Auch im Hinblick auf Weiterentwicklungen in der graphischen Darstellung, sollen durch die verwendete Plattform keine Grenzen gesetzt werden. Um die Lebendigkeit des Systems zu erhalten, ist es nötig, einen hohen Grad an Wartungsfreundlichkeit zu unterstützen. Nur so kann auf Dauer ein derartiges System auch von anderen Anwendern gepflegt und weiterentwickelt werden.

Ziel ist es, dass Änderungen in den Projektplänen durch die Anwender selbstständig durchgeführt werden können. Insgesamt soll die Benutzerführung transparent und selbstverständlich sein. In der Realisierung soll auf bewährte Technologien zurückgegriffen werden und bedarfsgerecht erweitert werden.

Erste Überlegungen umfassten Standardapplikationen wie z.B. Powersim [124], eM-Plant [115] oder Matlab Simulink [8] zur Abbildung von stochastischen Risikomodellen. Doch die genannten Anforderungen für eine neue Methode, dessen Anwendungsbereich sowie die aufgestellten Prämissen sind so spezifisch, dass Standardsoftware diesen Kriterien nicht gerecht wird. Bekannte Simulationstools und mathematische Applikationen sind zu fachspezifisch, um dem vorliegenden Aufgabengebiet eine optimale Lösung zu bieten.

Die meisten Standardapplikationen für Simulationen sind so kompliziert, dass ohne automatisierte Schnittstellen nur von Experten die Eingabe von Parametern und die Durchführung und Auswertung von Simulationen durchgeführt werden kann. Bei der geplanten Anwendung soll die Modellierung und Simulation weitestgehend unabhängig von Systemspezialisten laufen. Daher wird der mögliche Einsatz von Standardapplikationen nicht näher betrachtet.

Im Folgenden findet eine Vorauswahl von Realisierungstechniken statt, damit das stochastische Risikomodell in eine datenverarbeitungsgerechte Lösung umgesetzt werden kann.

### **Datenbank**

Durch die Fülle von Informationen, die allein die Prozessvorgänge in großen Projekten beinhalten und der nötige Informationsbedarf für die Modellierung und Simulation ist es unvermeidbar, eine Datenbank zu verwenden. Nur so können die Informationen schnell und einfach für die geplanten Simulationen und Analysen erreichbar gemacht werden.

Die Verwendung einer OraclDatenbank<sup>8</sup> bietet die optimale Datenbasis und wird daher für die Realisierung verwendet [122]. Ebenso wird Microsoft Access zur Unterstützung der Applikationsentwicklung herangezogen. Einerseits kann damit auf Oracle über verknüpfte Tabellen mittels ODBC<sup>9</sup> zugegriffen werden, andererseits kann eine Kopie der Datenbank in Access erzeugt werden und somit eine lokale Entwicklung der Applikation unterstützen.

Die parallele Entwicklung auf zwei verschiedenen Datenbanken bietet ein komfortables Maß an Portabilität an, da die Anwendung so geschrieben werden muss, dass sie auf beiden Systemen fehlerfrei läuft.

### **Java Technologie und Auswahl geeigneter Entwicklungsumgebungen**

Zur Realisierung von Anwendungen die von vielen Einzelusern innerhalb einer vernetzten Systeminfrastruktur benutzt werden soll, ist es sinnvoll, die Anwendung als Web-Applikation zu entwickeln. Dafür kann die Java-Technologie auf vielseitige Weise zur Realisierung von Web-Applikationen herangezogen werden. Der Vorteil ist die weite Verbreitung von Java, so dass dadurch auf eine umfangreiche Basis fertiger Bibliotheken zurückgegriffen werden kann. Da die Java-Technologie alle geforderten Voraussetzungen erfüllt, wird Java speziell mittels Java Server Pages (JSP) und Servlets für die Applikationsentwicklung verwendet [128].

---

<sup>8</sup> Oracle9i Enterprise Edition Release 9.2.0.4.0

<sup>9</sup> ODBC (Open Database Connectivity): universelle Schnittstelle zu verschiedenen relationalen Datenbanken. Sie enthält die wesentlichen Funktionen für die Verbindung zur Datenbank, der Abfragen sowie der Verarbeitung der Ergebnisse.

Eine Vielzahl von Formularen für die Erfassung der projektbeschreibenden Daten ist zu entwickeln. Hierfür wurden die Möglichkeiten von HTML und dessen Ergänzung in Javascript und CSS näher betrachtet.

Die Scriptsprache Javascript wird von allen gängigen Browsern unterstützt und kann in HTML eingebaut werden. Die Auswahl der zugrundeliegenden Entwicklungstechnologie fällt auf JSP. Daher ist es sinnvoll, die nötigen unterstützenden Funktionen (wie Eingabeüberprüfungen) mittels Javascript zu realisieren.

Um die Einheitlichkeit und Zusammengehörigkeit der einzelnen Applikationselemente bei HTML-basierten Anwendungen sicherzustellen, kann die Verwendung von CSS Formatierungen sehr hilfreich sein. Mit CSS können einheitliche Formatereigenschaften global in einer einzelnen Datei festgelegt werden. Mit einem Verweis kann in jeder HTML-Datei und damit in JSP und Servlets auf die Style Sheets verwiesen werden. Gleiche Applikationselemente erhalten nun immer dieselben Formatierungen. Dies unterstützt die Erreichung eines durchgängigen Designs für die gesamte Applikation.

Zur UML-konformen Konzeption wird das Entwicklungstool Together [132] verwendet. Together ist ein visuelles UML-Modellierungswerkzeug zur Softwareentwicklung in Java. Das in UML erstellte Modell wird mit der Softwareentwicklungsumgebung Eclipse [114] weiterentwickelt.

Die Eclipse-Plattform ermöglicht das Erstellen von integrierten Entwicklungsumgebungen (IDEs), welche zur Entwicklung von Applikationen (z.B. interaktive Web-Sites, Java Programme, etc.) notwendig sind. Diese Entwicklungsumgebung ist frei verfügbar und stellt eines der besten Werkzeuge zur Erstellung von Java-Applikationen dar.

Die Entwicklung von JSP-Seiten stellt eine große Herausforderung dar. Es gibt kaum Tools, welche Syntaxhervorhebung und automatische Syntaxprüfung in Verbindung mit JSP anbieten. Genau diese Lücke wird mit dem Lombok Plugin von Object Learn [119] in Verbindung mit der Entwicklungsumgebung Eclipse geschlossen. Es bietet die Möglichkeit, eine JSP-Architektur in Verbindung mit einer umfangreichen Java-Klassenbibliothek mit allen Komforts der Programmierung zu entwickeln. Ein Debugging von JSP ist bei vielen Entwicklungsumgebungen nicht möglich. Somit müssen die geschriebenen JSP als eine Art Black Box betrachtet werden. Die Fehlersuche wird enorm erschwert. Mit dem Tomcat Plugin von Sysdeo [130] kann ein Debugging von JSP durchgeführt werden. Nach Installation des

Plugins ist es möglich, einen lokal installierten Apache Tomcat Webserver in der Entwicklungsumgebung des Eclipse-Debuggers zu starten. Dadurch läuft der Java-Prozess des Servers in der Eclipse-Umgebung. Sind in den kompilierten JSP-Dateien, die als Servlets vorliegen, Breakpoints hinterlegt, so stoppt der Server, sobald er einen dieser Breakpoints erreicht.

Der frei verfügbare Apache Tomcat Web-Applikation-Server (Version 5.0) wird für den Großteil der Entwicklungsarbeit genutzt. Für den laufenden Betrieb wird ein Bea-Weblogic-Server (Version 6.1) herangezogen.

### **Graphische Darstellung**

Ein großer Teil der geplanten Applikation muss graphische Möglichkeiten bieten, um die erzeugten Projektstrukturen und -simulationen übersichtlich abbilden zu können. Dabei ist die dynamische Erzeugung von komplexen Grafiken notwendig. Es muss möglich sein, diese Darstellungen mit Funktionalitäten zur Veränderung der Anzeige (Navigation, Ansichtsauswahl) zu erweitern. Das Einsatzpotenzial von dynamischen und graphischen HTML-Darstellungen im Rahmen einer Java-Web-Applikation ist begrenzt. Es gilt Visualisierungstechniken zu finden, die in einer Java-Web-Architektur mit relativ kleinem Aufwand eingebunden werden können. Hierzu wurden die aktuellsten Techniken wie Flash<sup>10</sup>, VRML<sup>11</sup>, Java3D<sup>12</sup> und SVG<sup>13</sup> gegenübergestellt. Auf der Suche nach automatisiert verwendbaren graphischen Darstellungsmöglichkeiten konnten die Vorteile von SVG gegenüber den anderen Techniken überzeugen. Da es aus DHTML<sup>14</sup> bekannte Techniken (u.a. JavaScript (DOM<sup>15</sup>)) verwendet und eine einfache Scriptsprache (SMIL)<sup>16</sup> benutzt, ist die Anlernkurve sehr

---

<sup>10</sup> Macromedia Flash: Autoren-Software zum Erstellen skalierbarer, interaktiver Animationen für das WWW, vgl. [117].

<sup>11</sup> VRML (Virtual Reality Modelling Language): verbreitetes Format für dreidimensionale Grafiken (3D) im WWW, vgl. [134].

<sup>12</sup> Java3D ist eine Erweiterung zu Java ab Version 1.2, die es erlaubt sehr einfach 3D-Welten zu programmieren, vgl. [118].

<sup>13</sup> SVG (Scaleable Vector Graphics): Vektorgrafikformat mit dem es möglich ist, qualitativ hochwertige Grafiken mit geringem Speicherbedarf zu erstellen. Basiert auf XML, vgl. [129].

<sup>14</sup> DHTML (Dynamic HTML): Erweiterung von HTML mit dynamischen Elementen (Animationen, Ebenendefinition, etc.).

<sup>15</sup> DOM (Document Object Model): Modell des Zugriffs auf Elemente bei Scriptsprachen.

<sup>16</sup> SMIL (Synchronized Multimedia Integration Language): Markup-Sprache für zeitsynchronisierte, multimediale Inhalte.

flach. Es existieren eine Vielzahl von kostenlosen Viewern, Add-Ins<sup>17</sup>, Generatoren und Editoren. Mittels XML<sup>18</sup>-Dateien können auf einfache Weise flexible graphische Elemente selbst definiert werden. Dies kommt der benötigten automatischen Generierung von Grafiken sehr entgegen.

Flash konnte nicht überzeugen, da es nicht sehr performant ist, spezielle Editoren (z.B. Macromedias Flash MX) erforderlich sind und verschiedene Versionen im Einsatz sind (Flash4, 5, MX, MX 04), die nicht komplett kompatibel zueinander sind. Auch VRML wird nicht näher betrachtet, da dessen Zukunft unsicher ist. Es besitzt sehr viele Plugins, damit die Installation erschwert, die Plattformunabhängigkeit einschränkt und kostenpflichtige Entwicklungssoftware erforderlich wird. JAVA3D ist auch nur bedingt geeignet. Gründe dafür sind, dass Java3D in Applet eingebunden werden muss, ein hoher Realisierungsaufwand benötigt wird, es nicht weit verbreitet ist, es eine korrekte OpenGL- oder DirectX-Installation und Konfiguration voraussetzt, es eine komplizierte Installation und Konfiguration als sonst bei Plugins besitzt, es sehr speicherhungrig ist und relativ hohe Anforderungen an das System des Clients setzt.

Mit den ausgewählten Realisierungsmethoden können die geforderten Kriterien abgebildet werden. Die Auswahl der Java-Technologie und die Verwendung von Servlets und JSP mittels Ergänzungen aus Javascript und CSS bietet eine flexible und etablierte Entwicklungsplattform. Diese wird durch den Einsatz einer Oracle-Datenbasis begünstigt. Die Auswahl von SVG kann die geforderten dynamischen Aspekte in der Visualisierung mit flexiblen grafischen Möglichkeiten abbilden.

---

<sup>17</sup> Add-In: Zusatzapplikation mit funktioneller Erweiterung für bestehende Anwendungen / Programme. Integriert sich voll in die bestehende Funktionalität des Programms.

<sup>18</sup> XML (Extensible Markup Language): Quasi-Standard zur Erstellung strukturierter Dokumente im World Wide Web oder in Intranets. XML wird "erweiterbar" (extensible) genannt, weil man hier seine eigenen Auszeichnungstags erstellen kann. XML wurde von einer Arbeitsgruppe entwickelt, die unter Schirmherrschaft des World Wide Web Consortium (W3C) steht.

## 6.4 Kurzbeschreibung der Vorgehensweise zur Softwarekonzeption

Bei der Realisierung des geplanten Tools wird das Wissen des Software Engineering sowie des Information Engineering genutzt [1,66,73,96,97]. Dabei werden die Phasen Anwendungsfallanalyse, Datenbank- und Klassenmodellierung durchlaufen. Den Abschluss bildet die Modellierung der Bildschirmoberflächen.

Der erste Schritt der Applikationsentwicklung aufbauend auf dem Simulations- und Visualisierungskonzept ist die Identifizierung von Anwendungsfällen. Es werden alle Anwendungsfälle aufgenommen, die notwendig sind, um die Übertragung von Projektverläufen in das zu entwickelnde System durchzuführen und deren Prognose und Simulation zu ermöglichen. Diese als Use Case Analyse bekannte Vorgehensweise wird in mehreren Detailebenen durchgeführt. Die wichtigsten Hauptaufgaben, die das System erfüllen muss, sind die Use Cases Projektdefinition, Prozessdefinition, Projektaktivierung, Projektsimulation, Projektvisualisierung, Definition von Verbesserungspotenzialen und Definition von Ist-Werten. Diese werden im Abschnitt 6.5 anhand der Toolbeschreibung näher erläutert. Aufbauend auf den Use Cases wird ein Datenbankkonzept erstellt. Dabei wird das konzipierte Modell zur Abbildung komplexer Projektabläufe direkt auf die entsprechende Modellierung der Datenbank übertragen. Die nötigen Tabellen zur Speicherung von Projekten, die wichtigsten Prozessinformationen, die Ergebnisdaten der durchgeführten Simulationen sowie die verdichteten Kennzahlen können aus dem Modell ermittelt werden. Somit ergibt sich ein Grundmodell von benötigten Tabellen zur Projektspeicherung.

Ein Ausschnitt des Datenbankmodells wird in Abbildung 6-2 dargestellt. Informationen über die möglichen Anwender des Systems, verwendete Farben, Zeiteinheiten und Fragestellungen für Risiko- und Chancendefinitionen sind in mehreren Stammdatentabellen hinterlegt. Die neu entwickelten Kenngrößen werden in der Datenbank als Objekte gespeichert. Die benötigten Informationen werden je nach Bedarf als Objekte in Projekt-, Prozess- bzw. Verbindungsinfoboxen gespeichert. Der Vorteil dabei ist, dass bei Einführen neuer Kenngrößen die Datenbankstruktur nicht angepasst werden muss und der Zugriff auf die benötigten Daten ohne aufwendige Select-Statements erfolgen kann.

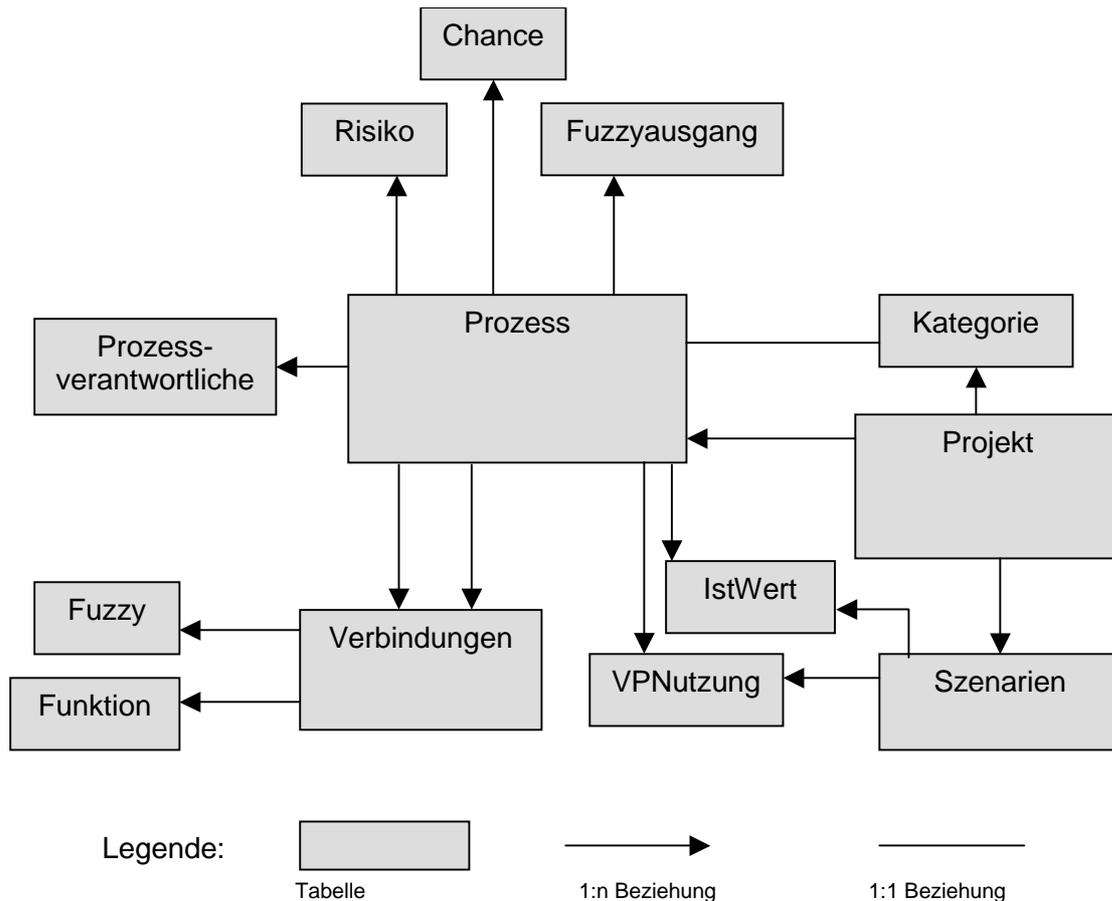


Abbildung 6-2: Datenbankmodell / Java- Klassenstruktur (Schematisch)

Das Java-Klassenmodell zur Abbildung von Projekten ergibt sich direkt aus dem Datenbankkonzept in Abbildung 6-2. Da sämtliche in der Datenbank hinterlegten Entitäten auch größtenteils eins zu eins in der Klassenarchitektur zu finden sind, kann dieses Klassendiagramm direkt aus dem Datenbankkonzept weiterentwickelt werden. Darüber hinaus sind diese Klassen mit Funktionen zur Anzeige und Simulationslogik erweitert. Zusätzlich wurden mehrere Klassen entworfen, die eine Kommunikation mit den JSP ermöglichen. Gerade im Teil der Projektdefinition gilt es, viele Daten zwischen JSP-Formularen und der Java-Architektur zu kommunizieren. Dabei sind diese Klassen behilflich.

Nach der Erstellung des Klassenmodells wird die Menüsteuerung und die Planung der Bildschirmoberfläche konzipiert. Basierend auf dem Daten- und dem Klassenmodell werden die Bildschirmfolgen schrittweise entwickelt. Dabei finden die in der Anwendungsfallanalyse angedachten Use Cases eine entsprechende Realisierung. Bei dieser Planung wird parallel das Klassendiagramm um weitere notwendige Funktionalitäten erweitert. Dies ist notwendig, da bei der genauen

Planung der Bildschirmoberflächen weitere Feinheiten der Applikationsentwicklung ersichtlich werden.

Die geplanten Darstellungen lassen sich grob in zwei Hauptbereiche untergliedern. Im ersten Teil sind die Bildschirmfolgen zur Erfassung von Projekt- und elementaren Prozessinformationen erstellt. Diese Bildschirmfolgen sind in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 schematisch dargestellt. Im zweiten Teil sind die Vorgänge von Projektaktivierung sowie Simulation und Visualisierung in Abbildung 6-6 näher veranschaulicht.

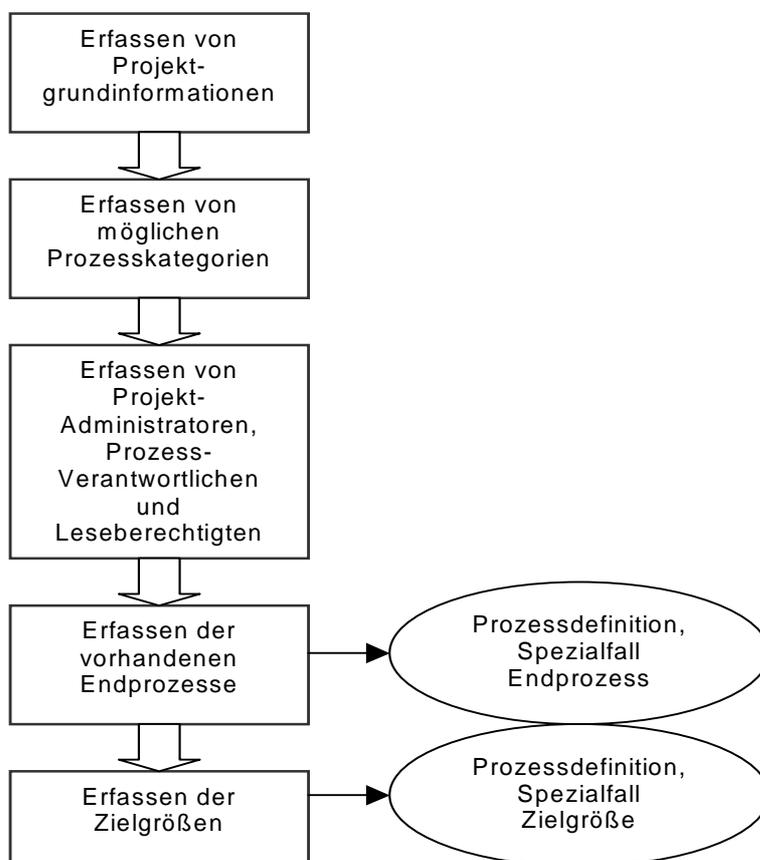


Abbildung 6-3: Ablauf der Projekterstellung

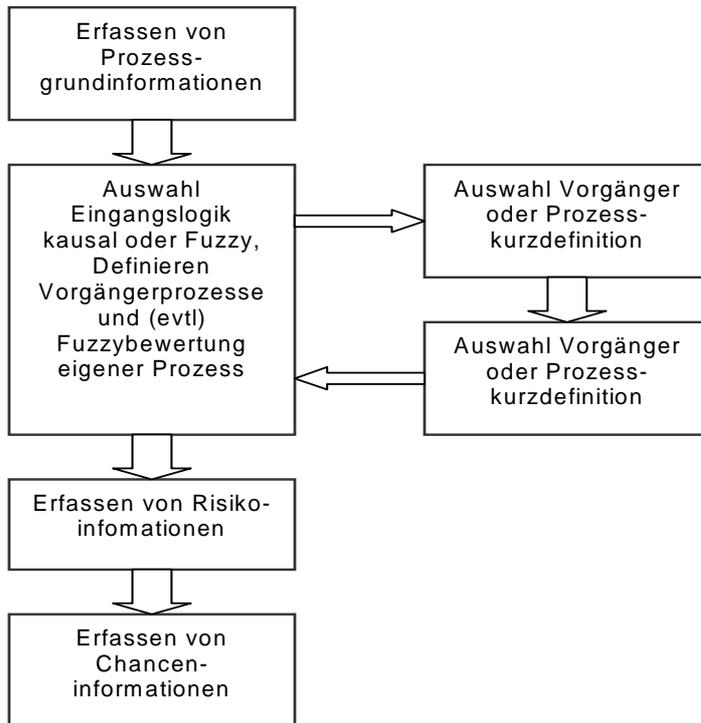


Abbildung 6-4: Ablauf der Prozesserstellung

In der Toolbeschreibung werden beide Abbildungen näher erläutert. Die erforderlichen Umfänge sind mittels Methodiken aus dem Software Engineering beschrieben. Es folgt die Implementierung und Realisierung der konzipierten Umfänge.

## 6.5 Toolbeschreibung

Die Applikation ProViS lässt sich in mehrere Programmteile aufteilen. Die Projektdefinition, die Simulation und abschließend die Visualisierung der gewonnenen Daten. Diese Vorgehensweise lässt sich auf das klassische EVA-Prinzip (Eingabe - Verarbeitung - Ausgabe) übertragen.

### 6.5.1 Eingabe

Die Projektdefinition geht immer bei der Simulation von Projekten voraus. Im Falle einer neuen Projektdefinition stößt ein Projektleiter diese an. Der Anwender, der die Festlegung eines Projektes startet, wird automatisch als der erste Projekt-

administrator eingetragen. Er kann weitere Administratoren definieren und beliebig viele Leseberechtigte und Prozessverantwortliche angeben. Die Projektplanadministratoren pflegen alle projektbeschreibenden Daten ein und definieren sämtliche Endprozesse, die wichtigsten Zielgrößen und deren Abhängigkeiten von Endprozessen.

Eine Projektdefinition wird durch die Festlegung aller vorhandenen Prozesselemente der angegebenen Prozessverantwortlichen fortgeführt. Sie kann von mehreren Anwendern gleichzeitig durchgeführt werden.

Ein Prozessverantwortlicher legt die erforderlichen Daten eines elementaren Prozesses fest. Zur Stamminformationen gehören unter anderem der Startzeitpunkt, Abschlusszeitpunkt, erwartetes Prozessergebnis und Ergebnisbereich, benötigtes Stammpersonal und bei Bedarf verfügbare Zusatzressourcen. Er beantwortet die Fragen zur Risiko- und Chancendefinition. Er gibt an, welche Vorgängerprozesse ihre Ergebnisse an seinen Prozess liefern und in welcher Weise sein Prozess auf Ergebnisse seiner Vorgänger reagiert. Somit werden Abhängigkeiten und Einflussstärke festgelegt.

Will der Prozessverantwortliche einen Vorgängerprozess bestimmen, der noch nicht direkt durch den jeweiligen Verantwortlichen definiert wurde, so kann er unter Angabe eines minimalen Informationsumfanges einen Prozess vorschreiben. Dies ist ein Spezialfall der Prozessdefinition. Der Prozessverantwortliche, gibt dabei wiederum einen oder mehrere Prozessverantwortliche an, die alle benötigten Daten des Vorgängerprozesses vervollständigen müssen.

In einer Übersicht erhalten Prozessverantwortliche und Projektadministratoren eine Liste aller bereits definierten und noch nicht vollständig definierten Prozesse. Sie haben jederzeit die Möglichkeit, neue Prozesse zu definieren sowie vorhandene zu bearbeiten oder zu löschen.

Erst wenn alle Prozesse vollständig definiert wurden, kann ein Projekt durch einen Projektadministrator aktiv geschaltet werden. Dabei erfolgt eine automatische Plausibilitätsprüfung, ob z.B. die Endzeitpunkte der Vorgänger nicht nach den Startzeitpunkten der Nachfolger liegen oder, ob das erstellte Projekt durchgängig definiert wurde. Dies ist notwendig, um den einwandfreien Ablauf der Simulation zu gewährleisten, Deadlockfreiheit<sup>19</sup> zu garantieren und andere Schwierigkeiten

---

<sup>19</sup> Deadlockfrei: Begriff aus der Definition von Petrinetzen. Ein Deadlock liegt vor, wenn ein Teil oder ein ganzes System einen Zustand erreicht, indem einzelne Zustände nicht mehr verlassen werden

auszuschliessen. Ist ein Projekt aktiv, kann die Prozessinfrastruktur nicht mehr geändert werden und die Projektdefinition ist endgültig abgeschlossen. Ist dennoch eine Veränderung der Struktur nötig, kann aus dem bestehenden Projektplan eine neue Version erstellt werden. Diese existiert unabhängig vom bisherigen Projektplan und kann folglich verändert und jederzeit wieder aktiviert werden.

### **6.5.2 Verarbeitung**

Bei Aktivschaltung des Projektes wird die Simulation wie in Abschnitt 4.6 beschrieben durchgeführt. Pro Replikation werden alle benötigten Daten in den dafür vorgesehenen Infoboxen zwischengespeichert. Nach Abschluss aller Replikationen werden für alle projekt-, prozess- bzw. kantenspezifischen Kenngrößen der Mittelwert, die Standardabweichung, die Varianz, der Standardfehler, das Konfidenzintervall sowie der minimale und maximale Wert berechnet und in den Objekten gespeichert. Die Infoboxen werden in der Datenbank abgelegt.

Die ermittelten Daten können somit jederzeit von allen Anwendern schnell angezeigt werden. Nur Projektplanadministratoren können die Simulation mittels Stellhebel verändern und neue Ergebnisse erzeugen. Diese Simulationsergebnisse sollen genutzt werden, um den aktuellen Stand im Projektteam zu kommunizieren.

Jeder Prozessverantwortliche ist in der Lage, eigene Szenarien mittels Veränderung der Prozessgrößen zu erzeugen. Diese sind nur für sie sichtbar und werden separat gespeichert. Mittels der Simulationsfunktion können mögliche Veränderungen in der Projektstruktur oder Maßnahmen zur Ergebnisverbesserung getestet und deren Wirksamkeit überprüft werden.

Veränderungen von Simulationen beruhen auf der Angabe von Verbesserungspotenzialen in Ressourcen und Zeit wie in Abschnitt 4.5.4 beschrieben. Bei der Ansicht von Simulationen können an beliebig vielen Einzelprozessen solche Verbesserungspotenziale eingesetzt werden. In dieser Ansicht können die Prozessverantwortlichen auch Ist-Werte eingeben. Dies sollte der Fall sein, wenn ein Prozess abgeschlossen ist und sein Ergebnis bekannt ist bzw. er wissen will, was das Erreichen seines optimalen Prozessergebnisses für den weiteren Projektverlauf für positive Auswirkungen bringen würde. Anschließend wird beim Simulationslauf

---

können. Ist ein System deadlockfrei, so kann niemals ein Zustand erreicht werden, in dem ein

das Ergebnis des entsprechenden Prozesses immer auf den angegebenen Wert gesetzt.

Der Anwender kann aufgrund der veränderten Größen jederzeit eine neue Simulation durchführen und das Ergebnis als eines seiner Szenarien mit eigenen Namen und Beschreibung abspeichern. In seiner Benutzerübersicht erhält er eine Liste seiner vorhandenen Szenarien, die er jederzeit abrufen, bearbeiten oder löschen kann.

### **6.5.3 Ausgabe**

Die Ergebnisse einer Simulation können von allen Anwendern eingesehen werden. Dabei stehen Ansichten wie Matrix-, Werte-, Pfad-, Listen- und Detailansicht zur Verfügung. Diese Anzeigen werden genutzt, um die Daten einer Projektsimulation zu kommunizieren. Dazu werden alle durch die Simulation ermittelten Daten verdichtet dem Anwender zur Verfügung gestellt.

Im Folgenden werden die jeweiligen Ansichten kurz dargestellt. Die genauen Abbildungen zu jeder Ansicht werden anhand des Fallbeispiels im Kapitel 7 vorgestellt.

#### **Matrixansicht**

In einer Tabelle werden alle Prozesse gezeigt. Je Prozess werden die prognostizierten Ergebnisverteilungen transparent dargelegt. Dabei sind die Prozesse horizontal nach ihren Endterminen geordnet. Vertikal werden die Prozesse nach den definierten Kategorien gruppiert. In dieser Matrixansicht ist die Informationsdichte sehr groß. Es war bis jetzt nachteilig, dass die Abhängigkeiten der Prozesse untereinander nicht ersichtlich waren. Diese Funktionalität wurde in die Matrixansicht eingebettet. Positioniert der Anwender den Mauszeiger über einem Prozess, so werden Prozesse, die in dessen direkter Verbindung stehen, graphisch hervorgehoben. Dabei wird farblich zwischen Vorgänger- und Nachfolgeprozessen unterschieden. Standardmäßig ist die Anzeige so eingestellt, dass die Prozesse zum Projektabschluss ganz oben angeordnet sind. Durch diese Darstellung werden auf einem Blick alle Prozesse ersichtlich, die ihr Ergebnis mit hoher Wahrscheinlichkeit

verfehlen werden. Durch die erweiterte Funktionalität können erste Analysen durchgeführt werden, die anzeigen, von welchen Vorgängern die kritischen Prozesse direkt beeinflusst werden (vgl. Abbildung 7-6).

### Werteansicht

Die Werteansicht stellt die wichtigsten Ergebnisse der Kenngrößen und Stellhebel in Form einer Tabelle dar. Dabei wird in der Darstellung zwischen Informationen eines Prozesses und Verbindungsinformationen zweier Prozesse unterschieden. Die folgenden Prozessinformationen werden als Mittelwerte angegeben, ergänzt mit der Breite des Konfidenzintervalls und der Min-Max Werte.

Prozessergebnis	Das Ergebnis des Prozesses.
Kraft	Kraft ist eine Kennzahl aus der Kombination aller Vorgänger-ergebnisabweichungen und -terminverschiebungen. Die Kraft wird 1, wenn bei allen Vorgängern des Prozesses weder Termin- noch Ergebnisabweichungen auftreten. Sie nimmt Werte größer 1 an, wenn Abweichungen vorhanden sind.
Fläche	Fläche beschreibt die aktuelle Sicherheit eines Prozess vor Abweichungen. Besitzt der Prozess mehr Chance als Risiko oder werden Zusatzressourcen und Zusatzzeit eingesetzt, so nimmt die Fläche Werte größer 1 an.
Druck	Mit Druck wird das Verhältnis zwischen der auf den Prozess wirkenden Kraft und der im Prozess vorhandenen Fläche aufgezeigt.
Mögliche Ergebnisverbesserung durch Restchance	Gibt einen prozentualen Ergebniswert an, um den sich der Prozess durch die Nutzung der Restchance bezogen auf das Prozessergebnis verbessern könnte.
Mögliche Ergebnisverbesserung durch Zusatzressourcen	Gibt einen prozentualen Ergebniswert an, um den sich der Prozess durch die Nutzung der zugeteilten Zusatzressourcen bezogen auf das Prozessergebnis verbessern könnte.

### Mögliche Ergebnisverbesserung durch Zeitpuffer

Gibt einen prozentualen Ergebniswert an, um den sich der Prozess durch die Nutzung des Zeitpuffers bezogen auf das Prozessergebnis verbessern könnte.

### Einfluss von Chance und Risiko

Risiko beschreibt die Höhe der möglichen Ergebnisverschlechterung (negativer Ergebniswert). Chance stellt das Potenzial das Ergebnis zu verbessern (positiver Ergebniswert). Die Summe ist ein Indikator, ob der Prozess kritisch oder sicher ist, und um wie viel das Ergebnis verbessert bzw. verschlechtert werden kann.

### Kombination von Chance, Zusatzressourcen, Zeitpuffer und Risiko

Werden die Einflüsse dieser Größen in Ergebniswerte umgerechnet und anschließend addiert, so ergibt sich diese Größe. Wenn diese negativ ist, besitzt der Prozess eine sehr große Wahrscheinlichkeit, das optimale Ergebnis nicht zu erreichen. Er hat keine direkten Möglichkeiten dem entgegenzuwirken. Das Risiko fließt in die Rechnung negativ ein.

Aktiv / Passiv Darstellung der Aktiv- und der Passivsumme als Ergebniswerte.

Keine Restchance Gibt prozentual an, wie oft in allen Replikationen keine Restchance mehr vorhanden war.

### Keine Restressourcen

Gibt prozentual an, wie oft in allen Replikationen keine Restressourcen mehr vorhanden waren.

Kein Zeitpuffer Gibt prozentual an, wie oft in allen Replikationen kein Zeitpuffer mehr vorhanden war.

In den Kanten befinden sich die Verbindungsinformationen, die nur zwischen Prozessen existieren. Dazu gehören die folgenden Werte:

Von Vorgängerprozess der Kante.

Nach Nachfolgeprozess der Kante.

Effektive, effiziente und kosteneffiziente Ergebnissensitivität  
vgl. Definition in 5.2.6.

Kraft                      Diese Kraft beschreibt nur die Ergebnis- und Terminabweichung des betrachteten Vorgängerprozesses. Ist die Kraft 1, so existieren keine Abweichungen.

Der Vorteil der Wertansicht liegt in der kurzen und prägnanten Darstellung aller relevanten Simulationsergebnisse. Diese Art der Ergebnisdarstellung ist vor allem für weitere Analysen des Projektverlaufes wichtig. Durch Berechnung und Anzeige der Konfidenzintervalle werden potentielle Ergebnisschwankungen mit einer 95% Eintrittswahrscheinlichkeit berechnet. Die Anzeige verschiedener prozessspezifischer Kenngrößen unterstützen den Prozessverantwortlichen einerseits bei der Identifikation von kritischen bzw. sicheren Prozessen und andererseits bei der Suche von geeigneten Maßnahmen, um mit minimalem Aufwand die maximale Verbesserung zu erreichen (vgl. Abbildung 7-7).

### **Pfad- und Listenansicht**

Die Pfad- und Listenansicht hat das Ziel, alle konzeptionell entwickelten Pfade und Listen in ganzheitlicher Form darzustellen. Somit werden alle Prozesse ersichtlich, die gleichzeitig in mehreren Pfaden enthalten sind. Aus diesem Grund wurde eine grafische, zweidimensionale Darstellung gewählt. Sie entspricht den Anforderungen an Übersichtlichkeit und Interaktion am Besten. Erst bei der Auswahl der Pfadansicht werden die definierten Pfade und Listen anhand der gespeicherten Größen in den Infoboxen berechnet. Der Prozess der im Hintergrund läuft, wird im Folgenden kurz beschrieben.

Die Ermittlung der Ergebnissensitivitätspfade wurde bereits in Abschnitt 5.3.8 näher erläutert. Bei den anderen Pfaden wird bei der Auswahl der Pfadansicht ein an die vorhandene Datenstruktur speziell angepasster Algorithmus durchlaufen. Bei der Auswahl geeigneter Algorithmen zur Pfadsuche wurden der Dijkstra-, A\*- und Bellmann-Ford-Algorithmus näher betrachtet [112,113]. Sie bilden den Standard zur Suche nach Pfaden in kantengewichteten Graphen. Sie dienen als Ideengeber bei der Konzeption des Suchalgorithmus. Ziel ist das Finden eines Algorithmus, der sich mit vertretbarem Aufwand auf die Datenstruktur von ProVis anpassen lässt. Der Algorithmus soll folgende Eigenschaften besitzen:

- Er nutzt die vorhandene Datenstruktur.
- Er sucht den günstigsten Pfad von einem Startknoten zu einem Zielknoten.

- Er findet den teuersten Pfad, wenn die Kosten (z.B. Druck, Sicherheit im Prozess, ...) negiert werden.
- Er ist vollständig, d.h. wenn ein Pfad vom Start- zum Zielknoten existiert, wird er auch gefunden.
- Er ist optimal, d.h. es gibt außer dem gefundenen keinen günstigeren bzw. teureren Pfad.

Der angepasste Algorithmus ist rekursiv und orientiert sich in seiner Funktionsweise an der Tiefensuche. Ausgehend vom Startknoten werden alle Nachfolgekanten des Knotens zur Suche markiert. Anschließend wird eine beliebige markierte Kante ausgewählt und ihre Markierung entfernt. Ist der Nachfolgeknoten dieser Kante entweder noch nicht besucht worden, oder sind die in ihm gespeicherten Wegkosten höher als die, mit denen er nun erreicht werden kann, wird der Nachfolgeknoten als besucht gespeichert, die Wegkosten im Nachfolgeknoten aktualisiert und der aktuelle Knoten als Vaterknoten gespeichert. Anschließend wird dem Algorithmus der Nachfolgeknoten übergeben und die Suche fortgesetzt. Der Algorithmus terminiert, wenn ihm der Zielknoten übergeben wurde und alle Kantenmarkierungen gelöscht worden sind.

Um alle Knoten in die Pfadsuche einzubeziehen, werden zwei neue, fiktive Knoten eingefügt: ein Dummystartknoten und ein Dummyendknoten. Ersterer hat alle Knoten ohne Vorgängerkanten (Startknoten) als Nachfolger, letzterer alle Knoten ohne Nachfolgekanten (Endprozesse) als Vorgänger (vgl. Abbildung 6-5). Die Pfadsuche wird anschließend mit dem Dummystartknoten als Startknoten und dem Dummyendknoten als Zielknoten durchlaufen.

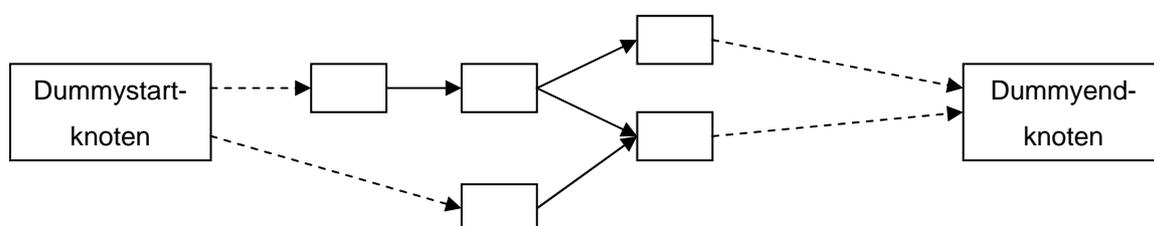


Abbildung 6-5: Einfügen von Dummystart- und Dummyendknoten

Nach der Suche sind in jedem Knoten die Wegkosten gespeichert, die vom Startknoten aus zu diesem Knoten entstehen. Um den günstigsten Pfad auszugeben, müssen lediglich die Vaterknoten verfolgt werden, bis der Startknoten erreicht ist.

Da der Algorithmus bei Erreichen eines Knotens alle Wegkosten in den Nachfolgeknoten auf Optimalität hin überprüft, ist sichergestellt, dass der günstigste Pfad sicher gefunden wird. Diese Eigenschaft gewährleistet ebenfalls, dass auch der günstigste Pfad mit negativen Knotengewichten gefunden wird. Somit erfüllt der Algorithmus alle eingangs geforderten Eigenschaften und wird bei der Ermittlung der in den Abschnitten 5.3.3 - 5.3.7 Pfade herangezogen.

Bei der Auswahl der Listenansicht werden die gespeicherten Kenngrößen in den Infoboxen der sortiert. Die Berechnung der sortierten Prozesslisten erfolgt mit dem Quicksort-Algorithmus [125]. Er wurde aufgrund seiner weiten Verbreitung und der großen Anzahl an frei verfügbaren Beispielimplementierungen gewählt. Mit einer mittleren Laufzeit von  $O(n \cdot \log(n))$  und einer Worst Case Laufzeit von  $O(n^2)$  bei  $n$  zu sortierenden Elementen ist der Suchaufwand akzeptabel.

Die berechneten Pfade und Listen lassen sich in zwei Kategorien einordnen: Anzeigen von Abweichungen und Aufzeigen von Stellhebeln.

Folgende Pfade und Listen werden in der Pfadansicht dargestellt:

- Pfade und Listen, die Abweichungen aufzeigen
  - Maximaler Druckpfad
  - Effektiver Ergebnissensitivitätspfad
  - Unsicherer Pfad
  - Höchster Druck-Liste
  - Restrisiko-Liste
- Pfade und Listen, die Stellhebel aufzeigen
  - Kritischer Zeitpufferpfad
  - Kritischer Restchancenpfad
  - Kritischer Restchance-, Restzusatzressourcenpfad
  - Kritischer Restchance-, Restzusatzressourcen-, Restzeitpfad
  - Minimaler Restchancenpfad
  - Minimaler Restchancen-, Restzusatzressourcenpfad
  - Minimaler Restchancen-, Restzusatzressourcen-, Restzeitpfad
  - Effektiver Ergebnissensitivitätspfad

- Effizienter Ergebnissensitivitätspfad
- Kosteneffizienter Ergebnissensitivitätspfad
- Sicherer Pfad
- Aktive Prozesse-Liste
- Passive Prozesse-Liste

In der Pfad- und Listenansicht hat ein Projektverantwortlicher die Möglichkeit, alle Prozesse, die in einem Pfad bzw. einer sortierten Liste enthalten sind, auf einem Blick zu sehen. Bei der Selektion eines Prozesses wird dieser in allen Pfaden und Listen hervorgehoben. Der Einfluss des Prozesses im Projektverbund wird durch diese Anzeige schnell deutlich. Der Projektleiter erhält einen schnellen Überblick, welche Prozesse in kritischen bzw. sicheren Pfaden und Listen erhalten sind und somit die höchste Wahrscheinlichkeit besitzen, das Projektergebnis zu verbessern bzw. zu verschlechtern (vgl. Abbildung 7-9). Durch die Pfad- und Listenansicht können ideale Verbesserungspotenziale gefunden und Abweichungen identifiziert werden.

### **Detailansicht**

In der Detailansicht werden Vorgänger- und Nachfolgeprozess eines Prozesses gezeigt. Hier werden Einzelprozessinformationen, Simulationsergebnisse und deren Verbindungen innerhalb des Projektplanes auf dem höchsten Detaillierungsgrad dargestellt.

Die Anzeige wird immer auf einen einzelnen ausgewählten Prozess konzentriert. Dieser wird in der Bildschirmmitte angezeigt. Dazu werden alle Verbindungen am Eingang und am Ausgang des Prozesses abgebildet. Die Verbindungen können mehrere Verbindungsstufen beinhalten. Die Darstellungstiefe der Ebenen kann der Anwender frei wählen. Es besteht die Möglichkeit, die Ebenen stufenweise zu erweitern und somit auch die Abhängigkeiten der Vorgänger bzw. Nachfolger zu sehen. In dieser Anzeige kann jederzeit ein anderer vorhandener Prozess ausgewählt werden. Die Anzeige fokussiert sich anschließend auf diesen Prozess. Mit dieser Vorgehensweise kann der Projektplan von Prozess zu Prozess durchwandert werden. Zu den anderen Darstellungsvarianten kann navigiert werden. In der Detailansicht wird die jeweilige Ergebnissensitivität und die Kraft in den Kanten visualisiert. Dabei zeigt die Größe und die Farbe der Verbindungskanten den

jeweiligen Einfluss des Vorgängers. Durch die Detailansicht wird dem Projektverantwortlichen ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, indem die tatsächlichen Ergebnisabhängigkeiten und Abweichungen aufgezeigt werden. Die eingebaute Animation mit SVG vermittelt transparent den spezifischen Einfluss des Vorgängers. Durch die Anzeige der Ergebnissensitivitäten erhält der Verantwortliche einen optimalen Überblick über die besten Einflussgrößen, um das Prozessergebnis mit minimalem Aufwand zu verbessern. Mit der Anzeige der Kraft kann der größte negative Einfluss auf den Prozess transparent dargestellt werden (vgl. Abbildung 7-8). Die Verantwortlichen werden in der Risikoidentifizierung und Entscheidungsfindung wesentlich unterstützt. Aufbauend auf die Analyse der vier Ansichten können nun neue Simulationen durchgeführt werden, indem die Parameter verändert werden.

### **Prozessinformationen**

In jeder Ansicht ist es möglich, durch einen Mausklick auf einen Prozess genauere Informationen über diesen und sein aktuelles Simulationsergebnis zu erfahren. Dies erfolgt durch ein neues Browserfenster. Darin werden weitere Informationen über die ermittelten Ergebnisse angezeigt. Zusätzlich wird ein Konfidenzintervall der erreichten Ergebnisse gezeigt.

In dieses Fenster mit Prozessinformationen kann der Anwender für den aktuellen Prozess Angaben für die Nutzung von Verbesserungspotenzialen in Zeit und Kosten (Ressourceneinsatz) oder einen Wert für vermutete Ergebnisse eingeben. Er kann anschließend seine Änderungen sofort durch eine überprüfen lassen. Macht er dies nicht sofort, kann er bei beliebig vielen anderen Prozessen weitere Informationen sammeln und diese später gebündelt in die Simulation einfließen lassen. Lässt der Anwender eine neue Simulation durchführen, so werden die Simulationsergebnisse automatisch in den jeweiligen Ansichten aktualisiert. Er kann jederzeit die neu simulierten Daten in der Datenbank unter einem eigenen Szenario speichern. Besitzt der Anwender Administratorrechte, so kann er das neue Szenario auch als die allgemein erreichbare Simulation speichern.

Der Ablaufplan in Abbildung 6-6 schafft einen Überblick der Anzeigeabläufe bei der Visualisierung von Simulationsergebnissen.

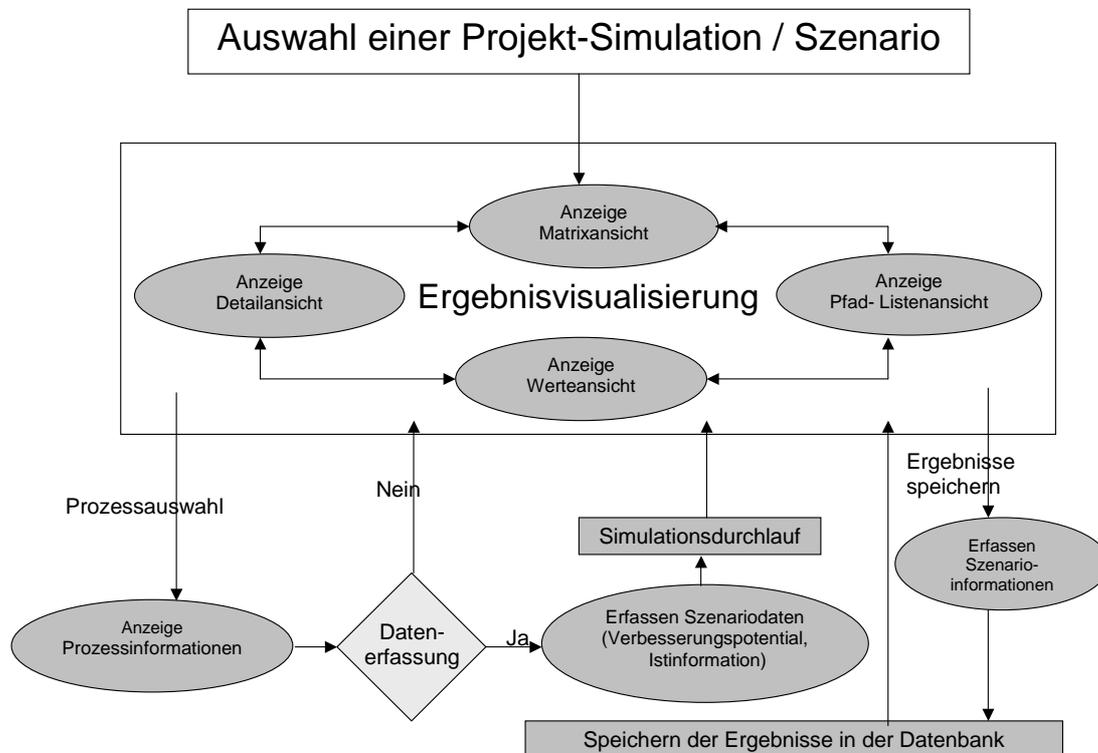


Abbildung 6-6: Schematischer Ablaufplan der Ergebnisdarstellung und Szenarioerstellung

Mit den vorgestellten Ansichten sind für komplexe Projekte geeignete Visualisierungstechniken eingeführt, um relevante Kenngrößen, sichere bzw. kritische Prozessfolgen und Wirkzusammenhänge für den Projektleiter anschaulich darzustellen. Damit sind die wichtigsten Merkmale und Kenngrößen des stochastischen Risikomodells im Tool ProVis realisiert.

## **7 Simulationsexperimente mittels stochastischer Risikomodellierung**

### **7.1 Übersicht**

Im Rahmen eines Modellneuanlaufes in der Automobilindustrie wurde das stochastische Risikomodell angewendet. Dabei wurde das Ziel verfolgt, das neu entwickelte Risikomodell und das Modellierungs- und Simulationstool auf seine Anwendbarkeit und Aussagekraft zu prüfen.

Die wichtigsten Prozesse und Kennzahlen im Produktentstehungsprozess (PEP) wurden identifiziert, deren Abhängigkeiten analysiert und anschließend im Tool ProViS abgebildet. Zur Analyse der Abhängigkeiten wurde das Sensitivitätsmodell herangezogen [46]. Der PEP eines Automobils wird dafür kurz vorgestellt. Das neue Modell und das Tool wurden an diesem komplexen Projekt und an vielen kleinen Testprojekten verifiziert und validiert. Durch mehrere Simulationsexperimente werden die Vorteile des stochastischen Risikomodells diskutiert.

### **7.2 Anwendung des stochastischen Risikomodells**

#### **7.2.1 Fallstudie: Risikoverfolgung im Produktentstehungsprozess**

Mit PEP wird der Prozess bezeichnet, nach dem jedes Produkt von der ersten Idee bis zur Serienproduktion entsteht. Dieser beginnt mit der Frühen Phase (vgl. Abbildung 7-1). Sie umfasst die Erarbeitung von Gesamtfahrzeug- und Produktionskonzepten, deren wirtschaftliche Bewertung und die Weiterentwicklung von Komponenten und Technologien. Für jedes neue Fahrzeugkonzept endet sie mit verbindlichen Produkt-, Markt-, Produktions- und Betriebswirtschaftszielen. Zielgedanke der sich anschließenden Serienentwicklung ist die schnelle und sichere Umsetzung des vereinbarten Fahrzeugkonzepts. Sie unterteilt sich in Abstimm-, Bestätigungs- und Reifephase.

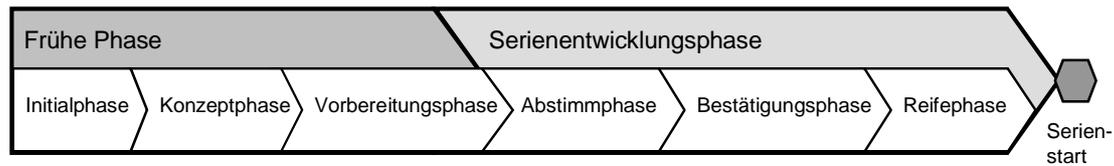


Abbildung 7-1: Übersicht der einzelnen Phasen des Produktentstehungsprozesses

Die Serienentwicklung startet mit dem Auftrag, den vereinbarten Produkt- und Projektzielkatalog umzusetzen, und arbeitet an der Realisierung des darin beschriebenen Fahrzeugkonzepts. Nach einer Reihe von Berechnungen und Simulationen wird das Konzept anschließend bestätigt. Prototypenteile aus seriennahen Werkzeugen werden bereitgestellt. Es erfolgt die Bestätigung von Komponenten- und Systemfunktionen im Gesamtverbund Fahrzeug, die Bestätigung der Herstellbarkeit auf Basis von Prozesssimulationen, die Darstellung der Gesamtfahrzeugeigenschaften gemäß dem Katalog der vereinbarten Ziele und die Freigabe des Montageprozesses. Zum Schluss wird die Funktions- und Dauerlauferprobung freigezeichnet, die Erstmusterfreigabe sowie die Serieneinsatzbestätigung für Produktionsprozess und Produkt vorgelegt. Damit werden die Anlauf-tauglichkeit und der Serienanlauf in letzter Instanz beurkundet.

Der Synchronisationsplan stellt dabei eine Übersicht aller Phasen der Entwicklung dar. Er dokumentiert gewissermaßen die Entstehung eines Automobils „von der Idee bis zum Serienstart“. Dieser Plan ist ähnlich einem Projektplan aufgebaut und zeigt den hinsichtlich Zeit und Ablauf geregelten Prozess der Produktgestaltung. Er dokumentiert alle zur Entwicklung des Fahrzeugs notwendigen Prozesse und die wichtigsten Meilensteine (Quality Gates) zur Entwicklungssteuerung. Zu den Meilensteinen müssen jeweils bestimmte Ergebnisse bzw. Erkenntnisse vorliegen, um über den weiteren Verlauf des Projektes zu entscheiden. Werden die jeweils zu den Meilensteinen festgelegten Ziele nicht erreicht, müssen Maßnahmen vereinbart werden, um diese Defizite zu beheben. Das führt zu Eindeutigkeit und Verlässlichkeit im gesamten PEP unter Vermeidung sonst üblicher Iterationsschleifen [95]. Zu jedem Quality Gate wird die Erreichung der Ziele im Fahrzeugprojekt abgefragt.

Der PEP unterscheidet sich wesentlich von der früheren Vorgehensweise in der Automobilentwicklung. Die aufeinander aufbauenden, hintereinander ablaufenden Prozesse sind inzwischen Vergangenheit. Denn der Verlass auf die 100-prozentige

Leistungserfüllung der Vorstufe erwies sich meist als illusorisch und im Anspruch zu hoch. Fehler waren vorprogrammiert und stellten sich auch ein [38]. Statt nacheinander werden viele Aufgaben parallel erledigt.

Die gesamte Organisation orientiert sich heute an Neuanläufen als selbstverständlichem Normal eines dynamischen Produktionsprozesses. Baureihenorganisation ist Pflicht, projektorientiertes Vorgehen Kür, vernetztes Denken immer mehr ein Muss des täglichen Handelns [38].

So werden im PEP Produkte entwickelt und Produktionsprozesse geplant. Dazu werden Ziele und Anforderungen an Produkte und Prozesse formuliert, die interdisziplinäre Zusammenarbeit in den Fach- und Integrationsprozessen synchronisiert und erforderliche Maßnahmen eingeleitet und verfolgt. Vor allem in der Frühen Phase der Produktentstehung getroffene Maßnahmen stellen aufgrund der Chance der frühen Weichenstellung für das gesamte Entwicklungsprojekt auch eine große Herausforderung dar. Ihre Bedeutung kann laut Meerkamm nicht hoch genug eingestuft werden [67]. Zum Einen sind sie sehr wichtig, da hier ein Großteil der Kosten und Produkteigenschaften festgelegt wird, obwohl die vorhandenen Informationen über das zu entwickelnde Produkt noch gering sind. Die zu Beginn eines PEP getroffenen Entscheidungen beeinflussen Qualität, Kosten und Entwicklungszeit eines zukünftigen Produktes in höchstem Maße. Zum Anderen können Fehlentscheidungen in dieser Phase zu katastrophalen Spätfolgen führen, die erst bei der Entwicklung, Herstellung, Kontrolle oder Nutzung des Produkts entdeckt werden und dadurch hohe Kosten verursachen können. Hinzu kommt, dass Produktrenditen in den frühen Phasen der Markteinführung mit geprägt werden, eine Phase in der auch die Kunden preisbereiter auf die Dynamik des Marktes reagieren. Die Beherrschung der Fahrzeugentwicklung avanciert so zu einem bedeutenden Erfolgsfaktor deutscher Automobilunternehmen [7]. Reithofer, Produktionsvorstand der BMW AG, unterstreicht dies mit seiner Aussage: „Wenn wir ein neues Produkt statt in neun Monaten vielleicht in drei Monaten auf volle Produktionskapazität fahren, dann bedeutet das bares Geld für das Unternehmen.“ [82]

Um die Herausforderungen der Zukunft im komplexen Entstehungsprozess eines Automobils zu erfüllen, tritt das frühzeitige Erkennen von Zielkonflikten immer mehr in den Vordergrund. Anhand einer Fallstudie wurde untersucht, ob das stochastische Risikomodell die Projektverantwortlichen dabei unterstützen kann. Dafür wurde der PEP eines Automobils begleitet.

Zum Abbilden des PEP wurden mit anlaufferfahrenen Experten die Frühe Phase und die Serienentwicklungsphase analysiert, die Kernprozesse identifiziert, Prozessziele definiert und gewichtete Wirkketten und Zusammenhänge abgeleitet [46].

Darauf aufbauend sind die wichtigsten Ziele und Prozesse, deren Eigenschaften, Zusammenhänge und weitere benötigte Informationen ins Tool ProViS eingepflegt worden.

Die aktuelle Projektsituation der Fallstudie wurde regelmäßig ins ProViS übertragen und die Erreichbarkeit der Ziele prognostiziert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden im Abschnitt 7.2.3 erläutert.

### **7.2.2 Verifizierung der neuen Anwendung**

Mit vielen Testprojekten und der Fallstudie sind Plausibilitätstests und Sensitivitätsanalysen durchgeführt worden. Dabei wurde untersucht, ob das neue Modell im Tool ProViS richtig abgebildet ist.

Folgende Verifizierungsschritte werden durchgeführt. Elemente zu Risiko und Chance bleiben zunächst abgeschaltet, um allein die Abhängigkeitslogiken zu überprüfen.

#### **Positive Vorgaben**

Die Startprozesse werden mit optimalen Ergebnissen hinterlegt. Im Simulationslauf werden bei allen Prozessen die optimalen Ergebnisse errechnet (vgl. Abbildung 7-2). Dies entspricht den Erwartungen, da die Startprozesse bei abgeschalteten Risiko- und Chancenlogiken mit ihren optimalen Werten abschließen und kein Faktor im Verbund die Werte ins Negative beeinflusst. Die Kenngrößen Druck und Kraft zeigen, dass keine Abweichungen im Projekt existieren. Die anderen Kenngrößen Restchance bzw. Restressourcen haben in diesem Fall keine Werte. Die Verbindungskanten in Abbildung 7-2 stellen die effektive Ergebnissensitivität dar. Dabei zeigt die Dicke und die Farbe der Verbindung den jeweiligen Einfluss des Vorgängers an.

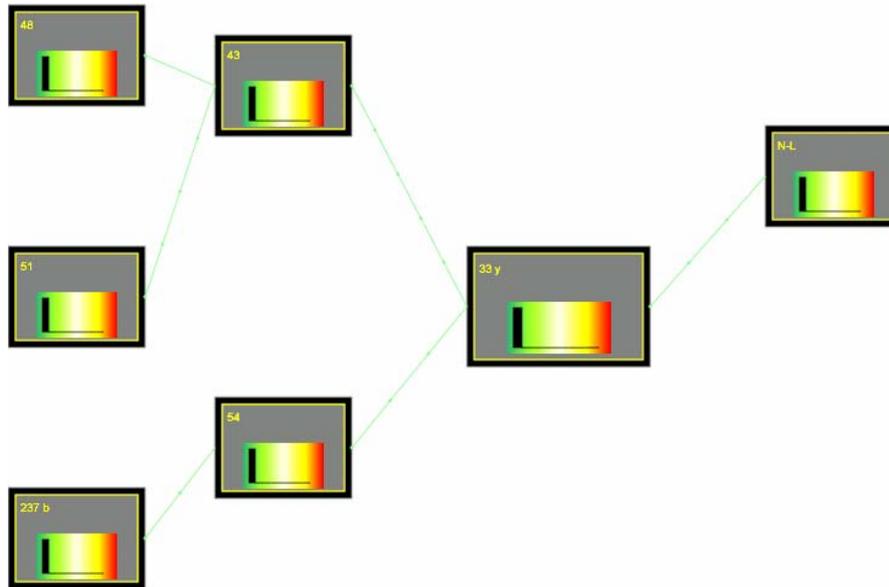


Abbildung 7-2: Ergebnisentwicklung unter positiven Vorgaben und beim Abschalten von stochastischen Einflüssen (Darstellung in der Detailansicht)

### Negative Vorgaben

Bei schlechten Werten an den Startprozessen setzen sich die negativen Vorgaben fort. In keinem Bereich des Projektes sind Faktoren hinterlegt, die das Ergebnis ins Positive verschieben. Auch diese Ergebnisse entsprechen den Erwartungen. In den Kenngrößen Druck und Kraft sind die Abweichungen ersichtlich (vgl. Abbildung 7-3).

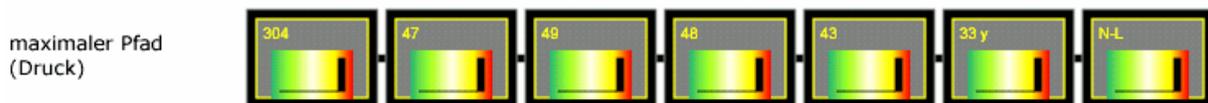


Abbildung 7-3: Ergebnisentwicklung unter negativen Vorgaben und beim Abschalten von stochastischen Einflüssen (Darstellung in der Pfadansicht)

### Veränderung der Vorgaben

Die Ergebnisse der Startprozesse werden schrittweise vom schlechten zum guten Wert verändert. Dabei setzt sich diese sukzessive Veränderung der Werte in allen Prozessen je nach Abhängigkeit fort. In den Kennzahlen können die Änderungen verfolgt werden. Auch dies entspricht den Erwartungen (vgl. Abbildung 7-4).

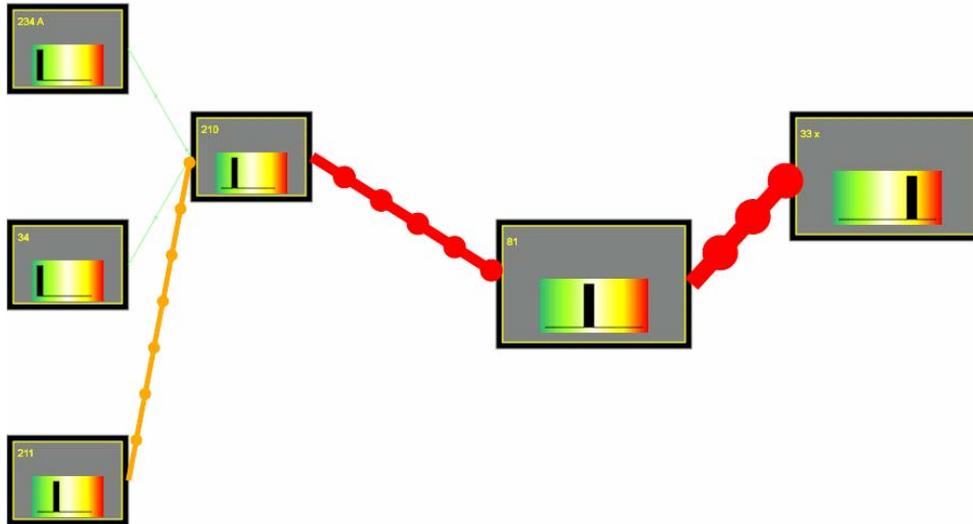


Abbildung 7-4: Effekte aus schrittweise Veränderung der Eingangsdaten

### Nutzen von Verbesserungspotenzialen

Der vorhergehende Test wird noch einmal durchgeführt. Dabei werden bei ausgewählten Prozessen Zusatzressourcen erlaubt. Die Ergebnisse dieser Testläufe werden mit den vorhergehenden Ergebnissen verglichen, in dem die Zusatzressourcen ausgeschaltet waren. Die eindeutige Verbesserung der Ergebnisse erfüllt die Erwartungen (vgl. Prozess 81 und 33x in Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5).

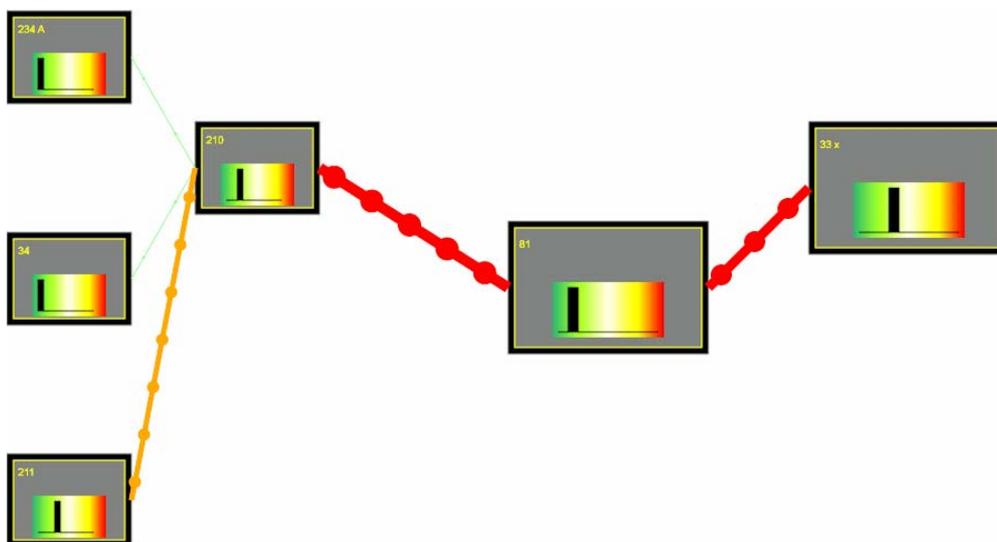


Abbildung 7-5: Positive Effekte nach Nutzen des Verbesserungspotenzials

Beim anschließenden Test mit den gleichen Prozessen werden wieder keine Zusatzressourcen erlaubt. Dafür dürfen einige Prozesse länger arbeiten. Die nachfolgenden

Prozesse erhalten alle bessere Ergebnisse und jeweils eine Verspätung. Wenn keine Zeitpuffer zwischen den Prozessen enthalten sind, wird die Projektlaufzeit verlängert. Dieses Verhalten wurde in den Testläufen nachgewiesen. Im Anschluss wurden bei den Anfangsprozessen Zusatzzeiten erlaubt und bei den Endprozessen nur Zusatzressourcen gestattet. Diese Parameter (Zusatzzeit und Zusatzressourcen) wurden so lange verändert bis das Ergebnis optimal war und die Projektlaufzeit nicht verlängert wurde. Die Reaktion der Prozesse und deren Kennzahlen auf Verbesserungspotenziale sowie die Sensitivität untereinander bestätigten die Annahmen.

### **Aktivierung von Risiko und Chance**

Werden verschiedene Werte für Risiko und Chance in das Testprojekt eingepflegt, so stellen sich die erwarteten Ergebnisstreuungen ein. Bei großen Wahrscheinlichkeiten verschieben sich alle Ergebnisse in die jeweilige positive oder negative Richtung. Gleichzeitig entsteht eine Streuung der Kennzahlen. Dabei lässt sich erkennen, dass der Verlauf der Verteilungsfunktion von Risiko und Chance sich in der Streuung der Ergebnisse und den anderen Kennzahlen widerspiegelt (vgl. Abbildung 7-8). Wird die Spannweite der möglichen Ausmaße von Risiko- und Chancenwerten erhöht, so entsteht entsprechend eine größere Streuung der Ergebnisse.

Indem das Tool bei den Testmodellen immer die gewünschten Merkmale und Eigenschaften gezeigt hat, erhöht es die Zuversicht, dass das Modell im Tool richtig implementiert worden ist.

### **7.2.3 Validierung des neuen Konzeptes**

In der Validierung wird überprüft, ob das Modell die Realität wiedergibt. Diese Überprüfung kann durch die Beantwortung der folgenden Frage durchgeführt werden: Entsprechen die Ergebnisse des Modells dem realen Ergebnisverlauf? Folgende Validierungsstrategie wurde herangezogen.

- Ein Fahrzeulanlauf wurde dabei über 30 Monate begleitet, um Risikoprognosen zu erstellen. Hierbei konnten viele Merkmale von komplexen Projekten in der Konzeption und Implementierung berücksichtigt werden.
- Eine regelmäßige Risikoaussage wurde anhand des ausgesuchten Modellanlaufs und der aktuellen Projektsituation erstellt. In den Projektsitzungen wurden diese Erkenntnisse dargelegt und mit den Expertenmeinungen verglichen. Mit dem Projektleiter und den Prozessverantwortlichen wurden die Ergebnisse der Prognose regelmäßig diskutiert. So wurde das Modell verfeinert.
- Mit dieser Vorgehensweise konnte sehr früh eine stabile Prognose der Prozess- und Projektziele erreicht werden. Bereits 23 Monate vor Serie konnten Ergebnisabweichungen in den Folgeprozessen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% vorhergesagt werden.
- Um auch Bedenkenträger zu überzeugen, wurde in den ersten Monaten die Prognose erstellt, aber es wurden darauf basierend keine Maßnahmen vom Projektteam eingeleitet. Somit konnte jeden Monat verfolgt werden, ob die prognostizierten Ergebnisse eintreten. Diese Vorgehensweise zeigte deutlich, dass der prognostizierte Ergebnisverlauf nur minimal (3%) vom realen Verlauf abwich.
- Das Projektgeschehen wurde fortlaufend analysiert, ungenaue Abhängigkeitsbeschreibungen angepasst und fehlende Kenngrößen zur Entscheidungsfindung in die Modellierung aufgenommen. Die restlichen Vorhersagen bewegten sich im Rahmen der Vertrauensbereiche. Die wenigen Abweichungen außerhalb der Konfidenzintervalle konnten durch die Experten erklärt, nachträglich in der Modellierung berücksichtigt und durch die Simulation gezeigt werden.
- Bis zum Serienstart des neuen Fahrzeugs wurde das neue Modell monatlich angewendet. Mit dem Projektverantwortlichen wurden die Ergebnisse diskutiert und Maßnahmen eingeleitet.
- Die Ergebnisprognose etablierte sich als feste Steuergröße in der regelmäßigen Projektsitzung.
- Eine Rückbetrachtung der Prognose nach Serienstart verdeutlichte noch einmal für alle Beteiligten, dass die prognostizierten Ergebnisse die eingetretene Realität sehr gut wiedergegeben haben. Das vorhergesagte Projektergebnis ist mit einer Abweichung von 5% eingetreten. Das stochastische Risikomodell wurde im Fall-

beispiel mit Erfolg angewendet und wird bereits für andere Modellanläufe herangezogen.

Die Entscheidung, die methodenunterstützte Risikoverfolgung und Ergebnisprognose nicht nur im Fallbeispiel durchzuführen, sondern für alle Neuanläufe im Unternehmen als Entscheidungsgrundlage für die Projektleiter zur Verfügung zu stellen, bestätigt, dass das Modell für komplexe Projektabläufe einen wertvollen Beitrag liefert, um Risiken zu verfolgen.

### **7.2.4 Auswertung der Simulationsergebnisse**

Anhand ausgewählter Prozesse aus der Fallstudie (vgl. Anhang A) werden Versuche mit dem neuen Modellierungswerkzeug ProViS vorgestellt. Der experimentelle Aufbau dient zur Demonstration von Anwendbarkeit und Aussagekraft der stochastischen Risikomodellierung.

#### **Identifikation von Ergebnisabweichungen**

In der Matrixansicht erkennt der Projektleiter, welche Prozessergebnisse im kritischen Bereich liegen bzw. eine starke Streuung besitzen. In Abbildung 7-6 wird z.B. Prozess 81 mit hoher Wahrscheinlichkeit sein Ergebnis nicht erreichen. Weiterhin können in der Matrixansicht die direkten Vorgänger und Nachfolger eines Prozesses farblich sichtbar gemacht werden. Dadurch werden erste Abhängigkeitsbeziehungen analysiert. Prozess 81 wird direkt von der starken Ergebnisstreuung des Prozesses 210 beeinflusst. Auf den Prozess 210 wirken die Vorgänge 211, 234A und 34.

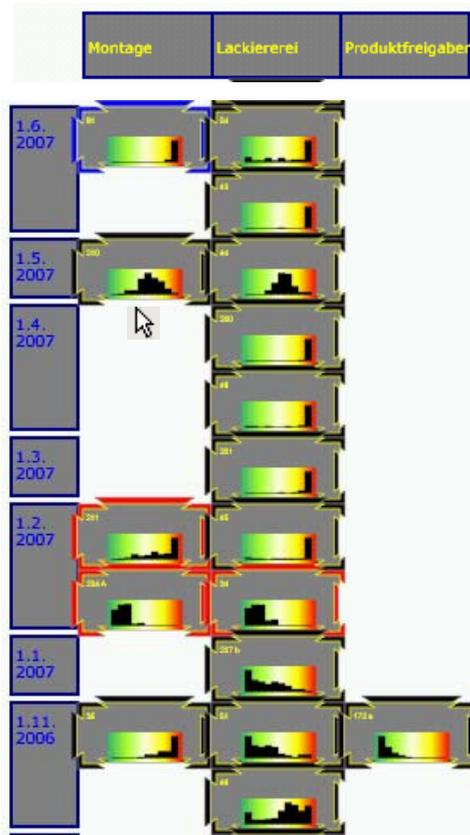


Abbildung 7-6: Ausschnitt aus der Matrixansicht

### Herkunftsbestimmung von Abweichungen

Eine detaillierte Auskunft über die Kenngrößen liefert die Wertansicht der Prozesse. In ihr ist ablesbar, dass Prozess 81 eine mittlere Abweichung von ca. 96% aufweist (vgl. Abbildung 7-7). Der angegebene Vertrauensbereich (vgl. in Abbildung 7-7 die dritte Zeile im Ergebnisfeld) schätzt das Ergebnis mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,5% im Konfidenzintervall von 94% bis 97% ein. An der Kenngröße Kraft ( $\gg 1$ ) ist bereits zu erkennen, dass auf diesen Prozess ein hoher Grad an Abweichungen durch Vorgängerprozesse wirkt. Dem entgegen steht im Prozess eine kleine Fläche ( $< 1$ ). Daraus resultierend ergibt sich ein sehr hoher Druck (ca. 30). D.h. die externen Abweichungen sind ca. 30 mal höher als die im Prozess existierenden Möglichkeiten diese abzufangen. Das Ergebnis des Prozesses wird durch Vorgängereinflüsse extrem verschlechtert. Nicht nur eine hohe Ergebnisabweichung sondern auch ein hohes Stresspotenzial bei den Mitarbeitern sind die Folge. Deshalb ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Ergebnis durch diesen Stress nochmals verschlechtert, sehr hoch.

Weitere Informationen geben die Kenngrößen **Einfluss von Chance und Risiko** sowie **Kombination von Chance, Zusatzressourcen, Zeitpuffer und Risiko**. In beiden Fällen wird in Prozess 81 ein negativer Ergebniswert ermittelt. Das bedeutet, dass der Prozess ungeachtet aller Vorgängereinflüsse sein Ergebnis durch Vergleich von Chance und Risiko um ca. 6% verschlechtern würde. Durch den Einsatz von Zusatzressourcen und Aufbrauchen des Zeitpuffers könnten diese 6% auf gerade 1% verbessert werden (**Kombination von Chance, Restressourcen, Zeitpuffer und Risiko**). Der Prozess würde aufgrund seines hohen Risikos Abweichungen nicht abpuffern können. Es gilt die Vorgänger zu identifizieren, die den Prozess am stärksten beeinflussen.

Prozesse											
	Ergebnis	Kraft (Kennzahl)	Fläche (Kennzahl)	Druck (Kennzahl)	mögliche Ergebnisverbesserung durch			Einfluss von Chance und Risiko (Ergebniswert)	Kombination von Chance, Zusatzres., Zeitpuffer und Risiko (Ergebniswert)	Passiv / Aktiv (Ergebniswert)	
					Restchance (in %)	Zusatzres. (in %)	Zeitpuffer (in %)				
33 y	97,4 [82,7 ... 100,0] [96,5 ... 98,3]	78,05 [3,61 ... 159,70]	0,93 [0,91 ... 0,95]	82,44 [0,77 ... 164,11]	0,00 [0,00 ... 0,00]	20,4 [18,6 ... 22,2]	0,0 [0,0 ... 0,0]	-9,0 [-11,5 ... -6,5]	11,4 [8,3 ... 14,4]	Passiv 34,1 [30,5 ... 37,6]	1,0 [0,7 ... 1,3]
33 x	99,7 [86,7 ... 100,0] [99,5 ... 99,9]	79,19 [53,73 ... 104,66]	0,89 [0,87 ... 0,91]	90,43 [61,82 ... 119,04]	0,00 [0,00 ... 0,00]	19,6 [18,5 ... 20,7]	0,0 [0,0 ... 0,0]	-14,5 [-16,5 ... -12,4]	5,2 [3,2 ... 7,1]	Passiv 7,9 [6,4 ... 9,5]	3,5 [2,5 ... 4,4]
210	62,7 [16,3 ... 100,0] [80,4 ... 65,0]	1,93 [1,85 ... 2,01]	0,91 [0,90 ... 0,93]	2,17 [2,06 ... 2,28]	0,00 [0,00 ... 0,00]	0,8 [0,6 ... 1,0]	1,8 [1,5 ... 2,2]	-11,4 [-13,3 ... -9,5]	-8,7 [-10,7 ... -6,6]	Aktiv 44,7 [42,9 ... 46,5]	91,9 [90,7 ... 93,2]
234 A	15,5 [0,0 ... 46,4] [14,0 ... 17,1]	1,00 [1,00 ... 1,00]	0,96 [0,94 ... 0,98]	1,06 [1,04 ... 1,08]	0,00 [0,00 ... 0,00]	10,7 [9,9 ... 11,5]	3,0 [2,3 ... 3,8]	-5,8 [-8,0 ... -3,5]	7,9 [5,8 ... 10,0]	Aktiv 0,0 [0,0 ... 0,0]	7,4 [6,4 ... 8,4]
34	18,7 [0,0 ... 50,0] [16,7 ... 20,7]	1,00 [1,00 ... 1,00]	0,95 [0,93 ... 0,98]	1,08 [1,05 ... 1,10]	0,00 [0,00 ... 0,00]	10,4 [9,6 ... 11,1]	2,3 [1,6 ... 3,1]	-7,2 [-9,9 ... -4,5]	5,5 [3,0 ... 8,0]	Aktiv 0,0 [0,0 ... 0,0]	8,4 [6,7 ... 10,1]
211	79,3 [20,1 ... 100,0] [76,3 ... 82,4]	10,11 [5,51 ... 14,71]	0,96 [0,94 ... 0,98]	11,70 [5,84 ... 17,56]	0,00 [0,00 ... 0,00]	11,0 [9,9 ... 12,1]	3,0 [2,0 ... 4,0]	-6,1 [-8,7 ... -3,5]	7,8 [5,0 ... 10,6]	Passiv 69,4 [66,1 ... 72,6]	35,3 [34,0 ... 36,6]
43	4,5 [0,0 ... 5,0] [4,4 ... 4,7]	17,77 [10,64 ... 24,91]	0,97 [0,95 ... 0,99]	19,57 [11,87 ... 27,26]	0,01 [-0,01 ... 0,02]	15,3 [13,8 ... 16,8]	3,7 [2,9 ... 4,5]	-0,2 [-0,4 ... -0,1]	3,7 [2,1 ... 5,3]	Passiv 70,9 [67,6 ... 74,3]	25,9 [22,3 ... 29,5]
81	95,5 [25,7 ... 100,0] [94,1 ... 96,9]	46,42 [16,51 ... 76,33]	0,97 [0,95 ... 0,99]	54,84 [14,70 ... 94,98]	0,00 [0,00 ... 0,00]	2,6 [1,7 ... 3,4]	2,1 [1,6 ... 2,5]	-5,7 [-8,6 ... -2,9]	-0,9 [-2,9 ... 1,7]	Passiv 91,9 [80,7 ... 93,2]	3,1 [1,9 ... 4,3]
44	98,0 [0,0 ... 100,0] [96,7 ... 99,4]	71,31 [34,91 ... 107,72]	0,94 [0,93 ... 0,96]	83,99 [38,71 ... 129,26]	0,06 [-0,06 ... 0,17]	20,5 [19,0 ... 21,9]	81,5 [76,6 ... 86,4]	-7,4 [-9,5 ... -5,4]	94,5 [89,2 ... 99,9]	Passiv 97,5 [96,0 ... 99,0]	4,9 [4,0 ... 5,8]
172 a	12,4 [0,0 ... 40,5] [10,8 ... 14,1]	1,00 [1,00 ... 1,00]	0,98 [0,96 ... 0,99]	1,04 [1,02 ... 1,06]	0,00 [0,00 ... 0,00]	8,7 [7,9 ... 9,5]	11,9 [10,4 ... 13,3]	-3,6 [-5,6 ... -1,5]	17,0 [15,5 ... 18,5]	Aktiv 0,0 [0,0 ... 0,0]	2,7 [1,8 ... 3,6]
35	85,4 [40,9 ... 100,0] [83,2 ... 87,6]	7,18 [5,73 ... 8,64]	0,93 [0,91 ... 0,94]	8,08 [6,34 ... 9,83]	0,00 [0,00 ... 0,00]	1,4 [1,0 ... 1,7]	21,6 [19,1 ... 24,2]	-9,1 [-10,9 ... -7,2]	14,0 [11,1 ... 16,8]	Aktiv 53,6 [51,2 ... 56,0]	66,6 [63,3 ... 70,0]
234 B	15,5 [0,0 ... 48,6] [14,0 ... 16,9]	1,00 [1,00 ... 1,00]	0,96 [0,94 ... 0,97]	1,06 [1,05 ... 1,08]	0,00 [0,00 ... 0,00]	11,1 [10,4 ... 11,9]	7,0 [5,7 ... 8,3]	-5,9 [-8,1 ... -3,8]	12,2 [10,2 ... 14,2]	Aktiv 0,0 [0,0 ... 0,0]	6,9 [5,7 ... 8,0]

Abbildung 7-7: Ausschnitt aus der Werteansicht

### Ermittlung von Gegenmaßnahmen

In der Detailansicht können die Verursacher der Abweichungen erkannt werden. Die Vorgängerprozesse 210, 211 und 35 sind maßgeblich am schlechten Ergebnis von Prozess 81 beteiligt (vgl. Verbindungskanten in Abbildung 7-8).

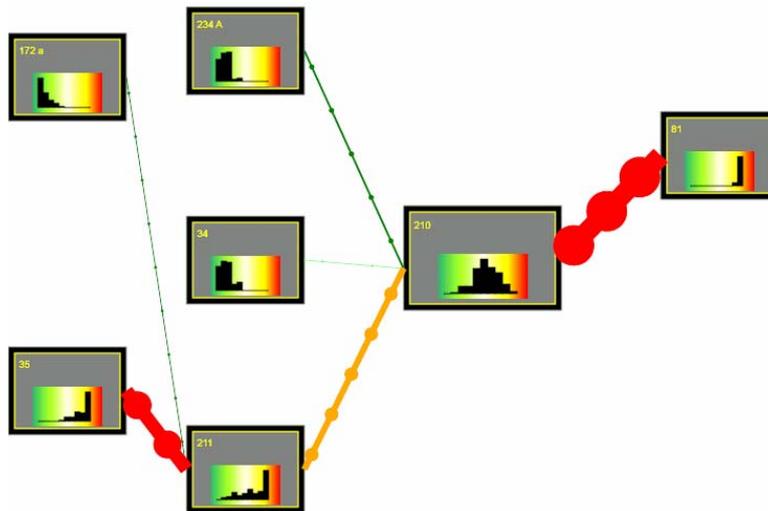


Abbildung 7-8: Detailansicht (am Beispiel effektiver Ergebnissensitivität)

In der Pfadansicht bestätigt sich diese Erkenntnis. Die erwähnten Prozesse liegen zusammen mit Prozess 81 auf dem effektiven und effizienten Ergebnissensitivitätspfad (vgl. Abbildung 7-9). Sie haben einen unmittelbaren Einfluss auf das Projektergebnis. Da Prozess 81 selbst keine Verbesserungsmöglichkeiten mehr besitzt (vgl. unsicherer Pfad in Abbildung 7-9 und Abbildung 7-7), kann dieser Engpass entschärft werden, indem die Vorgängerprozesse 210, 211 und 35 verbessert werden. Diese Maßnahmen sind erfolgversprechend, da der Prozess 81 passiv ist und somit positiv auf die Verbesserung der Vorgänger reagieren wird (vgl. Liste passiver Prozesse in Abbildung 7-9 und Abbildung 7-7).

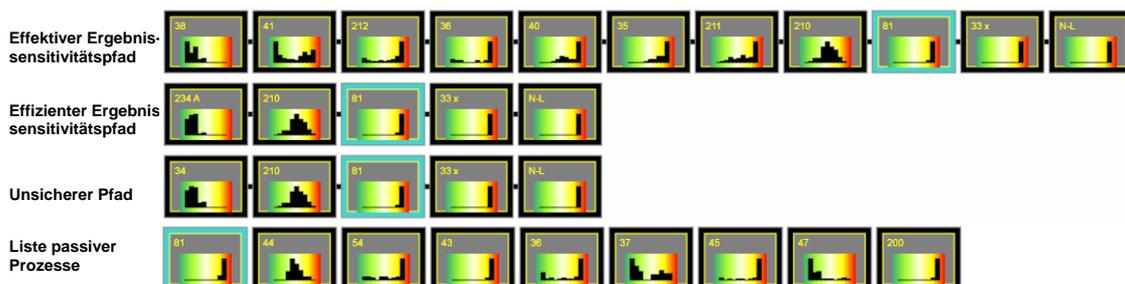


Abbildung 7-9: Ausschnitt aus der Pfad- und Listenansicht

### Zugabe von Zusatzressourcen

Durch Hinzufügen von Zusatzressourcen in den Vorgängen 35, 211 und 210 kann der Prozess 81 deutlich verbessert werden. Doch bei diesen drei Prozessen wurden nicht ausreichend Zusatzmittel geplant (vgl. Abbildung 7-7). Eine Verdopplung der zusätzlichen Ressourcen würde das folgende Ergebnis in Abbildung 7-10 liefern.

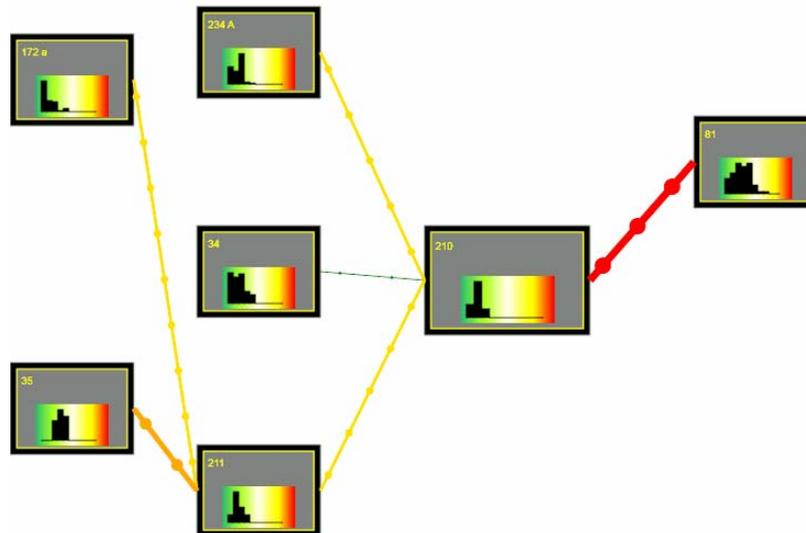


Abbildung 7-10: Detailansicht nach Nutzung der Zusatzressourcen

Der Simulationslauf verdeutlicht, dass eine Erhöhung der Zusatzressourcen sinnvoll wäre und zu einem sichtbar besseren Ergebnis im Prozess 81 führen würde.

### Lokale Verbesserung – globale Verschlechterung

Eine Verbesserung des Prozesses 81 kann auch erreicht werden, indem die Vorgängerprozesse eine längere Bearbeitungslaufzeit erhalten.

Im nächsten Experiment wird die Laufzeit vom Prozess 35 so weit verlängert, bis er alle Risiken abfangen und sicher sein optimales Ergebnis an seinen Nachfolger weitergeben kann (vgl. Abbildung 7-11).

Eine wichtige Wechselbeziehung wird in diesem Experiment ersichtlich. Durch die Zeitverlängerung wird zwar lokal (35-211) ein besseres Ergebnis weitergegeben, da der Zeitpuffer von 35 und 211 ausreichend ist. Die dadurch entstandene Zeitverschiebung belastet global das Projekt mehr und erhöht den Druck. Die Nachfolgeprozesse erhalten für ihren Prozess weniger Zeit. Es wird für sie ein schlechterer Wert prognostiziert.

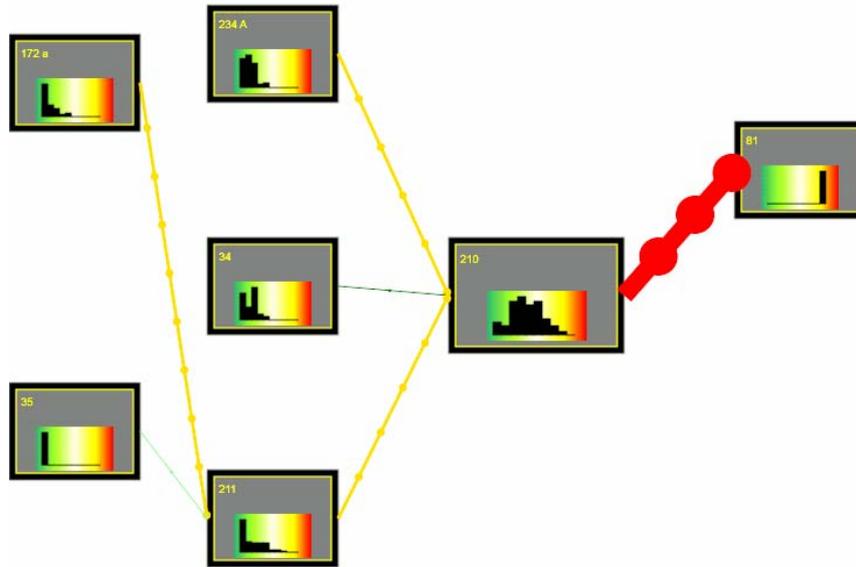


Abbildung 7-11: Detailansicht nach Zeitverlängerung im Prozess 35

### Parallelisierung

Es konnte trotz Nutzung der Zusatzressourcen und Zeitverlängerung nicht das optimale Ergebnis erreicht werden. Ein weiteres Experiment teilt den Prozess 81 in zwei parallel laufende Vorgänge ein. Diese Teilprozesse haben jeweils die halbe Laufzeit von Prozess 81. Den dadurch entstehenden Zeitpuffer nutzt der Prozess 210, um seine Prozesslaufzeit zu verlängern. Dieser Prozess kann nun durch gute Ergebnisvorgaben und durch Anwenden des internen Verbesserungspotenzials alle Abweichungen mit hoher Wahrscheinlichkeit abfangen und das optimale Ergebnis an die Nachfolgeprozesse weitergeben.

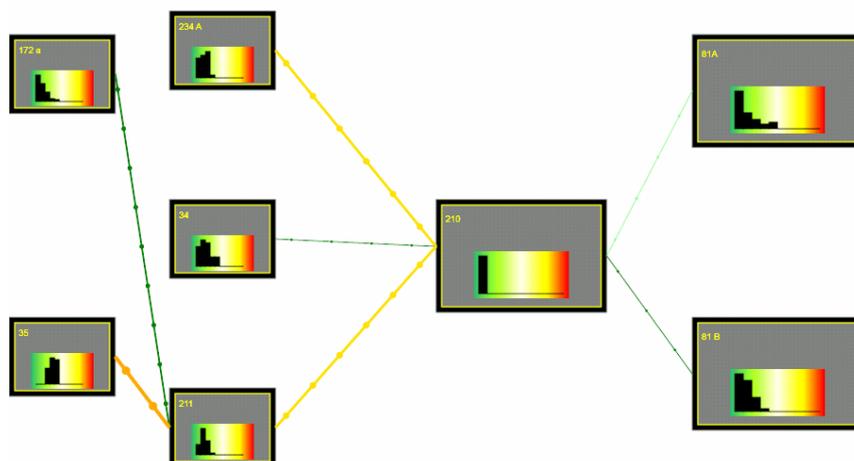


Abbildung 7-12: Ergebnisverbesserung durch Parallelisierung

Die Prozesse 81A und B erhalten ein deutlich besseres Ergebnis. Dies resultiert auch daraus, dass die internen Risiken im Prozess durch die Parallelisierung überschaubarer werden und sich verringern.

### Pfadwechsel

Durch diese Ergebnisverbesserung ist ein weiterer Effekt eingetreten. Die Prozesse sind nicht mehr auf dem Pfad mit der höchsten Wahrscheinlichkeit, den maximalen Druck auf das Projektziel auszuüben. Dieser Pfad besteht nun aus anderen Prozessen, die es zu untersuchen und verbessern gilt (vgl. Abbildung 7-13).

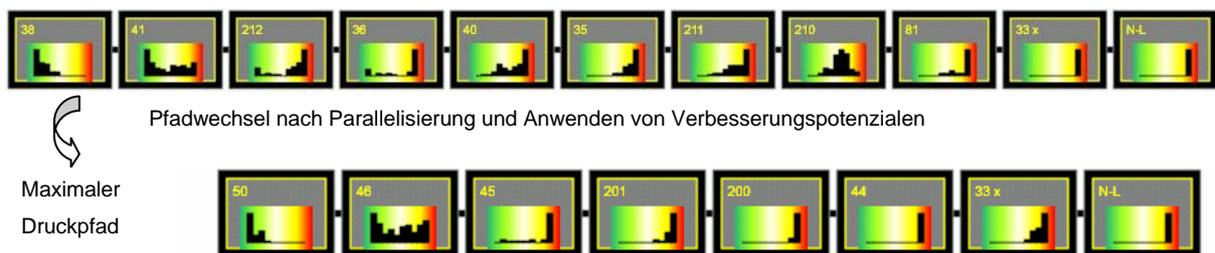


Abbildung 7-13: Pfadwechsel (Veränderung des Drucks im Projekt)

### Sensitivität in komplexen Projekten

In Abbildung 7-13 wird die Sensitivität der Folgeprozesse auf Abweichungen ersichtlich. Eine kleine Schwankung des Ergebnisses im Prozess 50 verursacht eine hohe Abweichung in den nachfolgenden Prozessen. Eine geringfügige Ergebnisverfehlung am Projektanfang multipliziert sich im weiteren Verlauf und beeinflusst das Projektergebnis negativ. Durch die Herkunftsbestimmung von Abweichungen und Einleitung der richtigen Maßnahmen an aktiven Prozessen kann dies unterbunden werden. In Abbildung 7-13 erfordert Prozess 46 ein sehr gutes Eingangsergebnis. Die Ergebnisverteilung zeigt außerdem, dass der Prozessverantwortliche den Ausgang seines Vorgangs nicht genau einschätzen kann und seinen Arbeitsumfang als sehr risikoreich einordnet. Doch das Gelingen dieses Prozesses ist für die Nachfolger entscheidend. Das wird durch die Verschlechterung der Nachfolgeprozesse in Abbildung 7-13 verdeutlicht. Die Kennzahlenanalyse signalisiert, dass eine optimale Ergebnisweitergabe des Prozesses den Druck im Projekt verringern würde. Im Simulator kann der Wert auf sein Optimum gesetzt werden, um die Auswirkung dieser Entscheidung zu überprüfen.

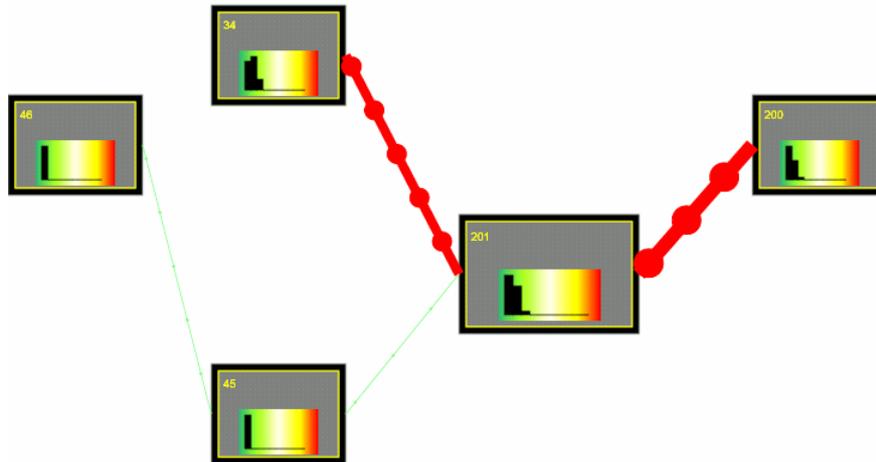


Abbildung 7-14: Übergabe des optimalen Ergebnisses vom Prozess 46

Das Simulationsexperiment bestätigt, dass zum Erreichen des Projektziels ein erfolgreicher Abschluss von Prozess 46 essentiell ist. Durch Erhöhung des Hauptaugenmerks auf diesen Vorgang kann eine wesentliche Fehlerquelle behoben werden.

Die verschiedenen Experimente zeigen, dass die Anwendung des stochastischen Risikomodells sowie ProViS das Verständnis in komplexen Projekten deutlich erhöhen. Es können nun gezielt Planvorgaben verändert, Anordnungsbeziehungen verschoben, Meilensteine aufgehoben, Bearbeitungszeiten variiert, Zusatzressourcen zugeteilt, Risiken identifiziert, neue Projektsituationen eingepflegt und Entscheidungen verifiziert werden.

## **8 Beurteilung der Ergebnisse und Ausblick**

### **8.1 Übersicht**

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit zusammengestellt. Die erreichte neue Qualität in der Modellierung und Simulation komplexer Projekte wird ausführlich erörtert. Die positiven Effekte für das Management dieser Projekte werden dargelegt. Dabei wird ansatzweise erläutert, für welche Anwendungsbereiche das stochastische Risikomodell in Verbindung mit dem Tool ProViS genutzt werden kann und welche weitreichenden Vorteile die neue Konzeption bietet.

### **8.2 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Es wurde ein neues Modell entwickelt, mit der die Dynamik und Flexibilität in komplexen Projekten realitätsnah abgebildet werden können. Es ist möglich, Risiken zu erkennen sowie Abweichungen im gesamten Projekt zu verfolgen. Durch Erweitern der Modellierung mit stochastischen Kenngrößen wie Chance und Risiko können Sicherheitspuffer und interne Gefährdungspotenziale berücksichtigt und somit die Flexibilität der Prozesse dargestellt werden. Neben dem tatsächlichen Abschlusstermin und den Projektkosten werden auch Ergebnisabweichungen im Projekt prognostiziert. Durch die quantitative und qualitative Beschreibung der Ergebnisabhängigkeiten zwischen den Prozessen können Abweichungen sowie deren Einfluss auf die nachfolgenden Vorgänge verfolgt werden. Flussgrößen, die im gesamten Projekt immer wiederkehren, wurden definiert und können im Modell verfolgt werden. Vor allem die eingeführten Ergebnissensitivitäten demonstrieren dem Prozessverantwortlichen anschaulich die Ausbreitung der Ergebnisabweichungen und das Vermögen der Prozesse, im gesamten Projektverlauf Abweichungen wieder kostenoptimal aufzuholen.

Auf dem Risikomodell aufbauend wurden viele weitere Kenngrößen ermittelt, um die Realität besser darzustellen. Das neue Modell wird dem Anspruch gerecht, Abweichungen, Unsicherheiten, relevante Einfluss- und Steuergrößen transparent darzustellen und deren Einfluss auf den Projektabschluss deutlich zu machen. Eine

zusätzliche Erleichterung für die Projektverantwortlichen ist die anschauliche Darlegung der Prozesse, welche intern Potenzial zur Ergebnisverbesserung enthalten. Mit der Modellierung der Verbesserungspotenziale je Prozess wird die Analyse von Projektverläufen erleichtert. Es ist nun möglich, das Vermögen eines Prozesses in kostenneutral (Chance) und kostenintensiv (Zeitverlängerung, Zusatzressourcen) zu kategorisieren.

Durch die Einführung der Stochastik in die Modellierung können Vertrauensbereiche für Projektkenngößen berechnet werden. Diese Erweiterung ist im Fallbeispiel als sehr hilfreich und realistisch beurteilt worden. Mit Hilfe der stochastischen Größen in der Modellierung wurde die klassische Pfaddefinition auf stochastische Pfade erweitert. Es wurden neue Pfade eingeführt, die den Projektleiter sensibilisieren, welche Prozessfolgen mit höchster Wahrscheinlichkeit ihr Ergebnis nicht erfüllen bzw. welche Verbesserungsmöglichkeiten eingesetzt werden müssen, um das Projektergebnis zu optimieren. Die neuen Prozesslisten zeigen den Verantwortlichen singuläre Vorgänge, die die größte Sicherheit bzw. das höchste Risiko im gesamten Projekt enthalten.

Die Pfade sowie die Prozesslisten liefern dem Projektleiter einen optimalen und ganzheitlichen Überblick über kritische Prozesse und bieten eine Auswahl von Gegenmaßnahmen zur Erreichung der Projektziele.

Die neuartige, psychologische Kenngröße Druck gewann im Laufe dieser Arbeit deutlich an Bedeutung. Sollte sie anfangs "nur" die Belastung des Prozesses wiedergeben, so ist es nun ebenfalls möglich, Rückschlüsse auf den Grad der Abpufferung von Abweichungen bzw. den Grad der Verstärkung von Abweichungen zu ziehen. Mit Hilfe des Parameters Druck kann in einem Projekt gezeigt werden, dass einmal aufgetretene Abweichungen sich nicht zwingend bis zum Ende des Projektes fortpflanzen.

Durch die Simulationsfunktion können Entscheidungen überprüft und deren Auswirkungen durch ein ausgiebiges Angebot an Kenngrößen beobachtet werden. Somit bietet die neue Konzeption dem Projektleiter eine Entscheidungsgrundlage, um seine aktuelle Projektsituation einzuschätzen und darauf aufbauend an den richtigen Stellen kostengünstige und effektive Maßnahmen einzuleiten. Der Projektleiter hat nun die Möglichkeit, gezielt in den Projektverlauf einzugreifen.

Im Tool ProViS sind alle Features des neuen Modells benutzerfreundlich und visuell ansprechend umgesetzt. Das Tool wurde so entwickelt, dass auch Nichtspezialisten alle Funktionen problemlos nutzen können.

Im Produktentstehungsprozess eines Automobils wurde das neue Modell getestet und zur Projektsteuerung und Risikoverfolgung erfolgreich eingesetzt. Die aufgestellten Anforderungen und Erwartungen an ein neues Modell konnten durch die stochastische Risikomodellierung erfüllt werden.

Es drängt sich nun die Frage auf, welche weiteren Vorteile mit dem neuen Modell für das Projektmanagement allgemein verbunden sind.

### **8.3 Nutzen des neuen stochastischen Risikomodells für das Projektmanagement**

Das neue Modell leistet einen wichtigen Beitrag für das Projektmanagement, indem bei Eintreten von ungeplanten Situationen trotzdem überlegt gehandelt werden kann. Sehr häufig wird eine kleine Abweichung in einem Prozess durch die direkten Nachfolgeprozesse überbewertet. Es wird ein höheres Risiko als wirklich vorhanden vermutet. Dadurch wird eine höhere Abweichung von ihren eigenen Prozessergebnissen an ihre Nachfolger weitergegeben. Diese Kette kann bis zum Projektabschluss weitergeführt werden. Hierbei schaukeln sich die Abweichungen scheinbar auf und es werden unnötig hohe Zusatzressourcen beantragt. Der Druck auf den Projektleiter, seine Kosten-, Zeit- und Ergebnisziele zu erreichen, wird künstlich erhöht. Lokale Entscheidungen werden ohne Berücksichtigung der ganzen Dynamik des Projektes getroffen.

Diese Überreaktion ist bereits im Supply Chain Management unter dem Begriff Bullwhip-Effekt bekannt. Er bezeichnet das Phänomen der Variabilitätszunahme der Nachfrage vom Endkunden über den Handel bis zu den Produzenten und deren Zulieferern [32]. Der Bullwhip-Effekt resultiert hier aus den komplexen und dynamischen Abhängigkeiten von falschen Wahrnehmungen und verzerrten Systeminformationen in der Supply Chain [58].

Eine ähnliche Verhaltensweise ist auch bei komplexen und dynamischen Projekten zu beobachten. Ein Gedankenexperiment soll dieses Phänomen näher erläutern. Wenn z.B. ein Prozess in einer frühen Projektphase eine Verspätung von

einem Monat meldet und dabei bereits einen Sicherheitspuffer für sich einkalkuliert, interpretiert der direkte Nachfolger dies als Folge der Komplexität des Prozesses. Er gibt seinem Nachfolgeprozess eine Verspätung von zwei Monaten an und baut sich somit ein zusätzliches Polster auf mit der Überlegung, dass in seinem Prozess mehr schief gehen wird, als zunächst erwartet. Dessen Nachfolger wiederum hat den gleichen Gedankengang und fordert mehr Prozesslaufzeit bzw. Zusatzmittel. Diese Kette kann bis zum Endprozess weitergeführt werden.

Die Ursache für diesen Bullwhip-Effekt besteht in der Sicherheitsorientierung lokaler Verantwortlichkeiten, ohne auf die Dynamik und Komplexität Rücksicht zu nehmen. Erfahrungsgemäß antizipieren die Prozessverantwortlichen, dass sie nur die Hälfte an beantragten Zusatzressourcen bzw. -zeit erhalten und bewusst den eigenen Prozess mit erhöhtem Risiko planen. In komplexen Projekten führt dieses Sicherheitsdenken zu großen Schwierigkeiten. Es werden unnötige Sicherheitsbestände aufgebaut. Die vorhandenen Ressourcen werden länger als nötig gebunden, werden durch Zusatzmittel aufgestockt und verursachen ineffiziente Kosten. Falls diese Zusatzressourcen bzw. -zeit doch nicht benötigt werden, werden sie meist nicht zurückgegeben, sondern für andere Zwecke eingesetzt [78]. Die Projektkosten steigen.

Mit dem neuen Modell kann dieser Effekt unterbunden werden. Die Zielabweichungen können transparent dargestellt und verfolgt werden. Durch die eingebauten Kenngrößen werden die Auswirkungen von Abweichungen auf das Projektziel sehr gut beurteilt. Mit der Flussgröße Druck erhält der Projektleiter einen Einblick, ob durch eine Abweichung die Last auf die nachfolgenden Prozesse erhöht wird oder ob im Projekt ausreichend Elastizität und Sicherheitspuffer vorhanden sind. Dem Projektverantwortlichen werden diejenigen Prozesse grafisch angezeigt, die das Projektziel am meisten belasten und somit verbesserungsbedürftig sind. Der Projektleiter kann die ihm zur Verfügung stehenden Mittel viel effektiver nutzen, indem er nicht die Projektressourcen in die Prozesse investiert, deren Verantwortliche am lautesten schreien. Er kann durch eine umfassende Analyse und einen übersichtlichen Leitstand die Gefährdungspotenziale erkennen und durch hinreichende Kennzahlenbetrachtung die effizientesten Verbesserungspotenziale ableiten. Lokale Entscheidungen werden durch das neue Konzept in einem ganzheitlichen Ablauf überprüft und ihre möglichen Auswirkungen aufgezeigt. Dabei wird die Dynamik und Komplexität der Prozesse umfassend betrachtet.

Resultierende Abweichungen können verfolgt und der Einfluss auf die Nachfolger anschaulich demonstriert werden. Ein Bullwhip-Effekt kann durch Einsatz der neuen Modellierungs- und Simulationsmethode verhindert werden.

Das stochastische Risikomodell ist für die Steuerung von komplexen Projektverläufen ein wertvolles Werkzeug. Auf neue Projektsituationen muss nicht nur durch Expertenwissen subjektiv reagiert werden. Mit systemtechnischen Methoden wird der Einfluss ungeplanter Ereignisse auf das Projektziel objektiv und transparent veranschaulicht. Dabei wird durch die Simulationsfunktion, die abgebildeten Kennzahlen, die errechneten Pfade und Listen die optimale Maßnahmenwirksamkeit für das wahrscheinlich bestmögliche Projektergebnis ermittelt.

Ein Verantwortlicher (z.B. für Logistik- oder Montageumfänge) legt bei der Entscheidungsfindung nur auf die eigenen Prozesse einen sehr großen Fokus und erkennt die komplexen bereichsübergreifenden Wirkzusammenhänge nicht (vgl. Abbildung 8-1).

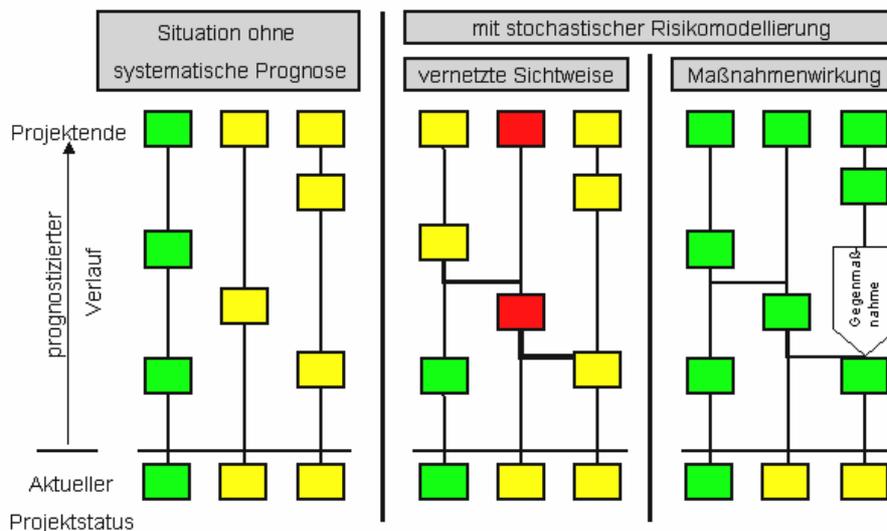


Abbildung 8-1: Prinzip der Wirkungsweise von Abweichungen in komplexen Projekten

Abbildung 8-1 zeigt, dass durch die stochastische Risikomodellierung eine vernetzte Sichtweise ermöglicht wird, um in der Projektsteuerung mit minimalem Aufwand das optimale Ergebnis zu erhalten.

Das neue Modell birgt nicht nur für die Projektsteuerung sondern auch für die Projektplanung sehr viel Potenzial in sich, was im Folgenden kurz vorgestellt wird. Nachdem ein Projekt in das Tool ProViS eingepflegt worden ist, kann schon zum

Projektbeginn die erste Simulation durchgeführt werden. Wenn dabei die Startprozesse auf ihr optimales Ergebnis gesetzt sind und trotzdem eine erhöhte Abweichung der Projektziele eintritt, bedeutet dies ein hohes, internes Risiko einiger Prozesse. Weitere Erkenntnisse für den Projektleiter bestehen im Fehlen von ausreichendem Zeitpuffer im Projekt und Sicherheitspuffern in den Prozessen. Im späteren Projektablauf werden höchstwahrscheinlich Zusatzmittel benötigt. Es besteht nun die Möglichkeit, durch eine weitere Simulation zu überprüfen, ob die Zusatzressourcen in den richtigen Prozessen eingeplant sind. Werden dadurch die Projektziele erreicht, sind die Zusatzressourcen richtig zugeordnet. Werden die Projektziele nicht erfüllt obwohl einige Vorgänge Restzusatzressourcen besitzen, wurden die beabsichtigten Zusatzmittel den falschen Prozessen zugewiesen. Der Projektleiter kann nun seinen Projektplan optimieren. Durch die vorhandenen Kennzahlen, Pfade und Listen können verschiedene Varianten für das Zusammenspiel der Prozesse analysiert werden. Zuerst können zwischen unsicheren Prozessen Zeitpuffer eingebaut werden. Dabei machen die Indikatoren kritischer Pfad bzw. minimal elastischer Pfad deutlich, in welchen Prozessen Zeitpuffer eingefügt werden können, ohne die gesamte Projektlaufzeit zu gefährden. Durch Darstellung des unsicheren Pfades erhält der Projektleiter eine optimale Übersicht über die verbesserungsbedürftigen Prozesse. Indem dieser Pfad den sicheren, Restchancen- und Restressourcen-Pfaden gegenübergestellt wird, könnten einige Vorgänge neu geplant werden. Dabei erhalten kritische Prozesse mehr Zusatzressourcen bzw. eine Verlängerung ihrer Laufzeit. Sicherem Prozessen, die ausreichend Sicherheitspuffer besitzen, werden weniger Laufzeit und Zusatzmittel zugewiesen.

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung des Projektplans besteht darin, aufeinander folgende kritische Prozesse zeitlich voneinander zu trennen. Es könnten Zwischenprozesse eingefügt werden, die einen hohen Anteil an elastischer Bearbeitungszeit besitzen. Somit können potenzielle Abweichungen von risikobehafteten Prozessen abgefedert werden.

Es kann vorkommen, dass Prozesse mit hohem Risiko auf einem Pfad liegen mit der höchsten Wahrscheinlichkeit, kritisch zu sein und dazu auch keine Chance mehr besitzen, Zusatzressourcen aufzunehmen. Diese Prozessketten sind unflexibel und haben ein hohes Potenzial, das Projektergebnis bzw. die Laufzeit zu gefährden.

In diesem Fall besteht die erste Notwendigkeit in der Prüfung der Ergebnis-sensitivitäten und des Druckes auf die unsicheren Prozesse aus den Vorgängern. Zielführend dabei ist die Ergebnisverbesserung der Vorgänger- bzw. Nachfolgeprozesse sowie die Verringerung des Druckes auf die nachfolgenden Prozesse.

Eine andere Möglichkeit besteht in der Parallelisierung einiger Prozesse. Dadurch wird der Zeitpuffer erhöht. Die Parallelisierung birgt weitere Vorteile in sich. Das Risiko in den Prozessen wird kleiner. Die Prozesse sind übersichtlicher, haben eine besser kalkulierbare Laufzeit und ein überschaubares Prozessziel. Auch die Chance wird geringer. Es sind in dem Prozess weniger Sicherheitspuffer enthalten, da der Leistungsumfang, somit das Risiko und die Laufzeit, eher abschätzbar sind. Der jeweilige Prozessverantwortliche wird eine realistischere Zeitangabe auf Grund von Prozesszeitverkürzung und -vereinfachung nennen.

Mit den beiden Möglichkeiten der Parallelisierung und Verbesserung der Nebenzweige kann der Projektverantwortliche den Druck im Projekt abpuffern und das Risiko senken.

Durch die umfangreiche Analysemöglichkeit und Simulationsfunktionalität ist es nun möglich, einen sicheren Projektplan zu generieren. Bereits zu Projektbeginn erkennt der Projektleiter Ungereimtheiten in der Struktur, kann Verbesserungspotenziale ermitteln und diese im Tool ausprobieren. Durch die möglichen Darstellungen der Matrix-, Werte-, Detail-, Pfad- und Listenansicht wird eine anschauliche und ganzheitliche Übersicht des Projektes abgebildet.

Eine zusätzliche Grafik (vgl. Abbildung 8-2) bietet einen ersten transparenten Überblick über die Projektplanungsreife hinsichtlich Risiken und Potenzialen.

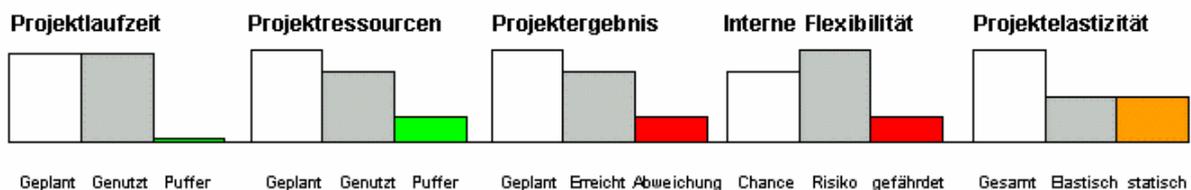


Abbildung 8-2: Plausibilitätsprüfung des Projektplans

Nach der Betrachtung des Projektplans mit optimalen Werten der Startprozesse können mit dem neuen Modell im nächsten Schritt Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Hierbei wird der Projektplan überprüft, wie sensibel das Projekt auf Veränderungen einzelner Prozesse reagiert. Im Tool ProViS kann die Funktionalität

der Ist-Wert-Eingabe dafür genutzt werden. Der Verantwortliche kann pro Projektabschnitt schrittweise die Prozesse innerhalb der angegebenen Toleranzbereiche auf ihre Maximal- bzw. Minimalwerte setzen. Die Auswirkungen dabei können durch die erwähnten Analysefunktionalitäten verfolgt werden. Vor allem die implementierten Ergebnissensitivitäten unterstützen den Projektleiter, die Einflussstärke der Prozesse untereinander zu erfassen. Der Verantwortliche gewinnt somit einen Eindruck über sensible Prozesse und über aktive Vorgänge, die eine hohe Wirkungsausbreitung besitzen.

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung des Projektplans kann bei der Zielvereinbarung mit den jeweiligen Prozessverantwortlichen genutzt werden. Bei der Zieldefinition werden neue Toleranzbereiche bestimmt, in denen die Prozessergebnisse schwanken dürfen. Durch die Berücksichtigung der Stochastik in der Modellierung werden Konfidenzintervalle für die Prozesskenngößen ermittelt. Diese Vertrauensintervalle können bei der Definition der Toleranzbereiche herangezogen werden. Der Projektleiter kann neue Eingriffsgrenzen definieren, ab welchem Zeitpunkt im Projekt reagiert werden muss. Bei kritischen Prozessen wird eine Kunden-Lieferanten-Vereinbarung sinnvoll. Hier werden einerseits die Zulieferprozesse von risikobehafteten Vorgängen sensibilisiert, dass eine Abweichung des eigenen Vorgangs zu einer starken Abweichungsfortsetzung in den Folgeprozessen führt. Andererseits vereinbaren die Nachfolger von unsicheren Prozessen, dass ausreichend Elastizität vorgehalten wird, um Zielverfehlungen abzupuffern. Im Projektverlauf wird der Status dieser Prozesse gezielt dargestellt und verfolgt. Durch die Abhängigkeitsanalyse erhalten alle Projektverantwortlichen eine ganzheitliche Übersicht über die Wirkzusammenhänge ihrer Prozesse. Die Sensibilität der Verantwortlichen über die Wirkung und Abhängigkeit ihrer Prozesse wird durch das neue Modell bereits zum Projektbeginn gesteigert.

Weiterhin nutzt die Simulation die Optimierungsmöglichkeiten durch Verschieben der Vorgänge innerhalb ihrer Sicherheitspuffer. Diese Funktionalität kann durch Anwenden von Optimierungsverfahren erweitert werden. Der bereits entwickelte Simulator kann dafür problemlos herangezogen werden. Dies ist zum Einen möglich, indem der Simulator versucht, zuerst die Prozesse zu optimieren, die auf dem effektiven, effizienten bzw. kosteneffizienten Ergebnissensitivitätspfad liegen, um dadurch das beste Projektergebnis zu erreichen. Zum Anderen besteht eine weitere Möglichkeit darin, die implementierte Funktionalität zur Ermittlung der

potentiellen Ergebnisverbesserung zu nutzen und zu erweitern. Die Simulation ermittelt bereits die prozessspezifischen Ergebniswerte aus den Kennzahlen Zeitpuffer, Zusatzressourcen, Restzusatzressourcen, Restchance, Kombination aus Chance und Risiko, Kombination aus Chance, Risiko, Zeitpuffer und Zusatzressourcen (vgl. Abbildung 7-7). Diese Werte sind bereits als kostenneutral, zeitneutral und kostenintensiv eingestuft und werden erweitert, indem für jede Verbesserung der dazugehörige Kosten- bzw. Zeitfaktor ermittelt wird. Die Optimierung könnte zuerst alle kostenneutralen, dann alle zeitneutralen und anschließend die kostenintensiven Puffer versuchen zu verbessern, um ein optimales Projektergebnis kostengünstig zu erhalten. Es können dafür z.B. folgende Zielfunktionen definiert werden:

- Optimales Ergebnis bei vorgegebener Projektzeit
- Minimale Projektlaufzeit bei vorgegebenem Ergebnis
- Minimale Projektkosten bei vorgegebenem Ergebnis
  - durch optimale Verwendung der Zeitpuffer.
  - durch optimale Verwendung der Restchancen.
  - durch Minimierung von Risiko.
  - bei optimalem (minimalem) Zusatzressourcenverbrauch.
  - unter optimaler Ressourcenverteilung.
  - bei minimaler Zeitverlängerung (ohne die Projektlaufzeit zu verlängern).
- Ausgewogener Projektplan (optimales Ergebnis und optimale Verteilung der Ressourcen)

Die Optimierung würde das beste Ergebnis liefern. Ein scheinbarer Nachteil der Vorgabe rein optimierter Ergebnisse darf dabei jedoch nicht unterschätzt werden. Das Verständnis für die komplexen Abhängigkeiten bleibt für die Anwender gering. Die Projektleiter können die Herkunft der optimierten Ergebnisse wahrscheinlich nicht verstehen und rückverfolgen. Jedoch ist der Einsatz der Optimierung zielführend, wenn das Verständnis über die komplexen Wechselbeziehungen der Prozesse vorhanden ist.

Ein weiterer positiver Effekt für das Projektmanagement ist in der Erstellung eines Wissenskataloges zu sehen, der in zukünftigen Projektabläufen genutzt werden kann. Durch die Versionsfähigkeit der Applikation kann der Projektplan zu verschiedenen Zeitpunkten gespeichert werden. Beim Abschluss des Projektes

können die Veränderungen im Projektgeschehen analysiert und dem nächsten Projekt als Wissensbasis zur Verfügung gestellt werden. Bei vergleichbaren Folgeprojekten können in der Wissensbasis gespeicherte Informationen wieder verwendet und optimierend eingesetzt werden. Mit der neuen Applikation ist es möglich, ähnliche Projekte ohne großen Aufwand realitätsnah zu modellieren.

Das stochastische Risikomodell wurde in erster Linie zur aktiven Unterstützung von komplexen Entwicklungsprojekten entwickelt. Bei einem Neuanlauf eines Fahrzeugmodells wurde es erfolgreich getestet. Die stochastische Risikomodellierung kann bei allen Projekten eingesetzt werden, in denen ein klar definiertes Projektziel und eindeutige Projektstrukturen vorhanden sind. Der größte Nutzen ist zu erwarten bei großen Projekten wie z.B. Produktentstehungsprozesse von Fahrzeugen, Werkzeug- und Textilmaschinen, Prozessoren und Speichermedien in der Halbleiterindustrie, der pharmazeutischen Industrie, Entwickeln von neuen Softwaresystemen, Einführen von Verkehrsüberwachungs- und -kontrollsystemen, Industrieanlagenbau u.a., bei denen eine vernetzte Betrachtung der komplexen Abhängigkeiten und der Dynamik der Prozesse erforderlich ist, um erfolgreich das Projektziel zu erreichen.

## Literaturverzeichnis

### Bücher und Zeitschriften

- 1 Balzert, H.: Lehrbuch der Software-Technik: Software Entwicklung, 2. Auflage, Heidelberg u.a., 2001
- 2 Banks, J.: Discrete Event System Simulation, 3rd edition, Upper Saddle River, New Jersey, 2001
- 3 Bamberg, G./ Coenenberg, A.G.: Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre, 12. Auflage, München, 2004
- 4 Barske, H./ Gerybadze, A./ Hünninghausen, L. / Sommerlatte, T.: Das innovative Unternehmen: Produkte, Prozesse, Dienstleistungen, Düsseldorf, 2004
- 5 Beer, S.: Brain of the Firm, 2nd edition, Chichester a.o., 1986
- 6 Beer, S.: Diagnosing the System for Organizations, Chichester a.o., 1993
- 7 BMBF, Bundesministerium für Bildung und Forschung: Fast Ramp Up - Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten, o. O., 2002
- 8 Biran, A./ Breiner, M.: Matlab 6 for engineers, 3rd edition, Harlow a.o., 2002
- 9 Brucker, P./ Drexl, A./ Neumann, K.: Resource-constrained project scheduling, European Journal of Operational Research, Vol. 112, p. 3-41, 1999
- 10 Bruns, M.: Systemtechnik - ingenieurwissenschaftliche Methodik zur interdisziplinären Systementwicklung, Berlin u.a., 1991
- 11 Bullinger, H.-J.: Customer Focus und Business Reengineering - Neue Trends für eine zukunftsorientierte Unternehmensführung, in: Bullinger, H.-J.: Neue

- Impulse für eine erfolgreiche Unternehmensführung - Customer Focus, Business Reengineering, 13. IAO Arbeitstagung, Berlin, S. 17-54, 1994
- 12 Burghardt, M.: Projektmanagement, Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Entwicklungsprojekten, 6. Auflage, Erlangen, 2002
- 13 De Meyer, A./ Loch, C.H./ Pitch, M.T.: Managing Project Uncertainty - From Variation to Chaos, MIT Sloan Management Review, Vol. 43, Nr. 2, p. 60-67, 2002
- 14 DIN 69901, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1998
- 15 DIN 69900, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1998
- 16 Ehrmann, H.: Kompakt-Training Balanced Scorecard, 3. Auflage, Ludwigshafen (Rhein), 2003
- 17 Dörner, D.: Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen, 4. Auflage, Reinbek, 2005
- 18 Droege & Comp.: Befragung von Unternehmen über Projektmanagement, Wirtschaftswoche, Vol. 40, S. 120, 2002
- 19 Fasshauer, R.: Geschäftsprozessmanagement, Basis für das Reengineering von Anwendungen, in: Dorn, B., S. 125-141, 1994
- 20 Fathee, M.M./ Redd, G.D./ Moderres, B.: The Effects of Complexity on Business Process Reengineering, Values and Limitations of Modeling and Simulation Technologies, In: Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, Washington DC, p. 1339-1345, 1998
- 21 Ferstl, O.K./ Sinz, E.J.: Geschäftsprozessmodellierung, in: Wirtschaftsinformatik, 35. Jg., Nr. 6, S. 589-592, 1993

- 22 Fishwick, P.A.: Simulation Model Design and Execution - Building digital worlds, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995
- 23 Forrester, J.W.: Grundzüge einer Systemtheorie, Wiesbaden, 1972
- 24 Frantz, F.K.: A Taxonomie of model abstraction techniques, in: Drake, G.R./ Smith, J.S./ Petrs, B.A.: Proceedings of the 27th conference on Winter simulation, Arlington, Virginia, p. 1413-1420, 1995
- 25 Girth, W.: Methoden und Techniken für Prozessanalysen und Redesign, in: Krickl, O.C.: Geschäftsprozeßmanagement - Prozessorientierte Organisationsgestaltung und Informationstechnologie, Heidelberg, S. 139-146, 1994
- 26 Goebel, D.: Modellbasierte Optimierung von Produktentwicklungsprozessen, Diss., Düsseldorf, 1996
- 27 Goldratt, E.M.: Critical chain, Great Barrington, Mass., 1997
- 28 Goldratt, E.M.: Die kritische Kette - ein Roman über das neue Konzept im Projektmanagement, Frankfurt/Main u.a., 2002
- 29 Geschka, H.: Wettbewerbsfaktor Zeit: Beschleunigung von Innovationsprozessen, Landsberg/Lech, 1993
- 30 Grässle, P./ Baumann, H./Baumann, P.: UML - Projektorientiert – Geschäftsprozessmodellierung, IT-System-Spezifikation und Systemintegration mit der UML, Bonn, 2002
- 31 Green, P./ Rosemann, M.: An Ontological Analysis of Integrated Process Modeling, in: Jarke, M./ Oberweis, A.: Advanced Information Systems Engineering, 11th int. Conf., CAISE 99, Berlin, p. 227-241, 1999

- 32 Haehling von Lanzenauer, C./ Pilz-Glombik, K.: A Supply Chain Optimization Model for MIT's Beer Distribution Game, in: ZfB, 70. Jg., Nr. 1, S.101-116, 2000
- 33 Hagel, H.: Projektmanagement A (Vorlesungsskript), Universität der Bundeswehr, München, 2003
- 34 Härterich, S.: Risk Management von industriellen Produktions- und Produkt-risiken, Karlsruhe, 1987
- 35 Harrant, H./ Hemmrich, A.: Risikomanagement in Projekten, München u.a., 2004
- 36 Hennicke, L.: Wissensbasierte Erweiterung der Netzplantechnik, Heidelberg, 1991
- 37 Herroelen, W./ Demeulemeester, E.: New benchmark results for the resource-constrained project scheduling problem, in: Management Science, Vol. 43, p. 1485-1492, 1997
- 38 Hesse, R.: Produktentstehungsprozess mit System, Modellwechsel mit Simultaneous Engineering, Bremen, o.J.
- 39 Högsdal, B.: TOPSIM -Lehrunterlagen: Grundlagen des vernetzten Denkens, Meersburg, o. J.
- 40 Hub, H.: GAMMA-Tutor - Handbuch zum PC-Tool GAMMA, Meersburg, o. J.
- 41 Icmeli, O.: Project scheduling problems, in: International Journal of Operations & Production management, Vol. 13, p. 80-91, 1993
- 42 Imai, K.: Kaizen - Der Schlüssel zum Erfolg im Wettbewerb, 2. Auflage, München, 2002

- 43 Jablonski, S.: Workflow - Management - Systeme: Modellierung und Architektur, Bonn u.a., 1995
- 44 Jablonski, S./ Böhm, M./ Schulze, W.: Workflow-Management - Entwicklung von Anwendungen und Systemen, Facetten einer neuen Technologie, Heidelberg, 1999
- 45 Kapici, S./ Horton, G.: Ein Optimierungsmodell für die Meilensteinplanung im Projektmanagement, in: Hohmann, R.: Simulationstechnik, 17. Symposium in Magdeburg, September 2003, Magdeburg, S. 491-496, 2003a
- 46 Kapici, S./ Wiedmann, O./ Mößmer, H./ Horton, G.: Methoden zu Sensitivitätsuntersuchungen im Produktentstehungsprozess, in: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Wertanalyse Praxis 2003 - Werte schaffen: Nutzen steigern, Aufwand senken, Düsseldorf, S. 117-131, 2003b
- 47 Kapici, S./ Jungwirth, J./ Horton, G.: Ergebnisprognose in komplexen Projektabläufen, in: Mertins, K./ Rabe, M.: Experiences from the Future - New Methods and Applications in Simulation for Production and Logistics, Stuttgart, S. 377-386, 2004
- 48 Kaplan, R.B./ Murdock, L.: Core Process Redesign, in: McKinsey Quarterly, Nr. 2, p. 444-447, 1991
- 49 Kaplan, S.: The Words of Risk Analysis, in: Risk Analysis: Vol. 17, Nr. 4, p. 407-419, 1997
- 50 Kaplan, S./ Garrick, B.J.: On the Quantitative Definition of Risk, in: Risk Analysis, Vol. 1, Nr. 1, p. 11-27, 1981
- 51 Kaplan, S./ Norton, D.P.: The balanced scorecard translating strategy into action, Boston, Massachusetts, 2002

- 52 Kappler, A.: Balanced Scorecard - Werkzeug zur Umsetzung von Strategien, in: IO Management, Vol. 69, Nr.7, S. 34-38, 2000
- 53 Keller, G.: Informationsmanagement in objektorientierten Organisationsstrukturen, Diss., Wiesbaden, 1993
- 54 Kolisch, R.: Project scheduling under resource constraints - Efficient heuristics for several problem classes, Heidelberg, 1995
- 55 Kosturiak, J./ Gregor, M.: Simulation von Produktionssystemen, Wien u.a., 1995
- 56 Krallmann, H./ Derszteler, G.: Systemanalyse im Unternehmen, 2. Auflage, München u.a., 1996
- 57 Kromrey, H.: Empirische Sozialforschung - Modelle und Methoden der standardisierten Datenerhebung und Datenauswertung, 10. Auflage, Opladen, 2002
- 58 Krüger, R./ Steven, M.: Supply Chain Management im Spannungsfeld von Logistik und Management, in: Wirtschaftswissenschaftliches Studium, Bd. 29, S. 501-507, 2000
- 59 Krummenacher, S.: Prozessmanagement als Baustein von Total Quality Management, Diss., Aachen, 1995
- 60 Lamla, J.: Prozessbenchmarking - Dargestellt an Unternehmen der Antriebstechnik, Diss., München, 1995
- 61 Langner, P./ Schneider, C./ Wehler, J.: Ereignisgesteuerte Prozessketten und Petri-Netze, Hamburg, 1997
- 62 Lee, K./ Fishwick, P.A.: Dynamic Model Abstraction, Winter Simulation Conference, San Diego, p. 764-771, 1996

- 63 Lesmeister, F.: Verbesserte Produktplanung durch den problemorientierten Einsatz präventiver Qualitätsmanagementmethoden, Diss., Düsseldorf, 2001
- 64 Leus, R.: The generation of stable project plan - Complexity and exact algorithms, Diss., Leuven, 2003
- 65 Malik, F.: Strategie des Managements komplexer Systeme - Ein Beitrag zur Management-Kybernetik evolutionärer Systeme, 7. Auflage, Bern u.a., 2002
- 66 Martin, J.: Information Engineering, Book 2: Planning and Analysis, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990
- 67 Meerkamm, H.: Integration von Berechnungen in den frühen Entwurfsprozess, in: VDI-EKV: Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung, Tagung Stuttgart 1999, Düsseldorf, S. 103-121, 1999
- 68 Meyer, R.: Entscheidungstheorie, 2. Auflage, Wiesbaden, 2000
- 69 Milberg, J.: Nutzung der Kostensenkungspotenziale in der Montage, in: Kostensenkungspotenziale der Produktion, VDI- Berichte, Nr. 767, Düsseldorf, S. 280 ff., 1989
- 70 Morris, D./ Brandon, J.: Re-Engineering your business, New York a.o., 1994
- 71 Müller-Merbach, S.: Operations Research - Methode und Modelle der Optimalplanung, 8. Auflage, München, 1985
- 72 Neumann, K./ Morlock, M.: Operations Research, 2. Auflage, München, 2002
- 73 Oestereich, B.: Objektorientierte Softwareentwicklung - Analyse und Design mit der Unified Modeling Language, 5. Auflage, München u.a., 2001

- 74 Özdamar, L./ Ulusoy, G.: A local constraint based analysis approach to project scheduling under general resource constraints, in: European Journal of Operational Research, Vol. 79, p. 287-298, 1994
- 75 Padman, R.: Heuristic scheduling of resource-constrained projects with cash flows, in: Naval research Logistics, Vol. 44, p. 364-381, 1997
- 76 Page, B.: Diskrete Simulation - Eine Einführung mit Modula-2, Berlin u.a., 1991
- 77 Page, B./ Lechler, T./ Claassen, S.: Objektorientierte Simulation in Java mit dem Framework DESMO-J-Java, Hamburg, 2000
- 78 Parkinson, C.N.: Parkinson's Law - or The Pursuit of Progress, London a.o., 1957
- 79 Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme, Grundlagen, Methoden, Techniken, Berlin u.a., 1982
- 80 Profozich, D.: Managing Change with Business Process Simulation, Upper Saddle River, New Jersey, 1998
- 81 Rabetge, S.: Fuzzy Sets in der Netzplantechnik, Diss., Wiesbaden, 1991
- 82 Reithofer, N.: Interview in: VDI-Nachrichten, 7. Juni 2002, Nr. 23, S. 11, 2002
- 83 Ropohl, P./ Aggteleky, B.: Systemtechnik - Grundlagen und Anwendung, München, 1975
- 84 Rother, M./ Shook, J.: Sehen lernen - Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen, Stuttgart, 2000

- 85 Rump, F.J.: Durchgängiges Management von Geschäftsprozessen auf Basis ereignisgesteuerter Prozessketten - Formalisierung, Analyse und Ausführung von EPKs, Diss., Stuttgart u.a., 1999
- 86 Sauer, J.: Neuronale Netze, Vorlesungsskript, Fachhochschule Regensburg, Regensburg, 2003
- 87 Scherf, H.E.: Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme - Eine Sammlung von Simulink-Beispielen, München u.a., 2004
- 88 Scheer, A.-W.: Architektur integrierter Informationssysteme - Grundlagen der Unternehmensmodellierung, 2. Auflage, Berlin u.a., 1992
- 89 Scheer, A.-W., Wirtschaftsinformatik - Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse, 2. Auflage, Berlin u.a., 1998
- 90 Schierenbeck, H.: Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre, 16. Auflage, München u.a., 1998
- 91 Schmidt, U./ Triemer, S.: Anwendungen der Simulation in der Materialflussplanung, in: Kuhn, A./ Reinhardt, A./ Wiendahl, H.-P.: Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik, Braunschweig u.a., 1993
- 92 Schumann, H./ Müller, W.: Visualisierung -: Grundlagen und allgemeine Methoden, Berlin u.a., 2000
- 93 Schwarze, J.: Netzplantechnik - Eine Einführung in das Projektmanagement, 7. Auflage, Herne u.a., 1994
- 94 Spaniol, O./ Hoff, S.: Ereignisorientierte Simulation - Konzepte und Systemrealisierung, Bonn u.a., 1995
- 95 Spath, D.: Integration von Risiko- und Qualitätsmanagement in den Produktentstehungsprozess, Karlsruhe, o.J.

- 96 Sommerville, I.: Software Engineering, 7th edition, Boston a.o., 2004
- 97 Stahlknecht, P./ Hasenkamp, U.: Einführung in die Wirtschaftsinformatik, 11. Auflage, Berlin u.a., 2005
- 98 Tiemeyer, E.: Software zur Modellierung und Simulation organisatorischer Systeme, in: ZFO, Vol. 64, Nr. 4, S. 247-254, 1995
- 99 Tumay, K.: Business Process Simulation, in: Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, Picataway, New Jersey, p. 55-60, 1995
- 100 Uthmann, C.: Geschäftsprozesssimulation von Supply Chains - Ein Praxis-Leitfaden für die Konstruktion von Management-orientierten Modellen integrierter Material- und Informationsflüsse, Erlangen u.a., 2001
- 101 VDI-Richtlinie 3633/1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Blatt 1, Grundlagen, o.J.
- 102 VDI-Richtlinie 3633/6: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Blatt 6, Begriffsdefinition, o.J.
- 103 Versteegen, G.: Risikomanagement in IT-Projekten - Gefahren rechtzeitig erkennen und meistern, Berlin u.a., 2003
- 104 Vester, F./ v. Hesler, A.: Sensitivitätsmodell, 2. Auflage, Frankfurt/Main, 1988
- 105 Vester, F.: Die Kunst vernetzt zu denken - Ideen und Werkzeuge für einen Umgang mit Komplexität, 4. Auflage, München, 2004
- 106 Wagner, J.: Balanced Scorecard als Managementsystem, Lohmar u.a., 2002
- 107 Weber, J.: Schon früh an die Produktion denken, in: Automobilentwicklung, 1. November 1999, Nr. 6, S. 60 ff., 1999

- 108 Wiest, J.D./ Levy, F.K.: A management guide to PERT/CPM: with GERT, PDM, DCPM and other networks, 2nd edition, Englewood Cliffs, New Jersey, 1977
- 109 Winter, M.: Projektmanagement, Vorlesungsskript der Fachhochschule Köln, Köln, 2003
- 110 Wolter, O.: TQM Scorecard - Die Balanced Scorecard in TQM-geführten Unternehmen umsetzen, 2. Auflage, München u.a., 2002
- 111 Zadeh, L.A./ Klir, G.J.: Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems selected papers, Singapore a.o., 1996

### **World Wide Web (WWW)**

- 112 A\*Algorithmus: [http://www.netzwelt.de/lexikon/A\\*-Algorithmus.html](http://www.netzwelt.de/lexikon/A*-Algorithmus.html)
- 113 Dijkstra und Bellmann Ford: <http://www.raskob.de/fun/1904>
- 114 Eclipse: <http://www.eclipse.org>
- 115 EM-Plant: <http://www.em-plant.de>
- 116 Fehlerbäume: <http://www.weibull.com/basics/fault-tree/index.htm>
- 117 Flash: <http://flashforum.de>, <http://www.macromedia.com/software/flash>
- 118 Java3D: <http://www.j3d.org/>
- 119 Lombok: <http://www.objectlearn.com>
- 120 Map24: <http://www.map24.de>
- 121 Microsoft: <http://www.microsoft.com>

- 122 Oracle: <http://www.oracle.com>
- 123 Project Management Institute: <http://www.pmi.org>
- 124 Powersim: <http://www.powersim.com>
- 125 QuickSort: <http://www.sortieralgorithmen.de/quicksort/>
- 126 SADT: <http://www.cs.toronto.edu/~jm/2507S/Notes04/SADT.pdf>
- 127 SD: <http://www.albany.edu/cpr/sds/>
- 128 Sun: <http://java.sun.com>
- 129 SVG: <http://www.w3.org/TR/SVG/>, <http://www.w3.org/graphic/svg/>,  
<http://svg.tutorial.apiti.co.de/>
- 130 Sysdeo: <http://www.sysdeo.com>
- 131 Tenstep: [http://www.tenstep.ch/3\\_1\\_1.php](http://www.tenstep.ch/3_1_1.php)
- 132 Together: <http://www.borland.com/together>
- 133 UML: <http://www.uml.org/>
- 134 VRML: <http://www.debacher.de/vrml/vrml.htm>
- 135 Wertschöpfungskettendiagramme: <http://samba.tilak.at/index.php?id=1489>

## Anhang A: Ausgewähltes Teilprojekt

