

Schriften zur Quantitativen Betriebswirtschaftslehre
Technische Universität
Darmstadt

Herausgeber:

Prof. Dr. W. Domschke
Prof. Dr. R. Kolisch
Prof. Dr. H.-J. Petzold
Prof. Dr. H. Stadler



**Armin Scholl und
André Weimerskirch**

**Robuste Projektplanung
auf der Grundlage des
Linear Time-Cost
Tradeoff-Problems**

ISSN 1432-6671
Nummer 10/99
November 1999
Letzte Änderung: März 2000

**Dr. Armin Scholl
André Weimerskirch**

Technische Universität Darmstadt
Institut für Betriebswirtschaftslehre
Fachgebiet Fertigungs- und Materialwirtschaft
Hochschulstr. 1, D-64289 Darmstadt
Tel. 06151/164564, Fax: 06151/166504
E-Mail: scholl@bwl.tu-darmstadt.de

Robuste Projektplanung

auf der Grundlage des Linear Time-Cost Tradeoff-Problems

Armin Scholl und André Weimerskirch

Technische Universität Darmstadt
Hochschulstraße 1, D - 64289 Darmstadt
Email: scholl@bwi.tu-darmstadt.de

Zusammenfassung:

In der betrieblichen Praxis findet Planung häufig unter der Voraussetzung statt, daß die ihr zugrundeliegende Datenbasis nicht mit Sicherheit bekannt ist. Die Daten der zu lösenden Planungsaufgabe sind also mehr oder weniger *unsicher*. Dies gilt insbesondere dann, wenn es sich um lang- und mittelfristige Planungsaufgaben handelt. In manchen Fällen sind für unsichere Daten (die Problemparameter) wenigstens Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Werte abschätzbar. In anderen Fällen gelingt selbst dies nicht, und man ist bestenfalls in der Lage, einen möglichen oder wahrscheinlichen Wertebereich anzugeben. Trotz ungenauer und unsicherer Informationen muß ein konkreter Plan ermittelt werden, dessen Güte sich jedoch erst im nachhinein, d.h. nachdem die Werte der einbezogenen Daten tatsächlich feststehen, beurteilen läßt. Daher ist man besonders an solchen Plänen interessiert, die *robust* in dem Sinne sind, daß sie auch bei ungünstigen Realisierungen der Daten zu annehmbaren Ergebnissen führen.

Im vorliegenden Artikel gehen wir von einem Grundproblem der mittelfristigen Projektplanung aus, das als *Linear Time-Cost Tradeoff-Problem* bezeichnet wird. Für dieses Problem ist Unsicherheit der Daten ein Hauptcharakteristikum. Dennoch wird in der Literatur häufig von deterministischen Daten oder sehr einfachen Ansätzen zur Berücksichtigung der Unsicherheit ausgegangen. Wir stellen verschiedene Möglichkeiten der Modellierung des Problems in Form robuster Optimierungsmöglichkeiten dar, die eine explizite Einbeziehung der Unsicherheit in Form alternativer Szenarien erlauben. Durch ausführliche experimentelle Untersuchungen weisen wir nach, daß man durch Lösung derartiger Modelle sehr viel robustere Projektpläne erzielen kann als mit den üblichen deterministischen Modellen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Übersicht	1
2	Kostenorientierte Projektplanung	2
2.1	Grundbegriffe	2
2.2	Deterministische Time-Cost Tradeoff-Probleme	3
2.2.1	Linear Time-Cost Tradeoff-Problem (LTCTOP)	4
2.2.2	Discrete Time-Cost Tradeoff-Problem (DTCTOP)	5
3	Methoden zur Berücksichtigung von Unsicherheit	7
3.1	Informationslage, Risikoeinstellung und Robustheitskriterien	7
3.2	Deterministische Ersatzwertmodelle	8
3.3	Stochastische und robuste Optimierungsmodelle	9
3.3.1	Grundlagen	10
3.3.2	Ersatzmodelle	11
3.3.3	Ersatzzielstrukturen	12
3.3.4	Ersatzrestriktionen	14
4	LTCTOP bei Unsicherheit der Normaldauern	15
4.1	Deterministische Ersatzwertmodelle	16
4.2	Robuste Optimierungsmodelle	16
4.2.1	Ersatzrestriktionen	17
4.2.1.1	Fat Solution-Modelle	17
4.2.1.2	Kompensationsmodelle	17
4.2.1.3	Kombinierte Chance-Constrained-Kompensations-Modelle	19
4.2.1.4	Simultane Chance-Constrained-Modelle	20
4.2.1.5	Separierte Chance-Constrained-Modelle	21
4.2.2	Ersatzzielstrukturen	22
5	Rahmenbedingungen der experimentellen Untersuchung	25
5.1	Generierung von Probleminstanzen	25
5.1.1	Szenariogenerierung	26
5.1.2	Festlegung der übrigen Problemparameter	28
5.2	Beurteilung von Plänen und zugrundeliegenden Modellen	30
5.2.1	Arten der Evaluation von Planungsergebnissen	30
5.2.2	Auswertungsmodelle	32
5.2.2.1	Auswertung bei Handlungssicherheit	32
5.2.2.2	Auswertung bei Handlungsunsicherheit	33
5.2.3	Kenngrößen zur Beurteilung von Plänen	35

5.2.3.1	Ergebnisrobustheit und -stabilität	35
5.2.3.2	Optimalitätsrobustheit	36
5.2.3.3	Zulässigkeitsrobustheit	37
5.2.3.4	Ex post-Evaluation	38
5.2.3.5	Maße für den direkten Vergleich zwischen Modellen	39
5.2.3.6	Zusammenstellung der wichtigsten Maße	40
5.3	Untersuchte Modelle	41
5.3.1	Deterministische Ersatzwertmodelle	41
5.3.2	Robuste Modelle	41
5.4	Verwendete Rechnerumgebung	42
6	Ergebnisse der experimentellen Untersuchung	43
6.1	Rechenzeiten	43
6.2	Vollständige Information	44
6.2.1	Beurteilung aller Modelle anhand von Basismaßen	45
6.2.1.1	Deterministische Ersatzwertmodelle	45
6.2.1.2	Kompensationsmodelle	46
6.2.1.3	Kombinierte Chance-Constrained-Kompensations-Modelle	47
6.2.1.4	Simultane Chance-Constrained- und Fat Solution-Modelle	50
6.2.2	Weitere Maße für ausgewählte Modelle	53
6.2.3	Direkter Vergleich der Modelle	55
6.2.4	Fazit	59
6.3	Unvollständige Information über Handlungsmöglichkeiten	59
6.3.1	Beurteilung aller Modelle anhand von Basismaßen	60
6.3.1.1	Deterministische Ersatzwertmodelle	60
6.3.1.2	Kompensationsmodelle	61
6.3.1.3	Kombinierte Chance-Constrained-Kompensations-Modelle	62
6.3.1.4	Simultane Chance-Constrained-Modelle	63
6.3.2	Weitere Maße für ausgewählte Modelle	65
6.3.3	Direkter Vergleich der Modelle	66
6.3.4	Fazit	68
6.4	Unvollständige Information über die Umweltentwicklung	68
6.4.1	Unkenntnis des bestmöglichen Informationsstandes B	69
6.4.2	Systematische Szenarioaggregation	71
6.5	Einfluß der Projektgröße	74
7	Zusammenfassung und Ausblick	75
8	Literatur	77

1 Einführung und Übersicht

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit einem kostenorientierten Entscheidungsproblem der mittelfristigen Projektplanung. Die üblichen Ansätze zur Ermittlung eines optimalen Projektplans gehen von bekannten bzw. hinreichend genau prognostizierbaren Daten aus, so daß deterministische lineare Optimierungsmodelle formuliert und effizient gelöst werden können. Tatsächlich sind diese Daten jedoch häufig erheblich unbekanntem externen und zufälligen Einflüssen ausgesetzt und besitzen dementsprechend stochastischen Charakter.

Zunächst werden wir in Kap. 2 das unseren Untersuchungen zugrundeliegende deterministische Grundmodell der kostenorientierten Projektplanung, das in der Literatur als *Linear Time-Cost Tradeoff-Problem* (LTCOTOP) bezeichnet wird, sowie eine praxisnähere Erweiterung auf der Grundlage von Ausführungsmodi für Vorgänge darstellen. Während ersteres als lineares Optimierungsmodell formuliert werden kann, entsteht in letzterem Fall ein ganzzahlig-lineares Modell.

Die Darstellung und Klassifizierung unterschiedlicher Methoden zur Berücksichtigung von Datenunsicherheit bei der Planung sind Gegenstand von Kap. 3. Die unsicheren Daten werden in Form unterschiedlicher Szenarien (Umweltlagen), die individuelle Eintrittswahrscheinlichkeiten aufweisen können, abgebildet. Zur Beurteilung von Lösungen aus Sicht eines risikoscheuen Entscheidungsträgers führen wir verschiedene *Robustheitskriterien* ein.

Zur Modellierung des LTCOTOP unter Unsicherheit unterscheiden wir deterministische *Ersatzwertmodelle* (jeder unsichere Parameter wird durch einen deterministischen Wert ersetzt) einerseits und robuste bzw. stochastische Optimierungsmodelle andererseits. Letztere können auf verschiedene Weise in deterministische *Ersatzmodelle* umgewandelt werden. Ein solches Modell beinhaltet eine *Ersatzzielfunktion* zur Bewertung der Ergebnisverteilung von Lösungen und ein System von *Ersatzrestriktionen* zur Behandlung von Unsicherheiten in bezug auf die Zulässigkeit von Lösungen. Bei den sogenannten *Fair Solution-Modellen* wird gefordert, daß eine Lösung für alle Szenarien zulässig sein muß, während die Einhaltung der Restriktionen bei *Chance-Constrained-Modellen* nur mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten erfolgen muß. *Kompensationsmodelle* versuchen, die spätere Realisierung eines Planes dahingehend zu antizipieren, daß sie Ausgleichsmaßnahmen, die bei eintretender Verletzung von Restriktionen ergriffen werden müssen, bereits in das Modell einbeziehen. So können für verschiedene Szenarien unterschiedliche Kompensationsmaßnahmen geplant werden, die sich in der Ersatzzielfunktion kostenmäßig erfassen lassen. In Kap. 4 zeigen wir durch Erweiterung des LTCOTOP, wie sich die zuvor prinzipiell dargestellten Modelltypen als lineare Optimierungsmodelle formulieren lassen.

Durch die explizite Berücksichtigung von Datenunsicherheit in robusten Modellen wird die Planung erheblich aufwendiger. Zum einen benötigt man eine sehr viel umfangreichere Datenbasis in Form der Szenarien als bei deterministischen Modellen, wo es prinzipiell ausreicht, einen erwarteten, evtl. um Sicherheitsfaktoren korrigierten Wert für jeden Datenparameter zu schätzen. Zum anderen werden die Modelle – je nach Ausprägung – sehr viel umfangreicher, was zu erhöhtem Rechenaufwand

führt. Daher beschreiben wir in Kap. 5 Aufbau und in Kap. 6 Ergebnisse einer umfangreichen experimentellen Untersuchung, die dazu dient festzustellen, ob der Mehraufwand der robusten Optimierungsmodelle durch eine signifikante Verbesserung der Entscheidungsqualität gerechtfertigt ist und welche Typen von Ersatzmodellen empfehlenswert sind.

Im abschließenden Kap. 7 wird eine Zusammenfassung und Bewertung der Erkenntnisse gegeben.

2 Kostenorientierte Projektplanung

Eine wesentliche Aufgabenstellung der Projektplanung ist die zeitliche Festlegung der im Rahmen eines Projektes auszuführenden Vorgänge, d.h. die Ermittlung eines zeitlichen Projektplans. Im folgenden nennen wir die wichtigsten Grundbegriffe und beschreiben zwei Ausprägungen eines Grundmodells der mittelfristigen kostenorientierten Projektplanung, das als Time-Cost Tradeoff-Problem bezeichnet wird.

2.1 Grundbegriffe

Zu der folgenden knappen Darlegung der wichtigsten Grundbegriffe der Projektplanung vgl. Domschke und Drexl (1998, Kap. 5).

Projekte lassen sich in einzelne Aktivitäten (Arbeitsgänge) unterteilen. Diese Aktivitäten werden als *Vorgänge* bezeichnet. Daneben können für jedes Projekt Ereignisse bestimmt werden. Ein *Ereignis* ist ein Zeitpunkt, der das Eintreten eines genau festgelegten Projektzustandes anzeigt (z.B. das Beenden eines Arbeitsgangs). Bestimmte Ereignisse, die von besonderer Wichtigkeit für ein Projekt sind, werden auch als *Meilensteine* bezeichnet. Zu jedem Vorgang gehören ein Anfangs- und ein Endereignis. Genauso gehört zu jedem Projekt ein Start- und ein Endereignis, also Projektanfang und Projektende. Die *Projektdauer* ist die Zeitspanne zwischen Projektanfang und Projektende.

Bei der Durchführung eines Projektes sind weiterhin *Reihenfolgebeziehungen* zwischen Vorgängen bzw. Ereignissen zu berücksichtigen. Die Reihenfolgebeziehungen regeln die Anordnung der Vorgänge bzw. Ereignisse untereinander, d.h. die mögliche Reihenfolge der Ausführung der Vorgänge. Folgt ein Vorgang j einem anderen Vorgang i , so kann j erst dann begonnen werden, nachdem i beendet wurde (Ende-Start-Beziehung). Die Struktur des Projektes wird in einem *Netzplan* dargestellt. Dabei werden alle wesentlichen Vorgänge und Ereignisse als Graph zusammengestellt, der entweder vorgangspfeil- oder vorgangsknotenorientiert gestaltet ist. Im ersten Fall werden Vorgänge als Pfeile dargestellt, im letzten als Knoten. Bei vorgangspfeilorientierten Netzplänen ist es zur Abbildung der Reihenfolgebeziehungen erforderlich, zusätzliche *Scheinvorgänge* mit Dauer 0 einzuführen.

Als *Nachfolger* eines Elements im Netzplan (Ereignis oder Vorgang) werden alle Elemente bezeichnet, die im Netzplan diesem Element direkt oder indirekt nachfolgen. Als *direkte Nachfolger* eines Elements werden analog alle Elemente bezeichnet, die im Netzplan diesem Element direkt nachfolgen. Neben Knoten und Pfeilen

enthält ein Netzplan Knoten- und/oder Pfeilbewertungen in Form von Bearbeitungszeiten für Vorgänge und von evtl. einzuhaltenen minimalen oder maximalen Zeitabständen zwischen aufeinanderfolgenden Vorgängen.

Die *Zeitplanung* – als wichtige Teilaufgabe der Projektplanung – kann mit Hilfe der **Netzplantechnik** durchgeführt werden. Die Methoden der Netzplantechnik lassen sich in deterministische und stochastische Vorgehensweisen unterteilen:

- Bei den deterministischen Methoden wird davon ausgegangen, daß jeder Vorgang des Netzplans ausgeführt werden muß und daß alle Vorgangsdauern sowie minimale bzw. maximale Zeitabstände bekannt sind. Liegen weder Kapazitäts- noch Kostenbeschränkungen vor, so läßt sich die Zeitplanung, d.h. Festlegung von Startzeitpunkten der Vorgänge bzw. von Eintrittszeitpunkten der Ereignisse, mit Hilfe einer Vorwärts- und Rückwärtsrechnung vornehmen.

- Die stochastischen Methoden lassen sich wiederum unterteilen. Bei PERT ist jeder Vorgang auszuführen, und es werden stochastische Vorgangsdauern bzw. zeitliche Abstände berücksichtigt. Bei GERT liegen ebenfalls stochastische Zeitgrößen vor, jedoch ist zusätzlich zu beachten, daß einige Vorgänge nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auszuführen sind.

Die stochastischen Methoden erfordern vergleichsweise komplexe Analysen. Aus diesem Grunde überwiegen in der Praxis die deterministischen Methoden bzw. Modelle. In dieser Arbeit werden neben deterministischen spezielle stochastische bzw. robuste Optimierungsmodelle beschrieben, bei denen analog zu PERT unsichere Vorgangsdauern angenommen werden, die in Form von Szenarien vorliegen, und bei denen jeder Vorgang auszuführen ist.

2.2 Deterministische Time-Cost Tradeoff-Probleme

Bei dieser Modellklasse sind die Vorgangsdauern nicht konstant, sondern in gewissen Grenzen variierbar. Jede Beschleunigung eines Vorgangs ist allerdings mit Aufwand verbunden und erhöht so seine Ausführungskosten. Weiterhin sind projekt-dauerabhängige Kosten zu beachten. So entstehen wachsende Kosten bei Überschreitung eines vorgegebenen Endtermins (z.B. Konventionalstrafe). Die Ereigniszeitpunkte sind nun so zu bestimmen, daß die Projektkosten minimiert werden bzw. der Gewinn maximiert wird.

Die nachfolgend dargestellten Modelle gehen von folgenden Grundannahmen aus:

- Der vorgangspeilorientierte Netzplan mit Knotenmenge V (= Menge der Ereignisse) und Pfeilmenge E (= Menge der Vorgänge) ist azyklisch und gerichtet und liegt in einer topologischen Sortierung mit Quelle 1 (Startereignis) und Senke n (Endereignis) vor.
- Jeder Vorgang hat eine Normalvorgangsdauer und kann bis zu einer vorgegebenen Grenze beschleunigt werden (z.B. durch den Einsatz weiterer Hilfs- oder externer Fremdkräfte). Dies verursacht monoton steigende Bearbeitungskosten.
- Ein Projektverzögerung resultiert in Strafkosten. Das Projektende wird dabei vorher festgelegt (z.B. als Teil des Projektangebots).

- Die Gesamtkosten der Beschleunigung dürfen ein vorgegebenes Budget (im Hinblick auf die Sicherung der Liquidität) nicht überschreiten.
- Ziel ist die Maximierung des (Projekt-) Gesamtgewinns.

Es sind also zwei Kostenfaktoren zu berücksichtigen, die eine in Abhängigkeit von der Projektdauer gegenläufige Entwicklung aufweisen:

- *Vorgangsdauerabhängige Kosten:* Durch Beschleunigung jedes einzelnen Vorgangs erhöhen sich seine Bearbeitungskosten.
- *Projektdauerabhängige Kosten:* Diese Kosten wachsen mit der Projektdauer an (z.B. Konventionalstrafen bei Terminüberschreitungen).

2.2.1 Linear Time-Cost Tradeoff-Problem (LTCTOP)

Das LTCTOP legt lineare Beschleunigungskosten zugrunde.¹ Von einer speziellen Ausprägung des Problems gehen wir in dieser Arbeit aus. Es werden folgende Vereinbarungen getroffen:

Für jeden Vorgang $(i,j) \in E$ ist eine *Normaldauer* von d_{ij} ZE vorgegeben. Die Beschleunigung eines Vorgangs (i,j) um den Faktor v_{ij} kostet pro Zeiteinheit (ZE) kb_{ij} Geldeinheiten (GE). Der Vorgang kann dabei maximal um den Faktor $\bar{v}_{ij} \leq 1$ beschleunigt werden.² Die absolute Beschleunigung gegenüber der Normaldauer d_{ij} beträgt $v_{ij} \cdot d_{ij}$ ZE und verursacht Kosten in Höhe von $v_{ij} \cdot d_{ij} \cdot kb_{ij}$ GE. Die verbleibende Dauer des Vorgangs ist $d'_{ij} = (1 - v_{ij}) \cdot d_{ij}$. Die Summe der Beschleunigungskosten aller Vorgänge, die während des Projektablaufs aufzubringen sind, darf das Projektbudget B nicht überschreiten.

Im Rahmen von Verhandlungen mit dem Kunden wird ein *Projektdetermin PE* vereinbart, der jedoch (in der Regel) nicht bei Durchführung aller Vorgänge mit ihrer Normaldauer erreichbar ist. Falls der Termin PE überschritten wird, entstehen Strafkosten in Höhe von g GE pro ZE der Überschreitung.

Bei erfolgreichem Abschluß des Projektes wird ein Nettoerlös N erzielt, der sich aus der vereinbarten Zahlung des Kunden (Bruttoerlös) abzüglich der fixen Kosten des Projektes ergibt. Diese werden auf Basis der Normalvorgangsdauern unter Berücksichtigung der dafür benötigten Kapazitäten ermittelt und sind (hier) nicht entscheidungsrelevant. Bei der Festlegung des verfügbaren Budgets B sind die fixen Kosten

1 Eine erste Beschreibung des LTCTOP sowie verschiedene Modellierungsmöglichkeiten finden sich bei Kelley und Walker (1959). Es handelt sich jeweils um lineare Optimierungsmodelle, die mit entsprechenden Standardmethoden, aber effizienter mit Verfahren gelöst werden können, die die spezielle Struktur der Modelle ausnutzen; vgl. z.B. Brucker et al. (1999, Kap. 4.2). Zum LTCTOP vgl. auch Morlock und Neumann (1973), Küpper et al. (1975, S. 210 ff.) oder Domschke und Drexl (1998, Kap. 5.4).

2 Im deterministischen Modell könnten anstelle der Beschleunigungsfaktoren v_{ij} Variablen für die absolute Verringerung der Vorgangsdauer verwendet werden, wie dies in der Literatur in der Regel der Fall ist. Bei unsicheren Normaldauern sind wir jedoch der Ansicht, daß eine prozentuale Beschleunigung (d.h. höhere Normaldauern können absolut stärker reduziert werden als solche, die ohnehin schon niedrig sind) realitätsnäher als eine von der Normaldauer unabhängige Beschleunigung um einen festen Wert ist.

bereits mildernd berücksichtigt, so daß B vollständig für Beschleunigungskosten zur Verfügung steht. Es ist zu beachten, daß eventuelle Projektverzögerungskosten das Budget nicht belasten, da sie direkt mit dem Bruttoerlös verrechnet werden können.

Alle angegebenen Parameter werden im Grundmodell als deterministisch angenommen. Die Zielsetzung besteht in der *Maximierung des Gesamtgewinns*, der sich als Differenz des Nettoerlöses N und der Summe aus Verzugs- und Beschleunigungskosten berechnet.³ Definieren wir Variablen FZ_j für den geplanten Eintrittszeitpunkt des Ereignisses i, so läßt sich der beschriebene Sachverhalt durch das *lineare Optimierungsmodell M1* formulieren:

M1: Deterministisches LTCTOP	
Maximiere $G(\mathbf{FZ}, \mathbf{v}, T) = N - \left(g \cdot T + \sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij} \cdot d_{ij} \right)$	(1)
unter den Nebenbedingungen	
$-FZ_i + FZ_j \geq d_{ij} \cdot (1 - v_{ij})$	für $(i,j) \in E$ (2)
$T \geq FZ_n - PE$	(3)
$\sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij} \cdot d_{ij} \leq B$	(4)
$0 \leq v_{ij} \leq \sqrt{v_{ij}}$	für $(i,j) \in E$ (5)
$T \geq 0$	(6)
$FZ_1 = 0, FZ_j \geq 0$	für $j = 2, \dots, n$ (7)

Die Zielfunktion (1) maximiert den Gesamtgewinn G. Die Nebenbedingungen (2) garantieren die Einhaltung der Reihenfolgebeziehungen. Die zeitliche Differenz von Ereignissen i und j, die durch einen Pfeil (i, j) im Netzplan verbunden sind, muß größer als die zur Ausführung benötigte Zeit des Vorgangs (i, j) sein. Die Bedingungen (3) und (6) bestimmen den Projektverzug, der sich aufgrund einer positiven Differenz zwischen tatsächlichem Projektende FZ_n und Endtermin PE ergibt. (4) garantiert die Einhaltung des für Beschleunigungskosten verfügbaren Budgets. (5) beschränkt die Beschleunigungsfaktoren v_{ij} auf den zulässigen Bereich. (7) dient zur Definition der Variablen FZ_j .

2.2.2 Discrete Time-Cost Tradeoff-Problem (DTCTOP)

Ein Hauptanliegen des LTCTOP ist die Annahme, daß kontinuierliche Beschleunigungen der Vorgänge bei linearen Kosten möglich sind. In der Realität sind jedoch

3 Auf die Berücksichtigung von Zinseffekten verzichten wir in Anbetracht einer mittelfristigen Projektdauer von mehreren Monaten bis zu 1 Jahr, wie sie z.B. im Anlagenbau typisch ist. Bei längerfristigen Projekten wären Zinseffekte – z.B. durch Betrachtung von Kapitalwerten – sehr wohl einzubeziehen; vgl. Klein (2000, Kap. 3.4.4)

häufig nur bestimmte, diskrete Ausführungsmodi möglich. Dies läßt sich mit Hilfe der diskreten Form des Time-Cost Tradeoff-Problems (DTCTOP) abbilden.⁴ Wir beschreiben im folgenden eine entsprechende Erweiterung des LTCTOP-Modells:

Die Inanspruchnahme eines Modus führt zu einer Beschleunigung mindestens eines Vorgangs und verursacht dabei bestimmte modusabhängige Kosten. Ein Modus, der bei der Planung eines Bauvorgangs auftreten könnte, wäre z.B. das Einsetzen eines Baggers anstelle von Handarbeit zum Ausheben einer Grube, wodurch die Ausführungszeiten erheblich geringer werden.

Wir nehmen im folgenden an, daß eine Menge M von Modi verfügbar ist und daß die Wirkung der Modi additiv ist, d.h. die Anwendung mehrerer Modi mit Wirkung auf einen Vorgang mindert dessen Dauer um die Summe der einzelnen Verkürzungen. Jeder Modus beschleunigt ein oder mehrere Vorgänge.

Zur Modellierung werden Binärvariablen y_m benötigt, die festlegen, ob ein Modus $m \in M$ verwendet wird ($y_m = 1$) oder nicht ($y_m = 0$). Dadurch wird das Modell ganzzahlig-linear, und die Probleme sind schon in der einfachsten Form NP-schwer (vgl. De et al. 1997).

Bei Anwendung eines Modus $m \in M$ werden Kosten in Höhe von c_m GE verursacht. Dadurch wird der Vorgang (i, j) gegenüber der Normaldauer d_{ij} um den Faktor r_{ijm} beschleunigt, also absolut um $r_{ijm} \cdot d_{ij}$ ZE.⁵ Die Beschleunigung dieses Vorgangs beträgt somit insgesamt $\sum_{m \in M} (y_m \cdot r_{ijm} \cdot d_{ij})$ ZE.

Es muß sichergestellt sein, daß $\sum_{m \in M} r_{ijm} \leq 1$ gilt, damit ein Vorgang keine negativen Dauern annehmen kann.

Die Summe der Kosten aller ausgewählten Modi darf die Budgetgröße B nicht überschreiten. Es ergibt sich das Modell M2.

M2: Deterministisches DTCTOP	
Maximiere $G(\mathbf{FZ}, \mathbf{y}, \mathbf{r}, T) = N - \left(g \cdot T + \sum_{m \in M} c_m \cdot y_m \right)$	(8)
unter den Nebenbedingungen (3), (6) - (8) sowie	
$-FZ_i + FZ_j \geq d_{ij} - \sum_{m \in M} y_m \cdot r_{ijm} \cdot d_{ij}$	für $(i,j) \in E$ (9)
$\sum_{m \in M} c_m \cdot y_m \leq B$	(10)
$y_m \in \{0, 1\}$	für $m \in M$ (11)

4 Zu verschiedenen Varianten des DTCTOP mit und ohne explizite Berücksichtigung von Ressourcen sowie Lösungsverfahren vgl. u.a. De et al. (1995), Demeulemeester et al. (1996, 1998), Kolisch und Drexl (1997), Sprecher et al. (1997), Gutjahr et al. (1998), Sprecher und Drexl (1998), Skutella (1998) sowie Brucker et al. (1999, Kap. 4 und 5).

5 Es gilt $r_{ijm} = 0$, falls der Modus m nicht auf den Vorgang (i, j) wirkt.

Im folgenden gehen wir ausschließlich vom LTCTOP aus, entsprechende Erweiterungen unserer Überlegungen gelten jedoch auch für das DTCTOP. Dies geschieht vorwiegend aus Gründen der besseren Lösbarkeit entsprechender Modellinstanzen.

3 Methoden zur Berücksichtigung von Unsicherheit

Die im vorigen Kapitel betrachteten Modelle M1 und M2 gehen davon aus, daß alle Problemparameter fest vorgegeben sind bzw. mit hinreichender Genauigkeit prognostiziert werden können. Bei der Projektplanung können jedoch verschiedene Parameter erheblichen unbekanntem externen und zufälligen Einflüssen ausgesetzt sein und dementsprechend einen mehr oder weniger stochastischen Charakter besitzen. Den stärksten Einflüssen unterliegen sicherlich die Vorgangsdauern, wo Überschreitungen geschätzter Werte um über 50% keine Seltenheit sind.

Jedoch können auch andere Parameter wie das verfügbare Budget und die maximale Beschleunigung von Vorgängen in gewissen Grenzen unsicher sein. Bei knappen Kapazitäten sind die Ressourcenverfügbarkeit und die Ressourcenverbräuche der Vorgänge vielfach stochastischen Einflüssen ausgesetzt.⁶ Im Falle des (unkapazitierten) LTCTOP würde dies bedeuten, daß die Beschleunigungskosten und die fixen Ausführungskosten bei Normaldauer unsicher wären.

3.1 Informationslage, Risikoeinstellung und Robustheitskriterien

Bezüglich der Informationslage lassen sich im wesentlichen drei Fälle unterscheiden (vgl. Sieben und Schildbach 1994, S. 15 ff., Saliger 1998, S. 21 ff.):

- **Sicherheit:** Die Werte der Problemparameter sind bekannt; dieser Fall wird von den zuvor betrachteten deterministischen Modellen unterstellt.
- **Risiko:** Es sind verschiedene mögliche Szenarien (Umweltlagen, Datenkonstellationen) sowie (subjektive oder objektive) Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt.
- **Ungewißheit:** Es können zwar verschiedene Szenarien ermittelt werden, es lassen sich jedoch keine Wahrscheinlichkeiten zuordnen.

Die Art und das Ausmaß, mit der Unsicherheit bei der Planung berücksichtigt wird, hängt von der Risikoeinstellung des Entscheidungsträgers ab. Besitzen Handlungsalternativen in Abhängigkeit von den Szenarien unterschiedliche mögliche Ergebnisse, so wird sie ein risikofreudiger Entscheidungsträger eher nach den günstigsten und ein risikoscheuerer Entscheidungsträger eher nach den ungünstigsten möglichen Ergebnissen beurteilen. Risikoinferenz liegt vor, wenn die Beurteilung einer Handlungsalternative allein nach dem erwarteten Ergebnis ohne Berücksichtigung der potentiellen Ergebnisschwankungen erfolgt.

⁶ Kapazitäten werden in Time-Cost-Tradeoff-Problemen häufig nicht explizit betrachtet. Es erfolgt dann lediglich eine kostenmäßige Erfassung über fixe Kosten der Vorgangsausführung und Beschleunigungskosten. Dies beruht darauf, daß man bei einer mittelfristigen Planung davon ausgehen kann, daß benötigte Kapazitäten gegen Bezahlung in beliebiger Höhe beschaffbar sind (z.B. durch Fremdvergabe oder Anmieten von Betriebsmitteln).

Vor allem risikoscheue Entscheidungsträger sind an **robusten** Lösungen interessiert, also an solchen Plänen, die für alle bzw. viele Szenarien günstig beurteilt werden. In diesem Fall sind während der Planrealisierung Änderungen nie oder nur selten vorzunehmen und extrem ungünstige Entwicklungen nicht zu befürchten. Die Robustheit einer Lösung kann dabei hinsichtlich folgender allgemeiner Kriterien beurteilt werden, die wir nur verbal formulieren wollen:⁷

- Wenn das erzielbare Ergebnis (z.B. Gewinn) einer Lösung für (fast) jedes Szenario bzw. mit hoher Wahrscheinlichkeit eine vorgegebene Grenze (Anspruchsniveau) erreicht oder überschreitet, nennen wir sie (total oder relativ) **ergebnisrobust**.
- Eine Lösung ist (total bzw. relativ) **ergebnisstabil**, wenn der absolute Ergebniswert für alle Szenarien identisch ist bzw. nur geringfügig schwankt oder mit hoher Wahrscheinlichkeit in einem gewünschten Bereich liegt.
- Eine Lösung, die für jedes Szenario zulässig bzw. nur wenig von der Zulässigkeit entfernt ist, wird als (total bzw. relativ) **zulässigkeitsrobust** bezeichnet.
- Eine Lösung ist (total oder relativ) **optimalitätsrobust**, wenn ihr Ergebnis für jedes Szenario optimal ist bzw. nur geringfügig vom optimalen Wert abweicht.
- Eine Lösung ist (total oder relativ) **informationsrobust**, wenn sich bei verbessertem Informationsstand keine bzw. nur eine geringfügig schlechtere Einschätzung bezüglich der zuvor genannten Kriterien ergibt. Dabei bezeichnen wir den bei der Planung verwendeten Informationsstand mit A und den bestmöglichen, der sich bei maximalem Aufwand an Informationsbeschaffungsaktionen erzielen ließe, mit B.

Falls existent, sucht ein Entscheidungsträger sicherlich eine Lösung, die sowohl total optimalitätsrobust (die bestmögliche Ergebnisrobustheit ist damit gegeben), total zulässigkeitsrobust als auch total informationsrobust ist. Eine solche Lösung wird es in der Regel jedoch nicht geben, und man muß versuchen, relativ robuste Lösungen bezüglich eines oder mehrerer der obigen Kriterien zu bestimmen. Je risikoscheuer der Entscheidungsträger ist, desto eher strebt er danach, daß die Robustheitskriterien möglichst gut erfüllt werden. Insbesondere ist ein risikoscheuerer Entscheidungsträger daran interessiert, Lösungen so zu gestalten, daß sie auch bei ungünstiger Umweltentwicklung zu akzeptablen Zielfunktionswerten führen.

Es bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten an, die Unsicherheit in Optimierungsmodellen zu berücksichtigen. Während *deterministische Ersatzwertmodelle* die Unsicherheit bei der Modellierung eliminieren, bilden *robuste bzw. stochastische Optimierungsmodelle* diese explizit im Modell ab.

3.2 Deterministische Ersatzwertmodelle

Die Unsicherheit wird aus dem Modell dadurch eliminiert, daß man jeden stochastischen Parameter durch einen geeigneten deterministischen Ersatzwert ersetzt.

⁷ Zum Begriff der Robustheit sowie zur genaueren Definition der verschiedenen Robustheitsseigenschaften vgl. Scholl (2000, Kap. 4.1 und 4.2).

Daher spricht man von deterministischen Ersatzwertmodellen (abgekürzt: D-Modelle). Es lassen sich v.a. zwei Formen unterscheiden:

- **Erwartungswertmodelle:** Für die unsicheren Parameter wird jeweils der Erwartungswert (erstes Moment der Verteilung, Mittelwert) oder der Modalwert (wahrscheinlichster Wert, Maximum der Dichtefunktion) der Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Planung verwendet. Sind keine Wahrscheinlichkeiten bekannt, wird der Mittelwert oder plausibelste Wert des möglichen Wertebereichs verwendet.

- **Sicherheitskorrekturen:** Es wird für jeden Parameter z.B. der um einen Sicherheitszuschlag erhöhte Erwartungswert verwendet. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, daß der tatsächliche Wert des betreffenden Parameters nicht höher als der bei der Planung verwendete ist. Die vorzunehmenden Korrekturen sind umso größer, je risikoscheuer der Entscheidungsträger ist.

Im Hinblick auf das Erwartungswertmodell ist zu beachten, daß sogar im Fall nicht beschleunigbarer Vorgänge (PERT) die Verwendung der erwarteten Vorgangsdauern bei der Berechnung der erwarteten Projektdauer mit zunehmender Anzahl an Vorgängen zu beliebig großen Schätzfehlern führen kann.⁸ Das Einplanen von Sicherheitsabständen (Puffern) durch Erhöhung der verwendeten Dauern kann zu sehr viel besseren Ergebnissen führen. Allerdings ist die Wahl eines passenden Sicherheitsniveaus problematisch.

3.3 Stochastische und robuste Optimierungsmodelle

Berücksichtigt man die verfügbaren Informationen über die unsichere Umweltentwicklung vollständig, so entstehen *stochastische Optimierungsmodelle*, bei denen auch der (optimale) Zielfunktionswert eine Zufallsvariable ist. Dabei sind zwischen den stochastischen Vorgangsdauern Abhängigkeiten zu berücksichtigen, so daß es nicht angebracht ist, jede Dauer als unabhängige Zufallsvariable mit einer bestimmten Verteilung anzunehmen. Stattdessen ist die Betrachtung der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilung der stochastischen Dauern aller Vorgänge erforderlich (vgl. Brucker et al. 1999, Kap. 8).

Wir gehen im folgenden von einer diskreten gemeinsamen Verteilung der Dauern in Form von Szenarien und zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten aus. Dies ist aus praktischer und methodischer Sicht der Verwendung stetiger Verteilungsfunktionen vorzuziehen, auch wenn diese theoretisch elegantere Eigenschaften aufweisen.

Stochastische Modelle der Projektplanung werden in der Literatur relativ selten betrachtet.⁹ Modelle und Lösungsansätze für verschieden ausgeprägte stochastische Time-Cost Tradeoff-Probleme beschreiben Cleef und Gaul (1982), Wollmer (1984) und Gutjahr et al. (1998).

8 Vgl. Fulkerson (1962), Heller (1981) oder Moder et al. (1983). Somit werden bei PERT aufwendigere analytische und Simulationsansätze zur besseren Abschätzung der erwarteten Projektdauer und der Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit von Vorgängen zu kritischen Pfaden eingesetzt; vgl. Möhring und Radermacher (1989), Bowman (1995) oder Brucker et al. (1999, Kap. 8.1) und die dort angegebene Literatur.

Wir sprechen im folgenden jedoch nicht von stochastischen, sondern von **robusten Optimierungsmodellen**, da der Aspekt der Erzielung robuster Lösungen im Mittelpunkt stehen soll. Insbesondere ist das Streben nach Vermeidung ungünstiger Entwicklungen von Bedeutung. Bei robusten Modellen handelt es sich formal zwar um stochastische Modelle, letztere basieren jedoch – wie auch die zuvor genannten – in der Regel lediglich auf der Optimierung von Erwartungswerten, wohingegen die robuste Optimierung auch und gerade andere Zielkriterien in den Mittelpunkt stellt.

3.3.1 Grundlagen

Es wird davon ausgegangen, daß K verschiedene Szenarien, für die Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt sind, die unsichere Umweltentwicklung vollständig beschreiben. Das bedeutet, es wird unterstellt, daß eines der Szenarien tatsächlich eintritt wird. Zur Beschreibung der vorliegenden Entscheidungssituation verwenden wir folgende Bezeichnungen:

\mathbf{x} Vektor der Entscheidungsvariablen (Plan, Lösung)

P_k Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenario $k = 1, \dots, K; \sum_{k=1}^n P_k = 1$

X_k zulässiger Lösungsbereich für Szenario k

$z_k(\mathbf{x})$ zu maximierende Zielfunktion für Szenario k

z_k^* optimaler Zielfunktionswert für Szenario $k; z_k^* = \max \{z_k(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in X_k\}$

$X^{\min} = \bigcap_{k=1}^K X_k$ Bereich der Lösungen, die für alle Szenarien zulässig sind

Die Zielsetzung der Entscheidungsaufgabe besteht grundsätzlich darin, eine total optimalitäts- und zulässigkeitsrobuste Lösung (Plan) \mathbf{x}^* zu finden. Es wird also eine solche Lösung gesucht, die sowohl für jedes Szenario zulässig ist (d.h. $\mathbf{x}^* \in X^{\min}$) als auch jeweils zu einem maximalen Zielfunktionswert führt (d.h. $z_k(\mathbf{x}^*) = z_k^*$). Läßt sich ein solcher Plan finden, ist er sicherlich optimal und in jedem Fall zulässig für die betrachtete Entscheidungssituation unter Unsicherheit. Der Regelfall ist jedoch ein anderer:

1. *Optimalität bzw. Präferenz:* In der Regel ergibt sich ein Zielkonflikt, so daß es sich bei dem stochastischen Modell um eine Aufgabenstellung mit Mehrfachzielen (multikriterielles Modell) handelt. Dies tritt immer dann auf, wenn ein für eines der Szenarien optimaler Plan nicht optimal oder nicht zulässig für eines der anderen Szenarien ist. Es ist daher ein - wie auch immer gearteter - Kompromiß bezüglich der für die einzelnen Szenarien resultierenden Zielerreichung zu finden. Man sucht also eine Kompromißlösung $\bar{\mathbf{x}}$, die für alle oder die meisten Szenarien einen möglichst hohen Zielfunktionswert ergibt. Man kann auch an einer

9 Vgl. Golenko-Ginzburg und Gonik (1998) oder Brucker et al. (1999, Kap. 8.2). Dies steht im Gegensatz zur Fülle der Literatur zu PERT. Dabei handelt es sich jedoch nicht um Planungsprobleme, da keine konkreten Projektpläne erzeugt, sondern lediglich bestimmte Kenngrößen des Projekts (z.B. erwartete Projektdauern) analysiert werden.

solchen Lösung interessiert sein, deren Zielfunktionswert im ungünstigsten Fall möglichst groß ist.

2. **Zulässigkeit:** Die Menge X^{\min} ist u.U. sehr klein oder sogar leer. Außerdem steht zu erwarten, daß ggf. enthaltene Lösungen eher ungünstig in bezug auf die Zielerreichungsgrade der einzelnen Szenarien sein werden. Es ist also nicht in jedem Fall sinnvoll zu fordern, daß die Kompromißlösung \bar{x} für jedes Szenario zulässig sein muß. Jedoch muß man sich dann Gedanken darüber machen, in welchem Maß Unzulässigkeiten zugelassen werden sollen und/oder welche Maßnahmen zur Wiedererlangung der Zulässigkeit zu ergreifen sind.

Vereinfacht gesprochen besteht ein **robustes Optimierungsmodell** darin, eine für alle Szenarien sinnvolle und möglichst zulässige Lösung zu finden, die jeweils möglichst hohe Zielfunktionswerte aufweist und besonders ungünstige Entwicklungen gezielt vermeidet. Je nachdem, wie die Problemkreise "Optimalität" und "Zulässigkeit" behandelt werden, lassen sich verschiedene Ansätze der Formulierung deterministischer Ersatzmodelle unterscheiden.

3.3.2 Ersatzmodelle

Für jede Kombination aus einer Lösung x und einem Szenario k ergibt sich ein individueller Zielfunktionswert $z_k(x)$, falls die Zielfunktion stochastischen Einflüssen unterliegt. Für jedes x erhält man daher in Abhängigkeit von den Eintrittswahrscheinlichkeiten p_k der Szenarien eine Wahrscheinlichkeitsverteilung des zufallsabhängigen Ergebnisses.¹⁰ Es stellt sich somit das Problem, eine Handlungsalternative zu bestimmen, deren Wahrscheinlichkeitsverteilung am höchsten bewertet wird. Um die Entscheidungen vergleichbar zu machen, wird eine Präferenzfunktion definiert, die jeder Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zielfunktionswertes und damit jeder Handlungsalternative einen Präferenzwert zuordnet. Wegen dieser Ersetzung der Zufallsvariablen durch deterministische Werte spricht man auch von **Ersatzzielfunktionen** (vgl. Dinkelbach 1982, Kap. 2.1.4).

Unterscheiden sich die Szenarien nicht nur durch die Zielfunktion, sondern auch in den zulässigen Lösungsbereichen, so ist die Zulässigkeit bzw. Nichtzulässigkeit von Entscheidungen geeignet zu berücksichtigen. Zum Planungszeitpunkt ist unklar, ob eine Lösung zulässig oder unzulässig sein wird. Es ist daher für den stochastischen Lösungsbereich ebenso eine geeignete deterministische Ersatzformulierung, bezeichnet als (System von) **Ersatzrestriktionen**, zu bestimmen.

Insgesamt ergibt sich mit einer Ersatzzielfunktion und Ersatzrestriktionen ein deterministisches **Ersatzmodell**, das die Risikoeinstellung des Entscheidungsträgers in geeigneter Weise berücksichtigt soll. Im Gegensatz zum robusten (bzw. stochastischen) Optimierungsmodell läßt sich das deterministische Ersatzmodell mit eindeutiger Zielfunktion numerisch lösen

¹⁰ Bei Unkenntnis von Wahrscheinlichkeiten gehen wir zur Vereinfachung der Darstellung von Gleichwahrscheinlichkeit der Szenarien aus. Jedoch ist zu bedenken, daß die so verbesserte Informationslage die Realität nicht in jedem Fall korrekt widerspiegelt. Daher ist eher zu empfehlen, auf Wahrscheinlichkeitsinformationen gänzlich zu verzichten.

3.3.3 Ersatzzielfunktionen

Als Ersatzzielfunktionen kommen die gängigen Kriterien der Entscheidungstheorie in Frage, von denen wir die wichtigsten im folgenden zusammenstellen:¹¹

- **Erwartungswert-Kriterium (μ -Kriterium):** Die Ersatzzielfunktion maximiert den Erwartungswert der stochastischen Zielfunktion, der wie folgt definiert ist:

$$\mu = \sum_{k=1}^n p_k \cdot z_k(x)$$

Eine Entscheidung nach dem μ -Kriterium spiegelt eine risikoneutrale Haltung des Entscheidungsträgers wider. Es wird ohne Beachtung der Streuung der möglichen Zielfunktionswerte, die ein Maß für das mit einer Entscheidung verbundene Risiko darstellt, nach möglichst großem mittlerem Zielfunktionswert getrachtet. Daher kann zwar allgemein keine Aussage darüber getroffen werden, ob erzielte Lösungen tatsächlich (relativ) ergebnis- oder optimalitätsrobust sind, jedoch ist dies aufgrund der gleichzeitigen Beachtung aller Szenarien im allgemeinen zu erwarten. Die Zulässigkeitsrobustheit hängt vorwiegend von der Art der Behandlung der Nebenbedingungen ab.

- **Hodges-Lehmann-Kriterium:** Es maximiert die Summe aus Erwartungswert μ und mit $q > 0$ gewichtetem schlechtestem Wert $\min\{z_k(x) | k=1, \dots, K\}$. Dadurch werden negative Extremschwankungen in der Zielfunktion berücksichtigt, um sich gegen sehr ungünstige Entwicklungen abzusichern. Dabei werden das μ -Kriterium und das unten angegebene Maxi-Min-Kriterium kombiniert.

- **Fraktal-Kriterium:** Es wird eine Lösung x gesucht, die einen möglichst großen Zielfunktionswert mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit $\omega \in [0, 1]$ erreicht. Es wird also ein Wert $\bar{z}(x)$ maximiert, für den $W(z(x) \geq \bar{z}(x)) \geq \omega$ gilt (mit $z(x)$ = Zufallsvariable für den Zielfunktionswert der Lösung x).

Problematisch ist die Wahl des vorzugebenden Parameters ω . Je höher ω gewählt wird, desto größer ist die Risikoscheu des Entscheidungsträgers und desto geringer wird $\bar{z}(x)$ ausfallen. Wegen dieses gegenläufigen Zusammenhangs wird man zufriedenstellende Ergebnisse zumeist nur mit geringer Wahrscheinlichkeit garantieren können. Erreicht man jedoch bei hohem ω einen ebenfalls hohen Wert $\bar{z}(x)$, so kann davon ausgegangen werden, daß die Lösung (relativ) ergebnisrobust ist.

- **Aspirations-Kriterium:** Hierbei wird die Wahrscheinlichkeit ω maximiert, mit der ein vorgegebener Zielfunktionswert \bar{z} (Anspruchs- oder Aspirationsniveau) erreicht wird. Dadurch wird die (Ruin-) Wahrscheinlichkeit minimiert, das Aspirationsniveau bzw. einen kritischen Ergebniswert zu unterschreiten. Analog zum Fraktal-Kriterium ist die Ermittlung des vorzugebenden Niveaus nicht unproblematisch. Läßt sich eine hohe Wahrscheinlichkeit ω erzielen, so handelt es sich bei einem sinnvollen Aspirationsniveau um eine relativ ergebnisrobuste Lösung.

¹¹ Zu diesen Regeln vgl. z.B. Pfohl und Braum (1981, Kap. 2), Bitz (1981, Kap. 2 und 3), Stieben und Schildbach (1994, Kap. II.C), Bamberg und Coenenberg (1996, Kap. 4 und 5). Zur ausführlichen Erörterung der Regeln im Hinblick auf ihre Robustheitseigenschaften vgl. Scholl (2000, Kap. 5.1).

Die folgenden Kriterien gelten auch und vor allem für Entscheidungssituationen bei Ungewißheit, da sie ohne Verteilungsinformationen auskommen:

- **Maxi-Min-Kriterium:** Es wird eine Lösung \mathbf{x} gesucht, für die $\min\{z_k(\mathbf{x}) \mid k=1, \dots, K\}$, der schlechteste Zielfunktionswert für ein Szenario, maximal ist. Bei dieser Ersatzzielfunktion wird für jede Lösung nur das zugehörige Worst Case-Szenario betrachtet und damit eine extrem risikoscheue (pessimistische) Entscheidungshaltung ausgedrückt. Man erhält relativ ergebnisstabile und bei niedrigem Anspruchsniveau u.U. relativ ergebnisrobuste Lösungen, die jedoch bei stark schwankenden szenariooptimalen Werten wenig optimalitätsrobust sind.

- **Maxi-Max-Kriterium:** Es wird eine Lösung \mathbf{x} gesucht, für die $\max\{z_k(\mathbf{x}) \mid k=1, \dots, K\}$, der beste Zielfunktionswert für ein Szenario, maximal ist. Damit wird für jede Lösung nur das zugehörige Best Case-Szenario betrachtet, so daß es sich um ein extrem risikofreudiges (optimistisches) Kriterium handelt. Es sind weder relativ ergebnis- noch optimalitätsrobuste Lösungen zu erwarten. Somit ist dieses Kriterium als Ersatzzielfunktion der robusten Optimierung sicherlich wenig geeignet.

- **Hurwicz-Kriterium:** Die Ersatzzielfunktion maximiert bei vorgegebenem Optimismusparameter $\lambda \in [0, 1]$ die Linearkombination aus schlechtestem und bestem Wert:

$$\lambda \cdot \min\{z_k(\mathbf{x}) \mid k=1, \dots, K\} + (1-\lambda) \cdot \max\{z_k(\mathbf{x}) \mid k=1, \dots, K\}$$

Je größer λ wird, desto risikoscheuer wird die Entscheidungshaltung. Für $\lambda = 0$ ergibt sich das Maxi-Max-Kriterium, für $\lambda = 1$ das Maxi-Min-Kriterium. Bezüglich der erwarteten Robustheit von Lösungen gelten obige Aussagen kombiniert.

- **Mini-Max-Regret-Kriterium (auch Savage-Niehans-Kriterium):** Man beurteilt eine Lösung \mathbf{x} danach, wie ihre Zielfunktionswerte $z_k(\mathbf{x})$ vom jeweiligen szenariooptimalen Zielfunktionswert z_k^* abweichen. Da diese Abweichungen einen Verlust gegenüber dem günstigsten Fall ausdrücken, bezeichnet man sie als Maß des Bedauerns (Regret bzw. Opportunitätskosten). Es wird diejenige Lösung \mathbf{x} ermittelt, bei der der größte Regretwert am geringsten ist. Die Ersatzzielfunktion besteht demnach in der Minimierung von:

$$\max\{z_k^* - z_k(\mathbf{x}) \mid k=1, \dots, K\}$$

Das Mini-Max-Regret-Kriterium drückt, wie das Maxi-Min-Kriterium, eine eher pessimistische Entscheidungshaltung aus, da man in keinem Fall große Einbußen gegenüber dem bestmöglichen realisierbaren Zielfunktionswert in Kauf nehmen will. Man erhält relativ oder sogar total optimalitätsrobuste Lösungen, die bei stark schwankenden szenariooptimalen Werten wenig ergebnisstabil sind.

- **Relatives Mini-Max-Regret-Kriterium:** Das Maß des Bedauerns wird nicht als absolute, sondern als relative Größe berechnet. In diesem Fall besteht die Zielsetzung in der Minimierung von:

$$\max\left\{\frac{z_k^* - z_k(\mathbf{x})}{z_k^*} \mid k=1, \dots, K\right\}$$

Der Vorteil relativer Regretwerte gegenüber absoluten besteht im Hinblick auf die Robustheit darin, daß sie die Abweichung vom bestmöglichen Wert in Beziehung zu dessen absoluter Höhe setzen. Dadurch werden Abweichungen bei ungünstigeren Szenarien stärker berücksichtigt als gleichgroße bei günstigen.

Sind Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt, kann auch folgendes Kriterium Anwendung finden:¹²

- **Relatives Regret-Erwartungswert-Kriterium:** Zu minimieren ist:

$$\sum_{k=1}^n p_k \left| \frac{z_k^* - z_k(\mathbf{x})}{z_k^*} \right|$$

Bezüglich der Erfüllung von Robustheitskriterien läßt sich, wie beim μ -Kriterium, keine allgemeine Aussage treffen. Es ist jedoch zu erwarten, daß Lösungen eher (relativ) optimalitätsrobust als (relativ) ergebnisrobust sein werden.

3.3.4 Ersatzrestriktionen

Zur Behandlung des Problemkreises "Zulässigkeit" bieten sich wie bei den Ersatzzielfunktionen verschiedene Modellierungsmöglichkeiten an:¹³

- **Fat Solution-Modelle (F-Modelle):** Es werden nur solche Handlungsalternativen zugelassen, die für jedes Szenario zulässig sind. Das heißt, es wird $\mathbf{x} \in X_{\min}$ gefordert. Wie schon angesprochen kann dieser Lösungsbereich sehr klein oder sogar leer sein. Jede enthaltene Lösung ist total zulässigkeitsrobust und bei deterministischer Zielfunktion auch total ergebnisstabil. Jedoch ist durch die extrem risikoscheue Entscheidungshaltung zu erwarten, daß solche Lösungen wenig ergebnis- und optimalitätsrobust sind.

- **Chance-Constrained-Modelle (CC-Modelle):** Die Einhaltung der Nebenbedingungen wird nicht strikt, sondern nur mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten gefordert. Dies läßt sich mit Hilfe von Binärvariablen $\delta_k(\mathbf{x})$ abbilden, die den Wert 1 für den Fall $\mathbf{x} \in X_k$ und ansonsten den Wert 0 erhalten. Mit gegebener Zulässigkeitswahrscheinlichkeit $\alpha \in [0, 1]$ läßt sich die Zulässigkeit einer Lösung \mathbf{x} durch folgende Ungleichung formulieren:¹⁴

$$\sum_{k=1}^n p_k \cdot \delta_k(\mathbf{x}) \geq \alpha$$

Auf diese Weise wird eine Mindestwahrscheinlichkeit für die *gemeinsame* Erfüllung aller Nebenbedingungen gefordert. Wir bezeichnen diese Ausprägung als **simultane CC-Modelle**.

Es läßt sich jedoch auch für jede Nebenbedingung *getrennt* eine derartige Erfüllungswahrscheinlichkeit vorgeben (vgl. Kall und Wallace 1994, Kap. 4). Wir sprechen von **separierten CC-Modellen**. In diesem Fall ist zu beachten, daß die

¹² Die Minimierung des absoluten Regretwertes $\sum_{k=1}^n p_k \cdot (z_k^* - z_k(\mathbf{x}))$ ist äquivalent zum μ -Kriterium und wird nicht gesondert betrachtet; vgl. Scholl (2000, Kap. 5.1).

¹³ Vgl. Bühler und Dieck (1973), Dinkelbach (1982, Kap. 2.3), Kall und Wallace (1994, Kap. 1), Vladimirov und Zenios (1997) sowie Scholl (2000, Kap. 3.2.3).

¹⁴ Mit $\alpha = 1$ geht ein CC-Modell in ein Fat-Solution-Modell über.

Wahrscheinlichkeit der gemeinsamen Erfüllung aller Nebenbedingungen, d.h. der Zulässigkeit der Lösung, mit wachsender Anzahl der Nebenbedingungen drastisch abnimmt. Ist z.B. jede von fünf (voneinander unabhängigen) Nebenbedingungen $i=1, \dots, 5$ mit Wahrscheinlichkeit $\alpha_i = 0,9$ erfüllt, so ist die Lösung mit Wahrscheinlichkeit $0,9^5 = 0,59$ tatsächlich (vollständig) zulässig. Bei 50 Nebenbedingungen sinkt die Zulässigkeitswahrscheinlichkeit auf 0,005.

- **Kompensations- bzw. Recourse-Modelle (K-Modelle):** Es wird unterstellt, daß Verletzungen der Nebenbedingungen, die nach Eintreten einer bestimmten Umweltsituation (Realisierung eines Szenarios) auftreten können, durch gezielte Gegenmaßnahmen ausgleichbar (kompensierbar) sind. Diese Kompensationsmaßnahmen sind also nicht zum Planungszeitpunkt, sondern erst bei Durchführung eines Planes in Abhängigkeit vom realisierten Szenario festzulegen. Dennoch werden solche Kompensationsmaßnahmen, die in der Regel mit Zielfunktionswertmindernden Kosten verbunden sind, für jedes Szenario bereits bei der Planung antizipiert und in die Entscheidung mit einbezogen.

Bei der Projektplanung können Kompensationsmaßnahmen etwa darin bestehen, szenarioabhängige Beschleunigungen der Vorgänge sowie die Auswirkungen von Verzögerungen bei wichtigen Meilensteinen einzuplanen. Diese Maßnahmen tragen nicht nur – wie im deterministischen Fall – möglicherweise zu besseren Zielfunktionswerten bei, sondern stellen auch Möglichkeiten zur (nachträglichen) Erreichung der Zulässigkeit von Plänen dar. Im Gegensatz zu CC-Modellen geht nicht nur die Wahrscheinlichkeit von Nebenbedingungsverletzungen in die Planung ein, sondern es werden deren Ausmaß und kostenmäßige Konsequenzen explizit berücksichtigt.

- Eine **Kombination aus Kompensations- und Chance-Constrained-Modellen (KCC-Modellen)** bezieht ebenfalls Kompensationsmaßnahmen ein, fordert jedoch die Einhaltung der Nebenbedingungen (auch derjenigen, die Kompensationsmaßnahmen betreffen) nur mit einer bestimmten Zulässigkeitswahrscheinlichkeit. Dieser Ansatz kann in einigen Konstellationen die Vorzüge beider Typen zusammenführen.

Aus obigen Ausführungen ergibt sich unmittelbar, daß K-Modelle anderen Ansätzen immer dann vorzuziehen sind, wenn die operativen Maßnahmen, die während der Plandurchführung zur Wiedererlangung der Zulässigkeit erforderlich werden können, bereits zum Planungszeitpunkt bekannt und planbar sind. Eine Schwierigkeit kann darin bestehen, die erfolgsminimierenden (Kosten-) Wirkungen der Maßnahmen zu antizipieren. Wenn auch die Kompensationsmöglichkeiten beschränkt sind (maximale Beschleunigung eines Vorgangs mit eigenen Ressourcen), müssen ggf. weitere Kompensationsmaßnahmen (weitere Beschleunigung mit Hilfe fremder Ressourcen) berücksichtigt werden, die in der Regel zu höheren Kosten führen.

4 LTCTOP bei Unsicherheit der Normaldauern

Im folgenden beschränken wir uns auf den Fall, daß lediglich die Vorgangsdauern stochastischer Natur sind und gehen stets vom deterministischen Grundmodell M1

für das LTCTOP aus. Somit sind die Normaldauern d_{ij} durch *szenarioabhängige Normaldauern* d_{ij}^k mit $k=1, \dots, K$ zu ersetzen.

Erweiterungen der vorgestellten Modelle im Hinblick auf Unsicherheiten bei anderen Problemparametern lassen sich relativ leicht vornehmen, verkomplizieren jedoch sowohl die Modellbeschreibungen als auch die experimentellen Untersuchungen. Außerdem sind Vorgangsdauern in der Praxis sicherlich am stärksten von Unsicherheit betroffen.

Gemäß der Unterscheidung in Kap. 3 betrachten wir einerseits deterministische Ersatzwertmodelle und andererseits robuste Optimierungmodelle mit verschiedenen Ersatzzielfunktionen und Ersatzrestriktionen.

4.1 Deterministische Ersatzwertmodelle

Diese Modelle entsprechen formal dem Grundmodell M1, da sie anstelle der stochastischen Vorgangsdauern geeignete deterministische Ersatzwerte d_{ij} verwenden.

Wir wollen folgende Ersatzwertmodelle betrachten:

- **D-EW:** Der unsichere Parameter wird durch seinen Erwartungswert ersetzt; für die Vorgangsdauern gilt für alle Vorgänge (i,j):

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^K p_k \cdot d_{ij}^k$$

- **D-W:** Jeder Parameter wird durch den schlechtestmöglichen Wert, also die maximale Vorgangsdauer ersetzt, d.h. $d_{ij} = \max\{d_{ij}^k \mid k=1, \dots, K\}$. Es handelt sich um das *absolute Worst Case-Szenario*.⁵

- **D-B:** Jeder Parameter wird durch seinen bestmöglichen Wert ersetzt (*absolute Best Case-Szenario*): $d_{ij} = \min\{d_{ij}^k \mid k=1, \dots, K\}$

- **D-ES:** Es handelt sich um eine Modifikation von D-EW, bei der der Erwartungswert der Vorgangsdauern um einen multiplikativen Sicherheitszuschlag s nach oben korrigiert wird:

$$d_{ij} = \left(\sum_{k=1}^K p_k \cdot d_{ij}^k \right) \cdot s, \text{ mit } s > 1 \text{ als Sicherheitszuschlagsfaktor}$$

- **D-Q(α):** Hierbei handelt es sich um einen Spezialfall eines separierten CC-Modells; vgl. Kap. 4.2.1.5. Wir betrachten die Zulässigkeitswahrscheinlichkeiten $\alpha = 0,7, 0,8$ und $0,9$.

4.2 Robuste Optimierungmodelle

Die drei Typen von Ersatzrestriktionen (Fat Solution, Chance-Constrained, Kompensation; siehe Kap. 3.3.4) werden mit den in Kap. 3.3.3 eingeführten Ersatzzielfunktionen kombiniert. Alle entstehenden Modelle sind mit Standardsoftware zur linearen bzw. ganzzahlig-linearen Optimierung lösbar.

⁵ Das absolute Worst bzw. Best Case-Szenario muß nicht in der Menge der denkbaren Szenarien enthalten sein. Dies ist der Fall, wenn die stochastischen Dauern verschiedener Vorgänge negativ korreliert sind.

Grundlage der Modelle ist das Grundmodell M1 aus Kap. 2.2.1. Zuerst werden die Modelle in bezug auf die Ersatzrestriktionen und dann in bezug auf die Ersatzziel-funktionen variiert.

4.2.1 Ersatzrestriktionen

Die nachfolgenden Modelle stellen die Umsetzung der in Kap. 3.3.4 beschriebenen Modellierungsmöglichkeiten zum Umgang mit der Problematik der Zulässigkeit dar. Dabei gehen wir stets vom μ -Kriterium als Ersatzziel-funktion aus. Sie lassen sich jedoch ohne weiteres gemäß der in Kap. 4.2.2 angegebenen Modellierungsansätze mit allen anderen Ersatzziel-funktionen kombinieren.

4.2.1.1 Fat Solution-Modelle

Bei einem Fat Solution-Modell (F-Modell) ist die totale Zulässigkeitsrobustheit zu garantieren. Dies geschieht im Modell M3 (später als **F-EW** bezeichnet) mit Hilfe der gegenüber dem Grundmodell M1 modifizierten Reihenfolgebedingungen (13) und Budgetbedingungen (14). Durch die Zielfunktion (12) wird gemäß μ -Kriterium der Erwartungswert des Gewinns maximiert, der sich als Differenz aus Nettoerlös N , den szenariounabhängigen Projektverzugskosten $g \cdot T$ und den erwarteten Beschleunigungskosten ergibt. Letztere Größe läßt sich so umformen, daß die Zielfunktion des Modells D-EW (vgl. Kap. 4.1) entsteht.

M3: Fat Solution-Modell mit μ -Kriterium (F-EW)
Maximiere $EW(FZ, v, T) = N - g \cdot T - \sum_{k=1}^k p_k \cdot \left(\sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij} \cdot d_{ij}^k \right)$ (12)
unter den Nebenbedingungen (3) und (5) - (7) sowie
$-FZ_j + FZ_j \geq \max\{d_{ij}^k \mid k=1, \dots, K\} \cdot (1 - v_{ij})$ für $(i,j) \in E$ (13)
$\sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij} \cdot d_{ij}^k \leq B$ für $k = 1, \dots, K$ (14)

Eine vereinfachte Variante des Fat Solution-Modells erhält man durch Ersetzen von d_{ij} durch $\max\{d_{ij}^k\}$ im Grundmodell M1, da in diesem Fall die bei der Berechnung verwendeten (Normal-) Vorgangsdauern in keinem der Szenarien überschritten und somit die entsprechenden Nebenbedingungen garantiert nicht verletzt werden. Das resultierende Modell entspricht dem in Kap. 4.1 eingeführten Modell D-W.

4.2.1.2 Kompensationsmodelle

Zu ermitteln ist ein Projektplan, der durch Start- und Endzeitpunkte der Vorgänge und somit durch Ereigniszeitpunkte FZ_j definiert ist. Diese Zeitpunkte sind Grundlage sämtlicher weiterer Planungen zur operativen Ausgestaltung des Projektablaufs. Ein solcher Zeitplan ist jedoch aufgrund der Unsicherheit der Normaldauern ggf. nicht in allen Szenarien zulässig ausführbar.

K-Modelle gestatten die Antizipation von Ausgleichsmaßnahmen bei Verletzungen der Nebenbedingungen, die nach Eintreten einer bestimmten Umweltsituation auftreten können, schon bei der Planung. Wir wollen folgende Formen der Zulässigkeitsverletzung und zugehörige Kompensationsmaßnahmen berücksichtigen:

Verzögerungen der geplanten Ereigniszeitpunkte FZ_j sind grundsätzlich erlaubt, verursachen jedoch (zumindest bei wichtigen Meilensteinen) zusätzliche *Verzugskosten* kv_j pro ZE, die entweder unmittelbar entstehen oder in Form von Opportunitätskosten, z.B. für die Nichtnutzung angeforderter Maschinen, auftreten können. Um den Verzug u_j^k des Ereignisses j , der bei Realisierung eines bestimmten Szenarios k eintreten kann, auszugleichen, können Vorgänge (anstelle einer einheitlichen Beschleunigung um den Faktor v_{ij}) eine *szenarioabhängige Beschleunigung* um den Faktor v_{ij}^k erfahren. Dabei fallen die Kosten kb_{ij} pro ZE der Beschleunigung des Vorgangs (i,j) an. Die Summe der anfallenden Verzugskosten sowie der Beschleunigungskosten müssen kurzfristig aus dem zur Verfügung stehenden Budget gedeckt werden. Aus den szenarioabhängigen Normaldauern d_{ij}^k und Beschleunigungen v_{ij}^k ergibt sich ein szenarioabhängiges Projektende $FZ_n + u_n^k$ und ggf. ein positiver szenarioabhängiger Projektverzug T_k .

Als zusätzliche bzw. modifizierte Parameter und Variablen sind gegenüber den vorhergehenden Modellen somit zu berücksichtigen:

- p_k Eintrittswahrscheinlichkeit für Szenario $k=1, \dots, K$
- d_{ij}^k Normaldauer für Vorgang (i,j) in Szenario k
- u_j^k Verzug von Ereignis j in Szenario k
- kv_j Verzugskosten von Ereignis j ($kv_n = 0$ wegen Projektverzugskosten g)
- v_{ij}^k Beschleunigungsfaktor von Vorgang (i,j) in Szenario k

Es ergibt sich das später als **K-EW** bezeichnete K-Modell M4.

Gegenüber dem Grundmodell M1 ist bei den genannten Parametern der zusätzliche Index k hinzugekommen, wodurch die Anzahl der (echten) Nebenbedingungen auf das K -fache steigt. In der Zielfunktion (15) wird der erwartete Gewinn als Differenz aus dem Nettoerlös N und den erwarteten Kosten (Projektverzug, Meilensteinverzug und Beschleunigungsmaßnahmen) berechnet. Die Einhaltung der Reihenfolgebeziehungen wird durch (16) sichergestellt. Der tatsächliche Zeitpunkt des Ereignisses j bei Eintritt der Umwelte k wird durch $FZ_j + u_j^k$ ausgedrückt. Die Differenz zweier realisierter Ereigniszeitpunkte muß mindestens so groß wie die Ausführungsdauer des dazwischenliegenden Vorgangs sein. (17) und (22) ermitteln den Projektverzug in Szenario k , der sich als Maximum von 0 und der Differenz zwischen tatsächlichem szenarioabhängigem Projektende $FZ_n + u_n^k$ und dem Endtermin PE bestimmen läßt. Die Nichtüberschreitung des Budgets durch projektbegleitende Beschleunigungs- und Verzugskosten wird für alle Szenarien durch (18) sichergestellt.⁶ Die Unglei-

M4: Kompensations-Modell mit μ -Kriterium (K-EW)	
Max. EW($\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{T}$) = $N - \sum_{k=1}^n p_k \cdot \left(g \cdot T_k + \sum_{j \in V} kv_j \cdot u_j^k + \sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij}^k \cdot d_{ij}^k \right)$	(15)
unter den Nebenbedingungen	
$-FZ_1 - u_1^k + FZ_j + u_j^k \geq d_{ij}^k \cdot (1 - v_{ij}^k)$	für $(i,j) \in E, k = 1, \dots, K$ (16)
$T_k \geq FZ_n + u_n^k - PE$	für $k = 1, \dots, K$ (17)
$\sum_{i \in V} kv_j \cdot u_j^k + \sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij}^k \cdot d_{ij}^k \leq B$	für $k = 1, \dots, K$ (18)
$0 \leq v_{ij}^k \leq \bar{v}_{ij}$	für $(i,j) \in E, k = 1, \dots, K$ (19)
$u_1^k = 0$	für $k = 1, \dots, K$ (20)
$u_j^k \geq 0$	für $j = 2, \dots, n; k = 1, \dots, K$ (21)
$T_k \geq 0$	für $k = 1, \dots, K$ (22)
$FZ_1 = 0, FZ_j \geq 0$	für $j = 2, \dots, n$ (23)

chungen (19) begrenzen die szenarioabhängigen Beschleunigungsfaktoren v_{ij}^k auf den maximalen Wert \bar{v}_{ij} . Die übrigen Restriktionen sind definitivischer Natur.

4.2.1.3 Kombinierte Chance-Constrained-Kompensations-Modelle

Das folgende Modell M5 stellt eine Kombination aus dem zuvor beschriebenen Kompensations-Modell und dem simultanen Chance-Constrained-Ansatz dar. Es werden einerseits die Kompensationsmaßnahmen aus M4 berücksichtigt, andererseits wird mit einer Wahrscheinlichkeit $1 - \alpha$ erlaubt, daß die Lösung unzulässig ist. Die mögliche Unzulässigkeit soll sich dabei auf die Budget- und die Beschleunigungsbedingungen erstrecken.

Für jedes Szenario $k=1, \dots, K$ wird in (28) eine Binärvariable ϕ_k definiert, die den Wert 1 erhält, falls die Budgetbedingung und die Beschleunigungsbedingung (18) und (19) in M4) für k gemeinsam eingehalten werden, und den Wert 0 sonst. Verwenden wir eine hinreichend große, positive Zahl M , so sind im Falle $\phi_k = 0$ die den genannten Bedingungen entsprechenden Restriktionen (25) und (26) unabhängig von den Werten der anderen Variablen stets erfüllt, ansonsten müssen sie in ihrer originalen Form eingehalten werden. Die Bedingung (27) garantiert, daß die ermittelte Lösung mindestens mit Wahrscheinlichkeit α zulässig ist.

16 Es sei nochmals angemerkt, daß Kosten für die Überschreitung des Endtermins PE mit dem Bruttoerlös verrechnet werden und somit das Budget für die Projektausführung nicht belasten.

M5: Komb. Chance-Constrained-Kompensations-Modell (1) mit μ -Kriterium	
Max. EW($\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{T}$) = $N - \sum_{k=1}^n p_k \cdot \left(g \cdot T_k + \sum_{j \in V} kv_j \cdot u_j^k + \sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij}^k \cdot d_{ij}^k \right)$	(24)
unter den Nebenbedingungen (16), (17) und (20) - (23) sowie	
$\sum_{i \in V} kv_j \cdot u_j^k + \sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij}^k \cdot d_{ij}^k \leq B + M \cdot (1 - \phi_k)$	für $k = 1, \dots, K$ (25)
$0 \leq v_{ij}^k \leq \bar{v}_{ij} + M \cdot (1 - \phi_k)$	für $(i,j) \in E, k = 1, \dots, K$ (26)
$\sum_{k=1}^n p_k \cdot \phi_k \geq \alpha$	(27)
$\phi_k \in \{0, 1\}$	für $k = 1, \dots, K$ (28)

Eine Alternative zu obiger Vorgehensweise besteht darin, die Zulässigkeit der Reihenfolgebedingungen (16) durch Addition von $M \cdot (1 - \phi_k)$ auf der linken Seite zu relaxieren. Im entsprechenden Modell M6 können die Budget- und Beschleunigungsbedingungen in ihrer ursprünglichen Form gemäß (18) und (19) beibehalten werden, da die Variablen v_{ij}^k und u_j^k bei Nichterfüllung von (16) aufgrund ihres Kostengewichts in der Zielfunktion ohnehin zu 0 gesetzt werden. Infolgedessen wird das Ausmaß an Unzulässigkeit in der Zielfunktion nicht berücksichtigt, wodurch die (reinen) CC-Modellen innewohnende Möglichkeit beliebig stark ausgeprägter Unzulässigkeit deutlicher zum Tragen kommt.

M6: Komb. Chance-Constrained-Komp.-Modell (2) mit μ -Kriterium (KCC-EW)	
Max. EW($\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{T}$) = $N - \sum_{k=1}^n p_k \cdot \left(g \cdot T_k + \sum_{j \in V} kv_j \cdot u_j^k + \sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij}^k \cdot d_{ij}^k \right)$	(29)
unter den Nebenbedingungen (17) - (23) und (27) - (28) sowie	
$-FZ_1 - u_1^k + FZ_j + u_j^k + M \cdot (1 - \phi_k) \geq d_{ij}^k \cdot (1 - v_{ij}^k)$	für $(i,j) \in E, k = 1, \dots, K$ (30)

Erste experimentelle Untersuchungen zeigen, daß die in M5 verwendete Struktur der Ersatzrestriktionen (für alle Ersatzzielfunktionen) zu sehr ähnlichen Ergebnissen führt wie die entsprechenden reinen K-Modelle. Daher werden wir im Rahmen unserer ausführlichen Rechenexperimente (vgl. Kap. 6) lediglich das Modell M6 (dort bezeichnet als **KCC-EW**) berücksichtigen.

4.2.1.4 Simultane Chance-Constrained-Modelle

Wir formulieren ein simultanes CC-Modell M7, das direkt vom Grundmodell M1 ausgeht und keine zusätzlichen Kompensationsmöglichkeiten in Form szenarioabhängiger Beschleunigungen oder Verzugskosten einbezieht.

M7: Simultanes Chance-Constrained-Modell mit μ-Kriterium (CC-EW)
Maximiere $EW(\mathbf{FZ}, \mathbf{v}, \mathbf{T}) = N - g \cdot T - \sum_{k=1}^K p_k \cdot \left(\sum_{(i,j) \in E} k b_{ij} \cdot v_{ij} \cdot d_{ij}^k \right)$ (31)
unter den Nebenbedingungen (3), (5) - (7), (27) und (28) sowie
$-FZ_1 + FZ_j + M \cdot (1 - \theta_k) \geq d_{ij}^k \cdot (1 - v_{ij})$ für $(i,j) \in E, k = 1, \dots, K$ (32)
$\sum_{(i,j) \in E} k b_{ij} \cdot v_{ij} \cdot d_{ij}^k \leq B + M \cdot (1 - \theta_k)$ $k = 1, \dots, K$ (33)

Wie im Fall von Modell M5 bestehen verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten in Bezug auf die Relaxierung der Zulässigkeitsbedingungen. So kann man entweder die Reihenfolgebedingungen (2) oder die Budgetbedingungen (4) oder beide gemeinsam zugrundelegen, während die Beschleunigungsbedingungen (5) aufgrund der Szenariunabhängigkeit der Beschleunigungsvariablen v_{ij} nicht betroffen sein können. Wir betrachten in Modell M7, das später als **CC-EW** bezeichnet wird, die gemeinsame Relaxation beider Bedingungstypen durch (32) und (33).

4.2.1.5 Separierte Chance-Constrained-Modelle

Hier wird jede einzelne von stochastischen Einflüssen betroffene Nebenbedingung des Grundmodells M1 isoliert betrachtet, und es wird jeweils gefordert, daß sie mit einer Wahrscheinlichkeit α_k zulässig ist. Es handelt sich dabei um die $|E|$ Reihenfolgebedingungen (2) und die Budgetrestriktion (3).¹⁷

Für jeden einzelnen Vorgang $(i,j) \in E$ sei $d_{ij}(\alpha)$ das α -Quantil der über die Szenarioeintrittswahrscheinlichkeiten p_k gegebenen diskreten Verteilung der zufallsabhängigen Vorgangsdauern d_{ij}^k . Bezeichnen wir die Zufallsvariable für die Dauer des Vorgangs (i,j) mit D_{ij} , so ist $d_{ij}(\alpha)$ der kleinste Wert, für den gilt:¹⁸

$$W(D_{ij} \leq d_{ij}(\alpha)) \geq \alpha$$

Verwenden wir nun im Grundmodell M1 anstelle der dort deterministischen Vorgangsdauern d_{ij} die α -Quantile $d_{ij}(\alpha)$, so ist garantiert, daß für jeden Vorgang (i,j) die Reihenfolgebedingung (2) mindestens mit Wahrscheinlichkeit α erfüllt ist.¹⁹

Für die Budgetbedingung (3) ist eine entsprechende Modellierung sehr viel komplexer, da die unsicheren Dauern d_{ij}^k aller Vorgänge gemeinsam in die Bedingung eingehen. Somit müßte die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung der gewichteten Summe aller Zufallsvariablen D_{ij} berechnet und das zugehörige β -Quantil ermittelt werden. Dies wäre ohne weiteres (außerhalb des Modells) möglich, wenn als Gewichte nicht die Variablen v_{ij} fungierten. Somit muß die Modellierung wie im

¹⁷ Die einzelnen Nebenbedingungen seien durchgehend mit $h = 1, \dots, |E| + 1$ nummeriert. Außerdem unterstellen wir zur Vereinfachung der Darstellung, daß α_h für alle Nebenbedingungen h einem festen Wert α entspricht.

¹⁸ Zur Definition von Quantilen vgl. Heike und Tärcolea (2000, S. 305 ff.).

¹⁹ Vgl. Kall und Wallace (1994, S. 47 f.).

Fall des simultanen CC-Modells mit Hilfe von Binärvariablen θ_k erfolgen. Hierbei dienen die K Binärvariablen jedoch lediglich dazu, die probabilistische Form der einzigen Budgetrestriktion (3) zu formulieren. Es ergibt sich Modell M8.

M8: Separiertes Chance-Constrained-Modell mit μ-Kriterium
Maximiere $EW(\mathbf{FZ}, \mathbf{v}, \mathbf{T}) = N - g \cdot T - \sum_{k=1}^K p_k \cdot \left(\sum_{(i,j) \in E} k b_{ij} \cdot v_{ij} \cdot d_{ij}^k \right)$ (34)
unter den Nebenbedingungen (3) - (7), (27), (28) und (33) sowie
$-FZ_1 + FZ_j \geq d_{ij}(\alpha) \cdot (1 - v_{ij})$ für $(i,j) \in E$ (35)

In unseren experimentellen Untersuchungen haben wir aufgrund des enormen Aufwandes zur Formulierung der Budgetrestriktion eine vereinfachte Variante gewählt, bei der wir auf Binärvariablen verzichten und anstelle dessen die Quantile $d_{ij}(\alpha)$ in die originale Budgetbedingung (3) einsetzen. Ebenso setzen wir die Quantile in die Zielfunktion ein, wodurch sich ein *deterministisches Ersatzwertmodell* mit $d_{ij} = d_{ij}(\alpha)$ ergibt; vgl. Kap. 4.1. Wir bezeichnen dieses Modell als **D-Q**(α).

4.2.2 Ersatzzielfunktionen

Im folgenden zeigen wir anhand des K-Modells die Vorgehensweise zur Modellierung der in Kap. 3.3.3 vorgestellten Ersatzzielfunktionen (außer dem bisher betrachteten μ -Kriterium). Es ergeben sich in einigen Fällen lineare, in anderen ganzzahlige lineare Modelle. Durch Kombination mit den Modellierungsansätzen in Kap. 4.2.1 lassen sich die Ersatzzielfunktionen auch mit den anderen Formen von Ersatzrestriktionen verbinden.

Hodges-Lehmann-Kriterium: Es maximiert die Summe aus dem Erwartungswert $\mu = \sum_k p_k \cdot z_k$ und dem schlechtesten Wert $\zeta_1 = \min\{z_k | k=1, \dots, K\}$. Das lineare Optimierungsmodell M9 ergibt sich durch die Abbildung der Minimumbestimmung in (38). Der Zielfunktionswert jedes Szenarios $k=1, \dots, K$ wird durch z_k dargestellt.

M9: Kompensations-Modell mit Hodges-Lehmann-Kriterium (K-HL)
Maximiere $HL(\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \zeta_1, \mathbf{T}) = \sum_{k=1}^K p_k \cdot z_k + \zeta_1$ (36)
unter den Nebenbedingungen (16) - (23) sowie
$z_k = N - g \cdot T_k - \sum_{i \in V} k v_{ij} \cdot u_{ij}^k - \sum_{(i,j) \in E} k b_{ij} \cdot v_{ij}^k \cdot d_{ij}^k$ für $k=1, \dots, K$ (37)
$\zeta_1 \leq z_k$ für $k=1, \dots, K$ (38)

Maxi-Min-Kriterium: Das Kriterium maximiert den schlechtesten Wert $\zeta_1 = \min\{z_k | k=1, \dots, K\}$. Es ergibt sich Modell M10.

M10: Kompensations-Modell mit Maxi-Min-Kriterium (K-MM)
Maximiere $MM(\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}, \zeta_1, \mathbf{T}) = \zeta_1$ (39)
unter den Nebenbedingungen (16) - (23) sowie (37) und (38)

Maxi-Max-Kriterium: Bei diesem Kriterium wird der beste Zielfunktionswert eines Szenarios maximiert. Dazu müssen in Modell M11 zusätzliche Binärvariablen ξ_k eingeführt werden, da durch ein einfaches Umkehren der Bedingung (38) zur Ermittlung des Maximums die Zielfunktion unbeschränkt wird. Die Gleichungen (42) und (43) stellen sicher, daß mindestens eine der Ungleichungen (41) mit Gleichheit erfüllt ist.

M11: Kompensations-Modell mit Maxi-Max-Kriterium (K-MX)
Maximiere $MX(\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}, \zeta_2, \xi, \mathbf{T}) = \zeta_2$ (40)
unter den Nebenbedingungen (16) - (23) und (37) sowie
$\zeta_2 \geq z_k$ für $k=1, \dots, K$ (41)
$\zeta_2 \leq z_k + M \cdot (1 - \xi_k)$ für $k=1, \dots, K$ (42)
$\sum_{k=1}^n \xi_k \geq 1$ (43)
$\xi_k \in \{0, 1\}$ für $k=1, \dots, K$ (44)

Eine Alternative zur Formulierung und Lösung von M11 besteht darin, die szenariooptimalen Lösungen für $k=1, \dots, K$ zu ermitteln und diejenige mit größtem Zielfunktionswert zu wählen. Dazu ist jeweils das deterministische Grundmodell M1 zu lösen (vgl. Kap. 5.2.2).

Hurwicz-Kriterium: Es maximiert die Summe aus dem mit λ gewichteten schlechtesten Wert und dem mit $1-\lambda$ gewichteten besten Wert. M12 ergibt sich dementsprechend als Kombination von M10 und M11.

M12: Kompensations-Modell mit Hurwicz-Kriterium (K-HU)
Maximiere $HU(\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}, \zeta_1, \zeta_2, \xi, \mathbf{T}) = \lambda \cdot \zeta_1 + (1-\lambda) \cdot \zeta_2$ (45)
unter den Nebenbedingungen (16) - (23), (37), (38), (41) - (44)

Mini-Max-Regret-Kriterium: Bei Verwendung dieses Kriteriums ist zunächst für jedes Szenario $k=1, \dots, K$ der szenariooptimale Wert z_k^* zu bestimmen. Die Zielfunktion (46) minimiert den maximalen Regret $\max\{z_k^* - z_k \mid k=1, \dots, K\}$, der durch (47) in Form linearer Ungleichungen ausgedrückt wird. Insgesamt ergibt sich M13.

Relatives Mini-Max-Regret-Kriterium: Im Unterschied zu dem vorherigen Modell werden nun die relativen Regrete betrachtet. Die szenariooptimalen Werte z_k^* werden ebenfalls benötigt. Zur Formulierung ist M13 so zu verändern, daß der sze-

M13: Kompensations-Modell mit Mini-Max-Regret-Kriterium (K-AR)
Minimiere $AR(\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}, \zeta, \mathbf{T}) = \zeta$ (46)
unter den Nebenbedingungen (16) - (23) und (37) sowie
$\zeta \geq z_k^* - z_k$ für $k=1, \dots, K$ (47)

nariooptimale Gewinn z_k^* auf der linken Seite der Ungleichung (47) mit ζ multipliziert wird. Da z_k^* (theoretisch) auch negative Werte annehmen kann (Verlust), ist im Modell M14 der Betrag zu verwenden.

M14: Kompensations-Modell mit relativem Mini-Max-Regret-Kriterium (K-RR)
Minimiere $RR(\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}, \zeta, \mathbf{T}) = \zeta$ (48)
unter den Nebenbedingungen (16) - (23) und (37) sowie
$\zeta \cdot z_k^* \geq z_k^* - z_k$ für $k=1, \dots, K$ (49)

Relatives Regret-Erwartungswert-Kriterium: Es minimiert den erwarteten relativen Regret; vgl. Modell M15.

M15: Kompensations-Modell mit rel. Regret-Erwartungswert-Kriterium (K-RE)
Minimiere $RE(\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}, \mathbf{T}) = \sum_{k=1}^n p_k \cdot (z_k^* - z_k) / z_k^* $ (50)
unter den Nebenbedingungen (16) - (23) und (37)

Aspirations-Kriterium: Es maximiert die Wahrscheinlichkeit ω , mit der das vorgegebene Gewinniveau \bar{z} erreicht oder übertroffen wird. Zur Modellierung des Kriteriums werden Binärvariablen ξ_k eingeführt, die für jedes Szenario $k=1, \dots, K$, in dem der Wert \bar{z} erreicht wird, den Wert 1 annehmen und sonst den Wert 0. Wird der Wert \bar{z} für ein k nicht erreicht, sichert die hinreichend große, positive Zahl M die Einhaltung von Nebenbedingung (52) in M16. Die Berechnung der in (51) maximierten Erfüllungswahrscheinlichkeit ω erfolgt durch (53).

M16: Kompensations-Modell mit Aspirations-Kriterium (K-AS)
Maximiere $AS(\mathbf{FZ}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}, \xi, \mathbf{T}, \omega) = \omega$ (51)
unter den Nebenbedingungen (16) - (23) und (37)
$z_k + M \cdot (1 - \xi_k) \geq \bar{z}$ für $k=1, \dots, K$ (52)
$\sum_{k=1}^n p_k \cdot \xi_k \geq \omega$ (53)
$\xi_k \in \{0, 1\}$ für $k=1, \dots, K$ (54)

Fraktal-Kriterium: Das Fraktal-Kriterium hat die Maximierung des Gewinnes \bar{z} , der mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit ω erreicht wird, zum Ziel. Das Modell M17 enthält dieselben Nebenbedingungen wie M16, maximiert jedoch \bar{z} .

M17: Kompensations-Modell mit Fraktal-Kriterium (K-FR)
Maximiere $FR(\bar{F}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}, \xi, \mathbf{T}, \bar{z}) = \bar{z}$ (55)
unter den Nebenbedingungen (16) - (23), (37) und (52) - (54)

5 Rahmenbedingungen der experimentellen Untersuchung

Die im folgenden beschriebene experimentelle Untersuchung betrachtet die Zweckmäßigkeit der oben vorgestellten Modelle zur Planung von Projekten unter dem Aspekt der Robustheit der erzielten Lösungen.²⁰ Die experimentellen Untersuchungen sollen vor allem zur Klärung folgender Fragen beitragen:

- Lohnt sich der erhöhte Aufwand zur Formulierung und Lösung robuster Optimierungsmodelle, oder ist es ausreichend, unsichere Parameter durch deterministische Werte zu ersetzen?
- Welche Ersatzzielfunktionen bzw. Entscheidungskriterien sind v.a. für risikoreiche Entscheidungsträger empfehlenswert?
- Welche Ersatzrestriktionen (Fat Solution, Chance-Constrained, Kompensation) sollten unter Berücksichtigung ihres Aufwandes einerseits und der erzielten Lösungsgüte andererseits gewählt werden?

Im folgenden beschreiben wir die der Untersuchung zugrundegelegten Rahmenbedingungen. Dabei gehen wir zunächst auf die Vorgehensweise zur Erzeugung von Testdaten, anschließend auf Beurteilungskriterien und die Art der Auswertung ein.

5.1 Generierung von Probleminstanzen

Da es keine geeigneten Testdaten für die von uns betrachtete spezielle Ausprägung des Linear Time-Cost Tradeoff-Problems gibt, greifen wir auf anerkannte Testinstanzen für Probleme der ressourcenbeschränkten Projektplanung zurück und erweitern sie auf systematische Weise um die benötigten zufälligen Elemente.

Der zugrundegelegte Testdatensatz für das Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)²¹ stammt von Patterson (1984). Er beinhaltet 110 Probleminstanzen mit 8 bis 51 Vorgängen. Als Daten sind jeweils ein knotenorientierter Netzplan, Vorgangsdauern, Bedarfe der Vorgänge an verschiedenen Ressourcen sowie feste Ressourcenverfügbarkeiten gegeben. Da die Netzpläne in vorgangsknoten-

²⁰ Eine entsprechende Untersuchung für Probleme der Produktionsprogrammplanung ist in Scholl und Klein (1998a,b) sowie Scholl (1998) beschrieben.

²¹ Zu diesem Problem sowie weiteren Testdatensätzen vgl. z.B. Kolisch et al. (1995) sowie Klein (2000).

orientierter Form vorliegen und unser Grundmodell M1 sowie alle davon abgeleiteten Modelle auf vorgangspfeilorientierten Netzplänen basieren, wurden sie mit Hilfe der Methode von Kamburowski et al. (1993) in vorgangspfeilorientierte Graphen umgewandelt. Das Ergebnis ist eine bezüglich der Reihenfolgebeziehungen äquivalente Darstellung des Netzplans mit Scheinvorgängen.

Zur Erzeugung von vollständigen Testinstanzen müssen die verschiedenen deterministischen Parameter des in Kap. 2.2.1 beschriebenen LTCTOP auf sinnvolle Werte festgelegt sowie insbesondere Szenarien für die als zufallsabhängig angenommenen Vorgangsdauern auf geeignete und plausible Weise generiert werden.

5.1.1 Szenariogenerierung

Jedes Szenario $k=1, \dots, K$ legt für alle Vorgänge $(i,j) \in E$ eine Normaldauer d_{ij}^k fest. Zur systematischen und realitätsnahen Generierung der Szenarien wählen wir einen ereignisorientierten Ansatz, der auf den Ideen der *Szenario-Technik* beruht (vgl. Klein und Scholl 1999, Kap. 2.2.4).

Dem im folgenden beschriebenen Ansatz liegt die Überlegung zugrunde, daß im Rahmen von Projekten verschiedene wichtige Ereignisse bzw. Umwelteinflüsse zufällig auftreten können, die jeweils die Dauern verschiedener Vorgänge auf eine systematische Weise beeinflussen; wir sprechen von **systematischen Zufalteinflüssen**. So werden z.B. bei einem Bauprojekt viele Vorgänge (einer bestimmten Bauphase), die im Freien ausgeführt werden müssen, durch (zu dieser Bauphase herrschende) ungünstige Wetterbedingungen erheblich verzögert. Eine andere Gruppe von Vorgängen kann etwa aufgrund von Lieferverzögerungen bei benötigten Baumaterialien in Verzug geraten.

Zunächst wird jedem Vorgang die im Patterson-Datensatz spezifizierte Dauer d_{ij} als *Standardausführungszeit* bei normalen Bedingungen zugeordnet. Nun definieren wir eine Anzahl von H *Hauptszenarien*, die jeweils aufgrund bestimmter (nicht näher spezifizierter) Ereignisse und Umwelteinflüsse zustandekommen. Die Vorgänge werden in M verschiedene Gruppen eingeteilt, indem jeder Vorgang $(i,j) \in E$ zufällig gleichverteilt eine Gruppennummer $m(i,j) \in \{1, \dots, M\}$ zugeordnet bekommt. Für alle Vorgänge einer Gruppe $m=1, \dots, M$ ergibt sich bei jedem Hauptszenario $h=1, \dots, H$ eine gemeinsame (positiv korrelierte) Wirkung auf die Vorgangsdauer, die durch einen Faktor f_{mh} ausgedrückt wird. Somit ergibt sich eine *hauptszenarioabhängige Vorgangsdauer* $d_{ij}(h) = f_{m(i,j),h} \cdot d_{ij}$.

Tab. 5.1 zeigt ein Beispiel mit $M=3$ Gruppen und $H=4$ Hauptszenarien. Betrachten wir z.B. einen Vorgang $(1,3)$ mit $m(1,3) = 2$, so erhält dieser bei einer Standarddauer von $d_{13} = 10$ ZE die hauptszenarioabhängigen Dauern $d_{13}(1) = 13$, $d_{13}(2) = 11$, $d_{13}(3) = d_{13}(4) = 10$. Im Hauptszenario $h=4$ wirken keine die Standarddauern beeinflussenden Ereignisse.

	Hauptszenarien			
	h=1	h=2	h=3	h=4
$f_{m=1}$	1,4	1,0	0,9	1,0
$f_{m=2}$	1,3	1,1	1,0	1,0
$f_{m=3}$	0,8	0,7	0,6	1,0

Tab. 5.1: Faktoren f_{mh}

Wir wählen im folgenden $H = 6$, $M = 6$ und ziehen die Faktoren f_{mh} zufällig gleichverteilt aus dem Intervall [0,6; 1,4].

Neben den beschriebenen systematischen Einflüssen in Form der Hauptszenarien treten in Projekten stets auch **unsystematische** (bzw. schwer systematisierbare) **Zufallseinflüsse** (z.B. Krankheit von Mitarbeitern, Schwankungen der Materialqualität, Temperaturschwankungen) auf, die häufig kleinen, gelegentlich jedoch großen Ausmaßes sind. Dies wird bei der Generierung dadurch berücksichtigt, daß für jedes Hauptszenario $h=1, \dots, H$ eine Anzahl von N zugehörigen Einzelszenarien gebildet wird, bei denen die Vorgangsdauern von den hauptszenarioabhängigen Werten $d_{ij}(h)$ zufällig abweichen.

Zur Berechnung dieser Abweichungen gehen wir wie folgt vor: Zunächst wird für jede Dauer $d_{ij}(h)$ ein maximaler prozentualer Abweichungswert $\delta_{ij}(h)$ zufällig gleichverteilt aus dem Intervall [0%; 60%] gezogen. Den aus jedem Hauptszenario $h=1, \dots, H$ entstehenden N Szenarien ordnen wir die Indizes $k = (h-1) \cdot N + 1, \dots, h \cdot N$ zu. Nun ziehen wir für jedes Szenario k die tatsächliche Abweichung $\delta_{ij}^k(h)$ zufällig gleichverteilt aus dem Intervall $[-\delta_{ij}(h); +\delta_{ij}(h)]$ und setzen die szenarioabhängige Normaldauer auf den Wert $d_{ij}^k = d_{ij}(h) \cdot (100\% + \delta_{ij}^k(h))$.

Abb. 5.1 zeigt die aus dieser zweistufigen Ziehung gleichverteilter ganzzahliger Zufallszahlen resultierende Wahrscheinlichkeitsfunktion für die unsystematischen Abweichungen von den hauptszenarioabhängigen Dauern $d_{ij}(h)$.²² Es läßt sich erkennen, daß zwar extreme Ausreißer bis zu einer Abweichung von +/- 60% zugelassen, aber extrem unwahrscheinlich sind. So ergeben sich Abweichungen von über 40% nur mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 6%, während Abweichungen von bis zu 15% bzw. 5% eine Wahrscheinlichkeit von 60% bzw. 31% aufweisen. Auf diese Weise sollen unwahrscheinliche, aber extreme unsystematische Zufallseinflüsse abgebildet werden wie z.B. der Brand einer Lagerhalle oder ein Wasserschaden, die zumindest die Ausführung einzelner Vorgänge erheblich behindern können.

Für unsere Experimente wählen wir $N = 4$, so daß sich insgesamt eine Anzahl von $K = H \cdot N = 6 \cdot 4 = 24$ Szenarien ergibt.

Die zuvor beschriebene Vorgehensweise der Generierung von Szenarien garantiert, daß die szenarioabhängigen Vorgangsdauern d_{ij}^k symmetrisch um die Standarddauern d_{ij} verteilt sind.

Die *Szenariowahrscheinlichkeiten* p_k werden wie folgt ermittelt: Zunächst erhält jedes Hauptszenario zufällig gleichverteilt aus dem Intervall [0,7; (1/H)], 1,3 · (1/H) eine Wahrscheinlichkeit $p(h)$, deren Summe auf 1 normiert wird.²³ Anschließend wird jedes $p(h)$ gleichmäßig auf die N zugehörigen Szenarien $k = (h-1) \cdot N + 1, \dots, h \cdot N$ aufgeteilt, d.h. es ergibt sich $p_k = p(h)/N$.

²² Bei stetiger Betrachtung folgt die Verteilung derart ermittelter zufälliger Abweichungen der Dichtefunktion $f(x) = \ln(60/|x|) / 120$ mit Erwartungswert 0 und Varianz 40.

²³ Somit schwanken die Wahrscheinlichkeiten $p(h)$ mit maximal +/- 30% um die bei Gleichwahrscheinlichkeit gültigen Werte $1/H$.

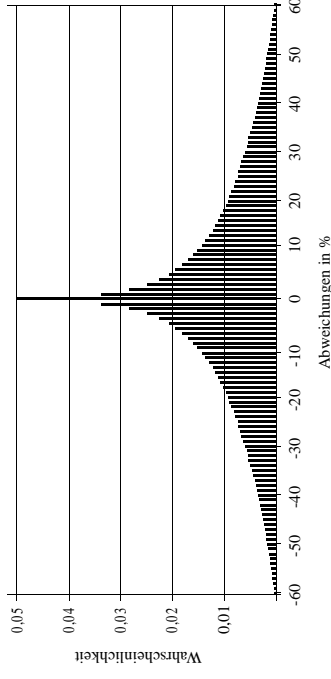


Abb. 5.1: Wahrscheinlichkeitsfunktion der prozentualen Abweichungen von $d_{ij}(h)$

5.1.2 Festlegung der übrigen Problemparameter

Neben den unsicheren Vorgangsdauern sind eine Reihe weiterer (hier als deterministisch angenommener) Problemparameter so festzulegen, daß sinnvolle Probleminstanzen entstehen.

- **Beschleunigungskosten:** Wir unterstellen die plausible Annahme, daß der Beschleunigungskostensatz kb_{ij} eines Vorgangs (i,j) von seinem Bedarf an den verschiedenen Ressourcentypen abhängt. Für das RCPSP sind im Datensatz von Patterson für jede Instanz Ressourcentypen $r = 1, \dots, R$ mit einer konstanten Verfügbarkeit von a_r Kapazitätseinheiten (KE) pro Periode gegeben. Jeder Vorgang (i,j) benötigt pro Periode seiner Ausführung $u_{(i,j),r}$ KE von Ressourcentyp r . Zur Ermittlung der Beschleunigungskostensätze kb_{ij} verwenden wir folgende Formel, deren Klammersausdruck dem Ausnutzungsgrad der Ressource r durch Vorgang (i,j) entspricht:

$$kb_{ij} = KB_{\text{Fix}} + \sum_{r=1}^R KB_r \cdot (u_{(i,j),r} / a_r) \quad (5.1)$$

Dabei gehen wir davon aus, daß bei jeder Beschleunigung eines Vorgangs um eine ZE bestimmte Fixkosten KB_{Fix} auftreten. Darüber hinaus entstehen für jede Ressource ausnutzungsgradabhängige Kosten in maximaler Höhe von KB_r . Konkret wurden die Werte $KB_{\text{Fix}} = 5$ und $KB_r = 3$ für $r=1, \dots, R$ gewählt.

- **Maximale Beschleunigungsfaktoren:** Für jeden Vorgang (i,j) wählen wir einen maximalen Beschleunigungsfaktor \bar{v}_{ij} zufällig gleichverteilt aus dem Intervall [0; 1], d.h. manche Vorgänge lassen sich nicht oder nur wenig verkürzen, während bei anderen eine große Reduktion gegenüber der Normaldauer möglich ist. Im Extremfall ($\bar{v}_{ij} \rightarrow 1$) kann die Dauer auf nahezu 0 gesenkt werden. Der praktische Hintergrund für derartig extreme Beschleunigungen ist die Möglichkeit, Vorgänge fremdzuvergeben, d.h. die entsprechende Leistung von einem anderen Unternehmen (gegen Zahlung hoher Beschleunigungskosten) zu kaufen. Bei geeigneten Vorgängen (Reihenfolgebeziehungen zu vorgelagerten Vor-

gängen sind nicht vorhanden oder weisen genügend Puffer auf) und guter Terminabsprache kann dies ggf. mit sehr geringem zeitlichem Aufwand geschehen.

- **Projekterlös:** Der gesamte Nettoerlös N (Bruttoerlös abzüglich der Fixkosten der Projektausführung; vgl. Kap. 2.2.1) wird in Abhängigkeit von der Summe der Standarddauern aller Vorgänge gemäß $N = 5 \cdot \sum_{(i,j) \in E} d_{ij}$ ermittelt.
- **Budget:** Das Budget B wird benötigt, um Beschleunigungsmaßnahmen und ggf. Verzögerungen von Meilensteinen zu finanzieren. Für das Budget wird daher vereinfachend angenommen, daß die Höhe nach der Anzahl m der Vorgänge (ohne Scheinvorgänge) des Projektes festgelegt wird. Konkret verwenden wir $B = 3 \cdot m$.
- **Projektendtermin:** Zur Bestimmung eines sinnvollen Wertes für den Projektendtermin **PE** gehen wir von folgenden Überlegungen aus: Von Beginn des Projektes ist **PE** zunächst Bestandteil eines Angebots zur Durchführung der Projektaufgabe und wird in anschließenden Verhandlungen mit dem Auftraggeber endgültig festgelegt. Dies geschieht anhand von Schätzungen für die Projektdauer; wir nehmen an, daß die deterministischen Standarddauern d_{ij} (als Mittelwerte der zufälligen Dauern) zugrundegelegt werden. Dabei ist in der Praxis häufig festzustellen, daß im Hinblick auf die erfolgreiche Akquisition eines Auftrags Termine vereinbart werden, die bei Ausführung der Vorgänge in Normaldauer d_{ij} (längste deterministische Projektdauer T_{max}) keinesfalls einhaltbar sind. Die kürzestmögliche deterministische Projektdauer T_{min} ergibt sich, wenn alle Vorgänge maximal beschleunigt werden. Der Wert für **PE** wird zufällig gleichverteilt aus dem Intervall $[T_{min}, T_{max}]$ gezogen.
- **Projektverzugskostensatz:** Der Projektverzugskostensatz g ist grundsätzlich abhängig vom Wert bzw. Gesamtaufwand des Projektes. Als Maß für den Projektverzug verwenden wir den Nettoerlös N und setzen $g = 0,02 \cdot N$.
- **Verzugskosten** (benötigt bei K-Modellen sowie bei der Auswertung): Es wird angenommen, daß die Verzugskosten eines Ereignisses i mit der Anzahl aller direkt nachfolgenden Vorgänge sowie der Dauer dieser Vorgänge (als Maß für deren Wert oder Bedeutung) ansteigen, da diese Vorgänge durch Verzug von i ebenfalls verzögert werden können. Dies kann z.B. zu Kosten für die Lagerung von Materialien oder für Wartezeiten von Arbeitskräften führen. Sei $N(i)$ die Menge aller direkten Nachfolgeereignisse von i , so wählen wir als Verzugskostensatz für i den Wert $kv_i = 2 \cdot \sum_{j \in N(i)} d_{ij}$. Normalerweise entstehen Verzugskosten lediglich bei Überschreitung bestimmter Ereignisse, die als Meilensteine von besonderer Wichtigkeit sind. Da wir den Fall der mittelfristigen Projektplanung für einen mehrmonatigen Planungszeitraum betrachten, können wir begründet davon ausgehen, daß als Vorgänge nur wichtige aggregierte Vorgänge und als Ereignisse nur Meilensteine betrachtet werden. Somit kann grundsätzlich jedes Ereignis mit Verzugskosten verbunden sein.²⁴

Die in den zuvor dargestellten Bestimmungsgleichungen für die verschiedenen Parametern verwendeten Konstanten wurden in umfangreichen Vorstests als gebestimmte

²⁴ Das Projektende erhält hierdurch keine zusätzlichen Verzugskosten, da es keine Nachfolgeereignisse besitzt.

eignet für den zugrundeliegenden Datensatz von Patterson ermittelt. Insbesondere ist eine aufeinander abgestimmte Festlegung der Kostensätze für Projektverzug und Vorgangsbeschleunigungen wichtig, da ein zu hoher Projektverzugskostensatz zu ausschließlicher Wahl von Beschleunigungsoptionen und zu hohe Beschleunigungskostensätze zu beliebigem Projektverzug führen können.

5.2 Beurteilung von Plänen und zugrundeliegenden Modellen

5.2.1 Arten der Evaluation von Planungsergebnissen

Im Gegensatz zu deterministischen Modellen sind die Beurteilung und der Vergleich von Lösungen im Fall unsicherer Daten nicht ohne weiteres möglich. Wenn wir in diesem Zusammenhang von einer Lösung sprechen, so handelt es sich um einen durch einen Vektor **FZ** ausgedrückten *Projektplan* (Planzeitpunkte FZ_1, \dots, FZ_n der Ereignisse 1 bis n). Es ergibt sich kein eindeutiger Zielfunktionswert, sondern ein Wert $z_k(\mathbf{FZ})$ für jedes Szenario k bzw. eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der erzielbaren Zielfunktionswerte.²⁵ Da man eine eindeutige Reihung von Verteilungen nur bei Vorliegen von Dominanzen (vgl. Kap. 5.2.3.5) erhält, betrachten wir verschiedene Verteilungsmaße und versuchen, die Lösungen (und damit die sie erzeugenden Modelle) anhand ihrer Ausprägungen für diese Maße zu beurteilen.

Neben der Problematik des Vergleichs von Verteilungen besteht eine weitere Schwierigkeit darin, den *Bezugsrahmen* der Untersuchung festzulegen. Zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze sind die *Ex post*- und die *Ex ante*-Evaluation von Planungsergebnissen.

Ex post-Evaluation: Die einfachste Möglichkeit der Bewertung von Plänen bzw. Planungsmethoden ergibt sich naturgemäß nach Abschluß der Planausführung, wenn die planrelevante Umweltentwicklung sowie die erzielten Ergebnisse und Auswirkungen der Planaktionen ermittelbar sind. Jedoch ist die nachträgliche Beurteilung nicht immer der geeignete Maßstab, wenn man die Qualität einer Planungsmethode beurteilen will, da im nachhinein Informationen vorliegen, die bei der Planung nicht verfügbar waren und deren Nichtbeachtung somit nicht der Planungsmethode angelastet werden kann. Andererseits ist die Bewährung der Planung und ihrer Ergebnisse an der Realität für den wirtschaftlich Handelnden letztlich der einzige Maßstab für die Qualität des Planungsverfahrens.

Wir simulieren den Fall der *Ex post*-Evaluation dadurch, daß wir eine realisierte Umweltentwicklung zufällig bestimmen und die Pläne für dieses ausgewählte Szenario bewerten.

²⁵ Hierin liegt sicherlich die Hauptursache für das Fehlen weitreichender Untersuchungen über die Eignung robuster Planungsansätze. Aufgrund unterschiedlicher Risikoemstellungen von Planern ist das Aufstellen einer allgemeingültigen Präferenzordnung zur Beurteilung von Lösungen - und der sie erzeugenden Modelle - nicht möglich. Jedoch lassen sich durch Betrachtung geeigneter Maße Eigenschaften von Lösungen bzw. Modellen erkennen, die Empfehlungen über anzuwendende Planungsansätze gestatten.

Ex ante-Evaluation: Die Bewertung von Plänen erfolgt zum Planungszeitpunkt anhand der dann ermittelbaren Informationen, da eine gute Planung dadurch charakterisiert ist, daß sie den vorhandenen *Informationsstand* (Szenarien, Eintrittswahrscheinlichkeiten und eigene Handlungsmöglichkeiten) bestmöglich berücksichtigt. Je nach verfügbarer Information über die Umweltentwicklung und die eigenen Handlungsmöglichkeiten lassen sich verschiedene Fälle einer Ex ante-Evaluation unterscheiden. Wir betrachten drei Ausprägungen:

- *Vollständige Information:* Der zur Berechnung von Projektplänen verwendete Informationsstand A entspricht dem zum Planungszeitraum bestmöglichen Stand B , und die eigenen Handlungsmöglichkeiten sind vollständig bekannt.

Bei unseren Untersuchungen besteht der Informationsstand $A = B$ jeweils aus $K_A = 24$ Szenarien und zugehörigen Wahrscheinlichkeiten sowie den im Rahmen der K-Modelle berücksichtigten Anpassungsmaßnahmen. Diese Informationen werden zur Ermittlung der Pläne einerseits und zu deren Bewertung andererseits verwendet.

- *Unvollständige Information über Handlungsmöglichkeiten:* In diesem Fall wird angenommen, daß die Szenarien und Eintrittswahrscheinlichkeiten bestmöglich bekannt sind. Jedoch stehen bei der Planung nicht alle Maßnahmen zur Verfügung, die ggf. bei einer späteren Ausführung des Plans zu dessen Anpassung an die dann relevante Umweltlage verfügbar sind. Dafür kommen mehrere Gründe in Betracht: (1) Handlungsmöglichkeiten sind zum Planungszeitpunkt völlig unbekannt (z.B. neue Analyseverfahren). (2) Es ist unsicher, ob gewisse Handlungsspielräume tatsächlich bestehen (z.B. Verfügbarkeit finanzieller Mittel).²⁶ (3) Bestimmte (ggf. bekannte) Maßnahmen sind als Bestandteil von Plänen unerwünscht, werden während der Planausführung jedoch u.U. in Kauf genommen (z.B. Gesetzesverstöße).

Je nach Art der Gründe für die Nichtverfügbarkeit von Alternativen bei der Planung sind bei der Beurteilung von Plänen unterschiedliche Wertansätze sinnvoll. Bei (1) und (2) können tatsächliche Kosten angesetzt werden, während bei (3) neben diesen auch fiktive Kostengrößen zur Berücksichtigung nicht unmittelbar kostenwirksamer Sachverhalte einbezogen werden sollten; vgl. Kap. 5.2.2.2.

- *Unvollständige Information über die Umweltentwicklung:* Hierbei liegen nur partielle Informationen über die denkbaren Szenarien und/oder deren Eintrittswahrscheinlichkeiten vor, während die eigenen Handlungsmöglichkeiten vollständig bekannt sind.

Dies bilden wir dadurch nach, daß wir zusätzlich zum Informationsstand A mit $K_A = 24$ Szenarien und zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten einen bestmöglichen Informationsstand B mit $K_B = 240$ Szenarien und (naturgemäß) anderen Eintrittswahrscheinlichkeiten erzeugen, anhand dessen die für A ermittelten Pläne beurteilt werden. Dies geschieht ebenfalls mit der in Kap. 5.1 beschriebenen Generierungsmethode durch Setzen von $N=40$.

²⁶ Dieser Fall ließe sich durch die Szenarien mit berücksichtigten, soll jedoch getrennt behandelt werden.

5.2.2 Auswertungsmodelle

Bei allen genannten Möglichkeiten der Evaluation von Plänen bzw. Planungsmethoden ist darauf zu achten, daß die von verschiedenen Modellen gelieferten Pläne auf einheitliche Weise, d.h. unter gleichen Bedingungen, bewertet werden. Dabei entsteht die Schwierigkeit, daß die verschiedenen Modelltypen unterschiedliche Arten von Plänen erzeugen (mit oder ohne szenarioabhängige Kompensationsmaßnahmen, mit oder ohne Verletzung von Restriktionen usw.). Daher muß zunächst festgelegt werden, was unter einem Plan zu verstehen ist. Wie bereits zu Beginn von Kap. 5.2.1 beschrieben, ist es sinnvoll, davon auszugehen, daß nur die zeitlichen Festlegungen, d.h. die geplanten Ereigniszeitpunkte FZ_i , einschließlich des geplanten Projektendes FZ_n , den mittelfristig geltenden Plan ausmachen. Sämtliche anderen Variablen der verschiedenen Modelle beziehen sich auf Handlungsmöglichkeiten, deren detaillierte Festlegung längerfristig nicht erforderlich und/oder nicht sinnvoll ist. So sollte weder die konkrete Beschleunigung einzelner Vorgänge noch der genaue Verzug an bestimmten Meilensteinen im mittelfristigen Plan festgelegt werden, da ihre Ausprägungen stark szenarioabhängig sind und sie relativ kurzfristig an die eintretende Umweltentwicklung angepaßt werden können.

Um den letztgenannten Aspekt der Möglichkeit der Plananpassung während der Projektausführung geeignet zu berücksichtigen, müßte jeder mittelfristige Zeitplan für jedes Szenario im Rahmen eines dynamischen Modells unter Beachtung von bestimmten Informationszuflüssen zu gewissen Zeitpunkten und Maßnahmen der Anpassung an die jeweiligen Entwicklungen ausgewertet werden. Dies wäre jedoch sehr aufwendig und würde weitere, mehr oder weniger willkürliche Annahmen über die Informationsstruktur, die Reagibilität des Planungssystems sowie die jeweils relevanten Detailmaßnahmen erfordern, die erhebliche Auswirkungen auf die erzielten Aussagen haben würden.

Um die genannte Problematik zu vermeiden, beschreiben wir einen anderen Weg. Dieser besteht darin, daß jeder Plan **FZ** für jedes zu untersuchende Szenario k als Vorgabe in ein **deterministisches Auswertungsmodell** eingesetzt wird, das über die Daten von k sowie alle Handlungsmöglichkeiten vollständig verfügt. Dies bedeutet, wir gehen vereinfachend davon aus, daß die Planrealisierung zu jedem Zeitpunkt unter vollständiger Kenntnis des (eigentlich nach und nach offenbar werden) Szenarios stattfindet. Somit wird für die Planrealisierung der Fall vollständiger Sicherheit angenommen. Als Resultat erhalten wir dadurch jeweils den bestmöglichen szenariobezogenen Zielfunktionswert $z_k(\mathbf{FZ})$ des Plans **FZ**, der eine obere Schranke für den tatsächlich erzielbaren Wert darstellt.

In bezug auf das Auswertungsmodell untersuchen wir zwei Fälle (vgl. Kap. 5.2.1): Bei *Handlungssicherheit* liegt vollständige Information über verfügbare Handlungsmöglichkeiten vor, während dies bei *Handlungsunsicherheit* nicht gilt.

5.2.2.1 Auswertung bei Handlungssicherheit

Wir gehen von denselben Maßnahmen aus, wie sie die K-Modelle antizipieren und formulieren das Auswertungsmodell M18 für eine Kombination aus einem Plan **FZ**

und einem Szenario k .²⁷ Der optimale Zielfunktionswert der entsprechenden Modellinstanz liefert den szenariobezogenen Gewinn $z_k(\mathbf{FZ})$. Es handelt sich bei M18 um eine Modifikation des deterministischen Grundmodells M1, bei der die Ereigniszeitpunkte FZ_j keine Variablen sind, sondern als Parameter vorgegeben werden. Außerdem sind nun Ereignisverzögerungen u_j vorzusehen, die im Grundmodell überflüssig sind (dort würde stets $u_j = 0$ gelten).

M18: Auswertung für Szenario k ohne zusätzliche Kompensationsmaßnahmen	
Maximiere	$z_k(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{T}) = N - \left(g \cdot T + \sum_{j \in V} kv_j \cdot u_j + \sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij} \cdot d_{ij}^k \right)$ (56)
unter den Nebenbedingungen	
$-FZ_i - u_i + FZ_j + u_j \geq d_{ij}^k \cdot (1 - v_{ij})$	für $(i,j) \in E$ (57)
$T \geq FZ_n + u_n - PE$	(58)
$\sum_{i \in V} kv_j \cdot u_j + \sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot v_{ij} \cdot d_{ij}^k \leq B$	(59)
$0 \leq v_{ij} \leq \bar{v}_{ij}$	(60)
$FZ_1 = 0, u_1 = 0, T \geq 0$	(61)
$u_j \geq 0$	für $j=2, \dots, n$ (62)

Die *szenariooptimalen Zielfunktionswerte* z_k^* werden mit Hilfe des Grundmodells M1 bei Wahl von $d_{ij} = d_{ij}^k$ bestimmt.

5.2.2.2 Auswertung bei Handlungsunsicherheit

Wie in Kap. 5.2.1 dargelegt, können bei der Planausführung zusätzliche Maßnahmen verfügbar sein, die während der Planung nicht bekannt oder nicht zugelassen sind. Dabei kann es sich einerseits um Maßnahmen handeln, die bei der Planung noch nicht absehbar waren (z.B. neue Produktionsverfahren) oder deren Verfügbarkeit unsicher ist und andererseits um solche, die eigentlich unerwünscht sind und daher nicht in einen Plan einbezogen werden, aber in schwierigen Situationen dennoch ergriffen werden müssen.

Wir gehen im vorliegenden Fall (v a. aus Gründen der einfachen Modellierbarkeit) von folgenden *Zusatzmaßnahmen* aus:

- Bei zu knapp bemessenem Budget besteht prinzipiell die Möglichkeit der *Budgeterhöhung*. Diese Maßnahme wird aus unternehmenspolitischen Gründen je-

²⁷ Man beachte, daß dies nur möglich ist, da das Grundmodell für jegliche mögliche Verletzung von Restriktionen Kompensationsmöglichkeiten, notfalls in Form von Strafkosten, beinhaltet. Somit ist jeder Plan vollständig kompensierbar, d.h. im Rahmen der gegebenen Möglichkeiten ausführbar.

doch bei der Planung nicht zugelassen. Außerdem ist zum Planungszeitpunkt nicht sicher, ob die Möglichkeit während der Planausführung tatsächlich besteht, d.h. ob entsprechende Mittel verfügbar sein werden. Für die Planausführung nehmen wir an, daß ausreichende Mittel vorhanden und Projekte als Profit Center organisiert sind, die für die Bereitstellung von (zusätzlichen) Mitteln eine gewisse Mindestverzinsung erbringen müssen.²⁸ Somit ist das Zusatzbudget als ein innerbetrieblicher Kredit anzusehen.

Um die (Mindest-) Verzinsung im vorliegenden statischen linearen Modell berücksichtigen zu können, nehmen wir vereinfachend an, daß ein während des Projekts aufgenommener Kredit in Höhe von kr GE eine feste Laufzeit hat, nach dem Projektende aus dem Erlös zu tilgen und pauschal mit einem Zinssatz von $z = 13\%$ zu verzinsen ist. Der Zinssatz wird bewußt relativ hoch gewählt, da die Budgeterhöhung von der Unternehmensleitung grundsätzlich unerwünscht ist. Es handelt sich dabei somit weniger um eine reale Verzinsung als um einen innerbetrieblichen Lenkpreis. Dieser soll dafür sorgen, daß eine Kreditaufnahme nur dann erfolgt, wenn das Projekt dadurch einen deutlich höheren Gewinn (der mindestens einer Rendite von 13% für das zusätzlich eingesetzte Kapital entspricht) erzielt.

- Eine über die vorgegebene Beschränkung \bar{v}_{ij} hinausgehende *Beschleunigung* z_{ij} des Vorgangs (i,j) wird grundsätzlich ermöglicht, aber mit dem $\pi = 10$ fachen des Beschleunigungskostensatzes kb_{ij} bewertet. Damit wird versucht, der starken Progression der Beschleunigungskosten Rechnung zu tragen, die sich einstellt, wenn man über einen ökonomisch sinnvollen Umfang hinaus weitere Beschleunigungen erzielen will. Außerdem soll der Faktor π andere Konsequenzen unerwünschter Maßnahmen mit berücksichtigen. Wird ein Vorgang z.B. dadurch beschleunigt, daß gesetzlich vorgeschriebene Prüfhandlungen unterlassen oder abgekurzt werden, so stellt π auch ein Maß für potentielle Regreßansprüche oder Imageverluste dar, ohne diese Kosten wirklichtgetreu erfassen zu können.

Die Wahl der konkreten Parameterwerte erfolgt so, daß die verschiedenen Kostenarten in einem möglichst ausgeglichenen Verhältnis stehen, d.h. weder eine maximale Beschleunigung aller Vorgänge noch die beliebige Überschreitung von Termi-

nen optimal sein können. Mit den zuvor beschriebenen zusätzlichen Parametern π und z sowie den zusätzlichen Variablen kr und z_{ij} ergibt sich das Auswertungsmodell M19, das für jeden Plan \mathbf{FZ} den maximalen Zielfunktionswert $z_k(\mathbf{FZ})$ für Szenario k unter Einbeziehung der zusätzlichen Anpassungsmaßnahmen ermittelt.

Die zusätzliche Beschleunigung wird in (66) auf einen sinnvoll vorgegebenen maximalen Wert beschränkt, für den $\bar{v}_{ij} + z_{ij} \leq 1$ gilt.

Aufgrund der Beschaffenheit der Probleme kann es u.U. vorkommen, daß ein mit Hilfe von M19 ermittelter szenariobezogener Zielfunktionswert $z_k(\mathbf{FZ})$ den szenariooptimalen Gewinn z_k^* übersteigt. Trotzdem werden die szenariooptimalen Werte

²⁸ Man spricht in diesem Zusammenhang von einem *Gewinnbudget*; vgl. Ewert und Wagenhofer (1997, S. 455) oder Küpper (1997, Kap. III-2).

M19: Auswertung für Szenario k mit zusätzlichen Kompensationsmaßnahmen
$\text{Max. } z_k(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}, \mathbf{T}, \mathbf{k}, \mathbf{r}) = N - g \cdot T - \sum_{i \in V} kv_i \cdot u_i - \sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot d_{ij}^k \cdot (v_{ij} + \pi \cdot zv_{ij}) - z \cdot kr \quad (63)$
unter den Nebenbedingungen (57) - (58) und (61) - (62) sowie
$\sum_{i \in V} kv_j \cdot u_j + \sum_{(i,j) \in E} kb_{ij} \cdot d_{ij}^k \cdot (v_{ij} + \pi \cdot zv_{ij}) \leq B + kr \quad (64)$
$0 \leq v_{ij} \leq \bar{v}_{ij} + zv_{ij} \quad \text{für } (i,j) \in E \quad (65)$
$zv_{ij} \leq \bar{z}v_{ij} \quad \text{für } (i,j) \in E \quad (66)$

(wie im Fall von M18) ohne Berücksichtigung von zusätzlichen Kompensationsmaßnahmen bestimmt, da letztere auch über die verwendeten Kostengrößen hinaus unerwünschte Folgen haben können (Imageverlust, Regreßpflicht usw.).

5.2.3 Kenngrößen zur Beurteilung von Plänen

Mit Hilfe der in Kap. 5.2.2 definierten Auswertungsmodelle ergeben sich für jeden Plan \mathbf{FZ} und das zugrundeliegende Modell die szenariobezogenen Gewinne $z_k(\mathbf{FZ})$ für alle bei der Evaluation relevanten Szenarien k. Wie in Kap. 5.2.1 dargelegt, sind die daraus ableitbaren Ergebnisverteilungen verschiedener Pläne nicht ohne weiteres zu vergleichen. Zu diesem Zweck müssen bestimmte Maße der Verteilung sowie weitere Kenngrößen herangezogen werden. Wir beschreiben im folgenden eine Reihe möglicher Maße, die zur Beurteilung der Ergebnisstabilität sowie der Ergebnis-, Optimalitäts- und/oder Zulässigkeitsrobustheit geeignet sind.²⁹

5.2.3.1 Ergebnisrobustheit und -stabilität

Die Kriterien Ergebnisrobustheit und -stabilität beziehen sich unmittelbar auf die szenariobezogenen Zielfunktionswerte $z_k(\mathbf{FZ})$ und deren Verteilung. Als Maße der Verteilung verwenden wir den Erwartungswert EZ, den schlechtesten (kleinsten) Wert SZ, den besten Wert BZ sowie den Median (50%-Quantil) MZ, das 5%-Quantil SQZ und das 95%-Quantil BQZ. Die beiden letzteren Größen sind der schlechteste und der beste Wert, wenn man die Verteilung auf beiden Seiten um 5% "stutzt". Dadurch sollen einzelne unwahrscheinliche Ausreißer eliminiert werden.

Für die **Ergebnisrobustheit** sind (aus Sicht eines risikoscheuen Entscheidungssträgers, von der die robuste Planung ausgeht) v.a. SZ und SQZ von Interesse, da sie den ungünstigsten Wert und den mit 95%iger Wahrscheinlichkeit mindestens erzielbaren Wert angeben.³⁰ Liegt SQZ über einem angemessenen Anspruchsniveau

²⁹ Zu den Robustheitskriterien vgl. Kap. 3.1 sowie v.a. Scholl (2000, Kap. 4.2).

³⁰ Im Gegensatz zur allgemeinen Definition der Ergebnisrobustheit gehen wir nicht von einem absoluten Anspruchsniveau, sondern von der Satisfizierungswahrscheinlichkeit (95%) aus, da ersteres nicht allgemein festgelegt werden kann, während letztere intersubjektiv als plausibel empfunden wird.

(Mindestgewinn), so kann davon ausgegangen werden, daß es sich um einen *relativ ergebnisrobusten* Plan handelt.³¹ Gilt dies sogar für SZ, so liegt ein *total ergebnisrobuster* Plan vor. Neben den genannten Werten sind für manche Entscheidungssträger sicherlich auch andere Quantile mit Satisfizierungswahrscheinlichkeiten von 0,9, 0,8 oder 0,7 relevant, wir beschränken uns aufgrund der ohnehin zu bewältigenden Datenfülle jedoch auf die genannten Maße.

Als allgemeine Maße für die Ergebnisqualität bzw. das grundsätzliche Ergebnisniveau verwenden wir Zentralmaße der Verteilung, den Erwartungswert EZ und den Median MZ. Bei gemeinsamer Betrachtung der Zentralmaße einerseits und der Extremmaße SZ und SQZ andererseits ergeben sich wesentliche Informationen über das mit einer Entscheidung verknüpfte Risiko sowie deren Erfolgchancen.

Zur Beurteilung der **Ergebnisstabilität** verwenden wir die Differenzen BZ - SZ und BQZ - SQZ, die die Spannweite der Verteilung bzw. der gestützten Verteilung und somit die Schwankung der Ergebniswerte beschreiben.³² Im Falle SZ = BZ liegt eine total ergebnisstabile Lösung vor; ist die Differenz der Werte klein, so handelt es sich um eine relativ ergebnisstabile Lösung.

Über den Zweck zur Ermittlung der Spannweiten hinaus haben die Maße BZ und BQZ (zumindest für einen risikoaversen Entscheidungsträger) nur geringe Bedeutung, da sie auf einem einzelnen Szenario beruhen bzw. nur mit kleiner Wahrscheinlichkeit erreichbar sind. Dennoch vervollständigen diese Größen das Gesamtbild der Verteilung und zeigen das maximale Erfolgspotential eines Plans.

5.2.3.2 Optimalitätsrobustheit

Zur Bewertung der Lösungen hinsichtlich ihrer **Optimalitätsrobustheit** werden *relative Regretwerte* (verschenkter Anteil am potentiellen Gewinn) $t_k(\mathbf{FZ}) = |(z_k^* - z_k(\mathbf{FZ})) / z_k^*|$ berechnet, die die relative (oder prozentuale) Abweichung des szenariobezogenen Gewinns vom jeweiligen szenariooptimalen Wert messen. Ebenso wie im Fall der Gewinne ergibt sich eine Verteilung der relativen Regretwerte, die durch verschiedene Maße beschrieben werden kann. Wir verwenden wiederum den Erwartungswert ET, den Median MT, den schlechtesten Wert ST und den besten Wert BT sowie das 5%-Quantil BQT und das 95%-Quantil SQT. Diese Maße beschreiben die Wahrscheinlichkeitsverteilung der verschenkten Gewinnanteile. Daher entspricht ST dem größten und BT dem kleinsten relativen Regret.

³¹ Wir nehmen an, daß eine Verlustwahrscheinlichkeit (Verlust im Sinne der Unterschreitung des Anspruchsniveaus) von maximal 5% auch für einen risikoscheuen Entscheidungsträger akzeptabel ist. Sollte dies nicht der Fall sein, wird SZ als Maß relevanter.

³² Wir verzichten auf die häufig als Streuungsmaß verwendete Varianz, da diese schwieriger zu interpretieren ist. Außerdem ist für einen risikoscheuen Entscheidungsträger v.a. das Verhalten von Randwerten der Verteilung interessant, die in die Varianz zwar stark eingehen, dort jedoch nicht direkt ablesbar sind. Überdies ist die Ergebnisstabilität als Kriterium nur von untergeordneter Bedeutung, so daß eine größere Anzahl von Maßen nicht erforderlich erscheint. Weichen nämlich die einzelnen szenariooptimalen Zielfunktionswerte stark voneinander ab, so wird eine günstige Lösung nur wenig ergebnisstabil sein können. Ergebnisstabilität stellt sich dann erst auf einem niedrigeren Ergebnisniveau ein.

Ein Plan \mathbf{FZ} ist *total optimalitätsrobust*, wenn $ST = 0$ gilt. Analog zur Ergebnisrobustheit weisen niedrige Werte von ST und SQT auf ein hohes Maß an *relativer Optimalitätsrobustheit* hin. Ist das Sicherheitsbedürfnis des Entscheidungsträgers diesbezüglich gestillt, so kann anhand der Zentralmaße ET und MT eine weitergehende Beurteilung darüber vorgenommen werden, inwieweit die Gewinnpotentiale insgesamt ausgeschöpft werden können. Gemeinsam mit den Maßen BT und BQT ist eine Einschätzung der Gesamtverteilung möglich, wobei diese Größen ebensowenig überinterpretiert werden dürfen wie BZ und BQZ .

Anstelle der relativen Regrete lassen sich auch *absolute Regrete* (verschenkte Gewinne) $r_k(\mathbf{FZ}) = z_k^* - z_k(\mathbf{FZ})$ berechnen, die die absolute Abweichung des szenariobezogenen Gewinns vom jeweiligen szenariooptimalen Wert messen.

	$z_k(\mathbf{FZ})$	z_k^*	$r_k(\mathbf{FZ})$	$i_k(\mathbf{FZ})$
$k=1$	5	15	10	66,67%
$k=2$	85	100	15	15%

Tab. 5.2: Vergleich zwischen absolutem und relativem Regret

Obwohl der absolute Regret in der Literatur zur Entscheidungstheorie weitaus gebräuchlicher ist, sind wir der Meinung, daß der relative Regret grundsätzlich das sinnvollere Maß für die Beurteilung der Optimalitätsrobustheit ist. Dies soll an einem Beispiel mit zwei Szenarien erläutert werden. Tab. 5.2 zeigt die von einem Plan \mathbf{FZ} erzielten szenariobezogenen Gewinne und die szenariooptimalen Werte sowie die absoluten und relativen Regretwerte. Obwohl für einen risikoscheuen Entscheidungsträger der im ungünstigeren Szenario $k=1$ verschenkte absolute Gewinn sicherlich sehr viel schmerzlicher ist als der etwas größere für $k=2$, würde man bei Betrachtung des absoluten Regrets die größere Aufmerksamkeit auf das günstigere Szenario lenken. Der relative Regret zeigt deutlich, wo der Verlust schwerer wiegt, und bildet somit die Risikoscheu besser ab.

Aus den genannten Gründen verwenden wir nur den Erwartungswert ER sowie den schlechtesten Wert SR und den besten Wert BR als Maße der Verteilung der absoluten Regrete. In bezug auf ER ist darüber hinaus zu beachten, daß er eng mit EZ verknüpft ist. Bezeichnen wir den (konstanten) szenariooptimalen Erwartungswert mit EZ^* , so gilt: $ER = \sum_k p_k \cdot (z_k^* - z_k) = \sum_k p_k \cdot z_k^* - \sum_k p_k \cdot z_k = EZ^* - EZ$

5.2.3.3 Zulässigkeitsrobustheit

Die Beurteilung der Zulässigkeitsrobustheit als eigenständige Eigenschaft eines Plans ist schwierig, da aufgrund der vollständigen Kompensierbarkeit in den Auswertungsmodellen eine Unzulässigkeit im modelltheoretischen Sinn nicht existiert. Jedoch kann man sicherlich die im Auswertungsmodell M19 enthaltenen unerwünschten zusätzlichen Kompensationsmöglichkeiten als unzulässig deklarieren, zumal sie zum Planungszeitpunkt genau diesen Status haben. Da diese Maßnahmen mit relativ hohen (Straf-)Kosten belegt sind, werden sie tatsächlich nur dann in größerem Umfang einbezogen, wenn eine Anpassung des Projektplans an das konkrete Szenario mit Hilfe der zulässigen Maßnahmen nicht auf ökonomisch sinnvolle Weise vollzogen werden kann. Somit ist die Verwendung oder Nichtverwendung

dieser Anpassungsmöglichkeiten als guter Indikator für die Zulässigkeitsrobustheit anzusehen. Zur quantitativen Erfassung des Ausmaßes der Unzulässigkeit messen wir daher durch das Maß UW die Wahrscheinlichkeit, daß diese unerwünschten Maßnahmen in den szenariobezogenen Plananpassungen genutzt werden (Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten der betroffenen Szenarien).

Darüber hinaus besteht bei der Anpassung von Plänen an die verschiedenen Szenarien auch bei ausschließlicher Verwendung erwünschter Maßnahmen die Möglichkeit, daß sich verschiedene Fälle einstellen, die man zum Planungszeitpunkt (falls man sie dann erkannt hätte) aufgrund ihrer offensichtlich negativen Zielwirkung als inakzeptabel charakterisieren würde. Wir wollen deshalb von *ökonomischer Unzulässigkeit* sprechen. Ein solcher Fall liegt z.B. dann vor, wenn die gewünschte Projektdauer PE in jedem Szenario (oder mit hoher Wahrscheinlichkeit) überschritten wird, obwohl Beschleunigungsmaßnahmen bestehen, die zur Einhaltung von PE beitragen und per Saldo sogar zu einer Gewinnerhöhung führen würden. Noch schwerwiegender ist aus Sicht der robusten Planung, wenn das Projekt für einige Szenarien bzw. mit nicht unwesentlicher Wahrscheinlichkeit in den Verlustbereich gelangt, so daß ein risikoscheuer Entscheidungsträger, falls er dies früh genug erkannt hätte, das Projekt überhaupt nicht unter den gegebenen Bedingungen zur Ausführung angenommen hätte. Die genannten Fälle einer ökonomischen Unzulässigkeit können aufgrund der Nichtberücksichtigung der meisten Szenarien v.a. bei Verwendung rein deterministischer Ersatzwertmodelle, aber auch bei robusten Modellen auftreten.

Während der erste genannte Fall schwer zu fassen ist und sich seine Auswirkungen überdies in den szenariobezogenen Zielfunktionswerten widerspiegeln, messen wir lediglich das Verlustrisiko. Dazu verwenden wir die Verlustwahrscheinlichkeit VW , d.h. die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten all jener Szenarien, bei denen ein negativer Gewinn (Verlust) auftritt.

5.2.3.4 Ex post-Evaluation

Für eine Ex post-Beurteilung von Plänen wählen wir für jede Instanz ein Szenario $o \in \{1, \dots, K\}$ zufällig aus³³ und ermitteln dafür den absoluten Gewinn OZ , den relativen Regret OT und den absoluten Regret OR . Mit Hilfe dieser sowie weiterer Größen wird das Lösungsverhalten für eine konkret eintretende Umweltentwicklung simuliert.

Dadurch soll überprüft werden, ob die anhand von Wahrscheinlichkeitsverteilungen und entsprechenden Maßen abgeleiteten Empfehlungen auch unter Beachtung der Einmaligkeit jeder Planungssituation Gültigkeit haben. Der Erwartungswert basiert auf der (beliebigen) Wiederholbarkeit der Situationen, bei denen die Szenarien mit den angenommenen Wahrscheinlichkeiten auftreten. Davon kann in der Realität jedoch nur selten ausgegangen werden. Die Extremmaße (schlechteste und beste Werte) gehen von extremen Risikoeinstellungen aus und berücksichtigen letztlich nur ein Szenario (das Worst Case- und das Best Case-Szenario). Somit bietet sich anhand

³³ Die Auswahl von o erfolgt durch Verwendung von Zufallszahlen, die gemäß den Eintrittswahrscheinlichkeiten verteilt sind (vgl. Domschke und Drexl 1998, Kap. 10.4.3).

eines zufällig ausgewählten Szenarios die Möglichkeit, das Verhalten von Modellen bzw. der damit ermittelten Pläne unter realitätsnäheren Bedingungen zu untersuchen, v.a. auch um die Relevanz der zuvor betrachteten Ex ante-Maße zu evaluieren.

5.2.3.5 Maße für den direkten Vergleich zwischen Modellen

Die bisher beschriebenen Maße lassen sich für jeden Plan und somit für jedes Modell isoliert berechnen, woraus sich Möglichkeiten zum Vergleich der Modelle ergeben. Um jedoch auch direkte Vergleiche zwischen einzelnen oder zwischen allen Modellen zu ermöglichen, wollen wir weitere Maße einführen.

Zum einen berechnen wir für die wichtigsten der zuvor eingeführten Maße *relative Abweichungen* $\Delta w = |w^* - w| / w^*$ zwischen dem Wert w des betrachteten Plans (Modells) und dem bezüglich dieses Kriteriums bestmöglichen Wert w^* (höchster bzw. niedrigster Wert, den eines der Modelle erzielt). Dabei ist darauf zu achten, daß sich eine sinnvolle relative Abweichung nur dann ergibt, wenn w^* nicht sehr klein oder gar Null ist. Somit werden relative Abweichungen z.B. nicht für BR oder BT berechnet, da sich hierbei $w^* = 0$ ergeben kann.

Ein weiteres Vergleichsmaß ergibt sich durch Bilden von *Rangfolgen* bezüglich verschiedener Maße. Dabei werden die Modelle nach aufsteigenden oder absteigenden Werten des betrachteten Maßes sortiert (z.B. absteigend bei EZ, aufsteigend bei ET). In dieser Reihenfolge erhalten sie Rangplätze 1, 2, ..., M, wenn M die Anzahl der in den Vergleich einbezogenen Modelle ist. Liefert zwei oder mehrere Modelle Pläne mit demselben Wert, so werden die Ränge gemittelt. Gibt es z.B. drei Modelle mit dem zweithöchsten Gewinn, so erhalten alle drei Modelle den Rang $(2 + 3 + 4) / 3 = 3$.

Die zuvor beschriebenen Vergleichsmaße bieten zwar die Möglichkeit, Modelle leichter zu vergleichen, man muß sich jedoch stets bewußt sein, daß ihre konkrete Ausprägung von der Menge der beteiligten Modelle abhängig ist. Außerdem ist bei Rängen zu berücksichtigen, daß in Rangplätzen gemessene Abstände keinen Schluß auf die absolute Höhe von Unterschieden zulassen.

Die folgenden *Dominanzbeziehungen* erlauben in bestimmten Fällen, deutliche Unterschiede zwischen Modellen zu ermitteln und ggf. einzelne Modelle als ungeeignet zu identifizieren (vgl. Dinkelbach 1982, Kap. 2.6.3, Adam 1996, S. 229 ff., Dinkelbach und Kleine 1996, Kap. 3.2.2, oder Riess 1996, S. 16 ff.):

- Eine *absolute Dominanz* eines Plans A über einen Plan B liegt vor, wenn das beste Ergebnis von B nicht günstiger als das schlechteste von A ist, d.h. wenn $BZ(B) \leq SZ(A)$ gilt.
- Bei der *Zustandsdominanz* weist der dominierende Plan A für jedes Szenario ein mindestens so hohes Ergebnis auf wie der dominierte Plan B und für mindestens ein Szenario ein höheres, d.h. es gilt $z_k(A) \geq z_k(B)$ für $k=1, \dots, K$ sowie $z_k(A) > z_k(B)$ für mindestens ein k .
- Die *Wahrscheinlichkeitsdominanz* sagt aus, daß der dominierende Plan A jedes Anspruchsniveau z mit einer mindestens so hohen Wahrscheinlichkeit wie B

und mindestens ein Niveau mit höherer Wahrscheinlichkeit erreicht. Bezeichnen wir die zufallsabhängigen Ergebnisse der Pläne mit $z(A)$ und $z(B)$, so muß demnach $W(z(A) \geq z) \geq W(z(B) \geq z)$ für alle z und $W(z(A) \geq z) > W(z(B) \geq z)$ für mindestens ein z gelten.

Die Dominanzarten werden von oben nach unten schwächer und enthalten die jeweils vorhergehende Ausprägung als Spezialfall. Während das Vorliegen der absoluten oder der Zustandsdominanz zu einer eindeutigen Rangfolge zwischen zwei Plänen bzw. Modellen führt, ist die Wahrscheinlichkeitsdominanz nicht in allen Fällen ein verlässlicher Indikator für die Vorteilhaftigkeit eines Plans gegenüber einem anderen. Sie liefert allerdings einen deutlichen Hinweis in diese Richtung.

5.2.3.6 Zusammenstellung der wichtigsten Maße³⁴

EZ	Erwartungswert des Ergebnisses: $EZ = \sum_{k=1}^n p_k \cdot z_k$
BZ	Bestes Ergebnis: $BZ = \max \{z_k \mid k=1, \dots, K\}$
SZ	Schlechtestes Ergebnis: $SZ = \min \{z_k \mid k=1, \dots, K\}$
MZ	Median des Ergebnisses (50%-Quantil der Ergebnis-Zufallsvariable z)
SQZ	5%-Quantil von z : SQZ ist der kleinste Wert mit $W(z \leq SQZ) \geq 0,05$
BQZ	95%-Quantil von z : BQZ ist der größte Wert mit $W(z \geq BQZ) \geq 0,05$
R(EZ)	Rang des erwarteten Ergebnisses
ET	Erwarteter relativer Regret $t_k = (z_k^* - z_k) / z_k^* $; $ET = \sum_{k=1}^n p_k \cdot t_k$
BT	Beste relativer Regret: $BT = \min \{t_k \mid k=1, \dots, K\}$
ST	Schlechtester relativer Regret: $ST = \max \{t_k \mid k=1, \dots, K\}$
MT	Median (50%-Quantil der relativen Regretzufallsvariable r)
SQT	95%-Quantil von r : SQT ist der größte Wert mit $W(r \geq SQT) \geq 0,05$
BQT	5%-Quantil von r : BQT ist der kleinste Wert mit $W(r \leq BQT) \geq 0,05$
R(ET)	Rang des erwarteten relativen Regrets
ER	Erwartungswert des abs. Regrets $r_k = z_k^* - z_k$; $ER = \sum_{k=1}^K p_k \cdot r_k$
BR	Beste absoluter Regret: $BR = \min \{r_k \mid k=1, \dots, K\}$
SR	Schlechtester absoluter Regret: $SR = \max \{r_k \mid k=1, \dots, K\}$
UW	Unzulässigkeitswahrscheinlichkeit
VW	Verlustwahrscheinlichkeit: $VW = W(z < 0)$
OZ	Ergebnis eines zufällig ausgewählten Szenarios o : $OZ = z_o$
R(OZ)	Rang des zufällig ausgewählten Szenarios

- OT relativer Regretwert des zufällig ausgewählten Szenarios o: $OT = t_o$
 OR absoluter Regretwert des zufällig ausgewählten Szenarios o: $OR = r_o$

5.3 Untersuchte Modelle

5.3.1 Deterministische Ersatzwertmodelle

Zur Darstellung der verschiedenen Modelle und deren Bezeichnungen vgl. Kap. 4.1. Im Fall D-ES wurden als Sicherheitszuschläge die Faktoren $s = 1, 1, 1, s = 1, 2$ und $s = 1, 3$ gewählt, so daß sich Modelle D-ES(1.1), D-ES(1.2) und D-ES(1.3) ergeben.

Das in Kap. 4.2.1.5 vorgestellte vereinfachte separierte CC-Modell zählt (im speziellen Fall der Unsicherheit nur eines Parameters) zu den deterministischen Modellen. Es wird als D-Q(α) bezeichnet, da als deterministische Dauern die α -Quantile $d_{ij}(\alpha)$ der zufälligen Dauern d_{ij}^k verwendet werden. Untersucht werden $\alpha = 0, 7, \alpha = 0, 8$ und $\alpha = 0, 9$.

5.3.2 Robuste Modelle

Wir betrachten grundsätzlich alle Kombinationen von Ersatzrestriktionen und Er-satzziel-funktionen, die in Tab. 5.3 zusammengestellt sind. In Kap. 4.2.1 finden sich alle Modelle der ersten Zeile, in Kap. 4.2.2 die K-Modelle. Die übrigen lassen sich durch Kombination der jeweiligen Modellteile gewinnen.

Im Falle von KCC und CC werden jeweils (simultane) Zulässigkeitswahrscheinlichkeiten von $\alpha = 0, 7, \alpha = 0, 8$ sowie $\alpha = 0, 9$ untersucht.

Als vorzugebendes Gewinnniveau im Aspirations-Kriterium wurde der mit den Faktoren 0,7, 0,8 bzw. 0,9 multiplizierte optimale Erwartungswert von K-EW gewählt. Als vorzugebendes Wahrscheinlichkeitsniveau beim Fraktal-Kriterium wurden 70%, 80% sowie 90% gewählt.

Es ergeben sich insgesamt 112 (8 x 14) robuste Modelltypen. Wir geben jedoch nicht für alle Modelle vollständige Ergebnisse an, sondern reduzieren die Anzahl der Modelle nach ersten Tests.

Bei einer Auswertung ohne zusätzliche Kompensationsmöglichkeiten nach M18 er-mittelt das Modell K-EW den maximalen Wert des absoluten Erwartungswertes EZ

34 Bei den angegebenen 95%-Quantilen ist zu beachten, daß sie von der gewöhnlichen Definition (vgl. Heike und Tärcolea 2000, S. 305 ff.) leicht abweichen. Üblich ist, den kleinsten Wert zu wählen, der mit Wahrscheinlichkeit 0,95 erreicht wird. Stattdessen wählen wir eine Definition über die Gegenwahrscheinlichkeit, so daß man genau genom-men von 5%-Gegenquantilen sprechen sollte. Ein Unterschied besteht jedoch nur bei diskreten Verteilungen, wenn die treppenförmige Verteilungsfunktion genau bei Wahr-scheinlichkeit 0,95 einen horizontalen Verlauf aufweist. Dies ist aufgrund der Szenario-anzahl und der Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten jedoch extrem unwahrscheinlich.

Kriterien	Fat Solution	Kompen-sation	CC + Kom-pensation	Simultanes CC
Erwartungswert	F-EW	K-EW	KCC-EW	CC-EW
Hodges-Lehmann ($q=1$)	F-HL	K-HL	KCC-HL	CC-HL
Maxi-Min	F-MM	K-MM	KCC-MM	CC-MM
Maxi-Max	F-MX	K-MX	KCC-MX	CC-MX
Hurwicz ($\lambda=0,5$)	F-HU	K-HU	KCC-HU	CC-HU
Mini-Max-Regret	F-AR	K-AR	KCC-AR	CC-AR
Rel. Mini-Max-Regret	F-RR	K-RR	KCC-RR	CC-RR
Rel. Regret-Erwartungsw.	F-RE	K-RE	KCC-RE	CC-RE
Aspiration	F-AS	K-AS	KCC-AS	CC-AS
Fraktal	F-FR	K-FR	KCC-FR	CC-FR

Tab. 5.3: Übersicht der robusten Modelle

und des absoluten Regret-Erwartungswertes ER, da es gerade die entsprechenden Zielkriterien optimiert. Desweiteren liefern die Modelle K-MM, K-AR, K-RE so-wie K-RR die optimalen Werte von SZ, SR, ET sowie ST. Die günstigsten Werte von BZ, BR sowie BT ergeben sich für das Modell K-MX, das die szenariooptimale Lösung mit größtem Zielfunktionswert ermittelt.

Im Falle der Auswertung mit zusätzlichen Kompensationsmöglichkeiten nach M19 müssen diese Aussagen nicht gelten, da u.U. zusätzliche Kompensationsmaßnah-men (die in den K-Modellen nicht enthalten sind) zu einer Verbesserung des maxi-mal erreichbaren Wertes führen können.

5.4 Verwendete Rechnerumgebung

Alle nachfolgend beschriebenen Experimente wurden mit Hilfe von CPLEX 4.0 durchgeführt. Die Modellgenerierung erfolgte mit diversen Programmen in der Pro-grammiersprache C, die Auswertung mit Hilfe von MS Excel 97.

Als Hardwareplattform diente ein Personalcomputer mit Intel Pentium MMX Pro-cessor (233 MHz Taktfrequenz) und 64 MB Hauptspeicher unter Windows NT 4.0.

6 Ergebnisse der experimentellen Untersuchung

Das Ziel der Untersuchungen besteht darin, Antworten auf die Fragen zu erhalten, ob sich der Mehraufwand zur Formulierung und Lösung robuster Optimierungsmo- delle lohnt und welche Modelle aus Sicht der robusten Planung in verschiedenen Entscheidungssituationen empfehlenswert sind.

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist der anhand des RCFSP-Datensatzes von Patterson (1984) erzeugte Datensatz für das stochastische LTCTOP mit 110 Instanzen (Kap. 5.1). Für jede der Instanzen werden die verschiedenen Modelle formuliert und gelöst. Anschließend erfolgt deren Auswertung mit Hilfe von Modell M18 bzw. M19 sowie ihre Beurteilung anhand der verschiedenen in Kap. 5.2.3 beschriebenen Maße. Diese Maße werden jeweils über alle Probleminstanzen gemittelt.

6.1 Rechenzeiten

Tab. 6.1 gibt einen Überblick über die benötigten durchschnittlichen Rechenzeiten aller untersuchten Modelle (für $K=24$). Die wichtigsten und später am ausführlich- sten untersuchten Modelle sind fett unterlegt.

Als obere Schranke der Rechenzeit wird pro Instanz eine Zeit von 500 Sekunden festgelegt, nach der die Rechnung für jedes Modell abgebrochen und die beste bis dahin ermittelte Lösung gewertet wird.

Alle D-Modelle können erwartungsgemäß sehr schnell (in kaum meßbarer Zeit) ge- löst werden. Die K-Modelle ohne Binärvariablen benötigen jedoch auch nur einen extrem geringen Rechenaufwand im Bereich weniger Sekunden. Bei den Modellen mit Binärvariablen (MX, HU, AS, FR) steigt die Rechenzeit bis auf knapp 30 Se- kunden. Viele der Chance-Constrained Modelle (KCC und CC) erreichen dagegen aufgrund der bei der Modellierung benötigten Binärvariablen die Rechenzeit- schranke nach 500 Sekunden, ohne die optimale Lösung gefunden bzw. als solche bewiesen zu haben.³⁴

Zusätzlich ist zu erwähnen, daß die Ermittlung der Werte z_k^* , die von den regreba- sierten Ersatzzielfunktionen (AR, RR, RE) benötigt werden, in den Rechenzeiten zwar nicht enthalten ist, jedoch bei $K=24$ insgesamt mit höchstens 1 Sekunde zu Bu- sten Planung gehen wir davon aus, daß diese Werte im Rahmen einer ro- busten Planung zur Analyse der Ergebnisse ohnehin gebraucht werden, so daß ihr Berechnungsaufwand nicht den Modellen zur Last gelegt werden sollte.

³⁴ Weitere Untersuchungen zeigen, daß fast in allen Fällen das Optimum gefunden wird, jedoch die Rechenzeit selten ausreicht, die Optimalität der Lösung zu beweisen. Daher können die weiter unten dargestellten Ergebnisse für CC-Modelle ohne wesentliche Abstriche als vollständig aussagekräftig angesehen werden. Selbst wenn in einigen Fäl- len das Optimum verfehlt wurde, ändert dies nichts an den später getroffenen Aussagen, da auch die Rechenzeit ein Qualitätskriterium ist.

Modell	Rechenzeit	Modell	Rechenzeit	Modell	Rechenzeit
D-EW	0,4	CC(0,7)-AR	79,8	KCC(0,7)-RE	152,0
D-B	0,0	CC(0,7)-RR	190,8	KCC(0,7)-FR(0,7)	499,3
D-W	0,0	CC(0,7)-RE	61,5	KCC(0,7)-FR(0,8)	492,2
D-ES(1,1)	0,0	CC(0,7)-FR(0,7)	254,6	KCC(0,7)-FR(0,9)	473,6
D-ES(1,2)	0,0	CC(0,7)-FR(0,8)	205,3	KCC(0,7)-AS(0,7)	7,5
D-ES(1,3)	0,0	CC(0,7)-FR(0,9)	121,6	KCC(0,7)-AS(0,8)	16,7
D-Q(0,7)	0,0	CC(0,8)-EW	111,8	KCC(0,7)-AS(0,9)	87,7
D-Q(0,8)	0,0	CC(0,8)-MX	459,4	KCC(0,8)-EW	463,3
D-Q(0,9)	0,0	CC(0,8)-MM	149,1	KCC(0,8)-MX	337,3
K-EW	0,9	CC(0,8)-HU	475,1	KCC(0,8)-MM	390,2
K-MX	28,5	CC(0,8)-HL	121,5	KCC(0,8)-HU	474,5
K-MM	1,5	CC(0,8)-AR	178,1	KCC(0,8)-HL	405,3
K-HU	13,0	CC(0,8)-RR	286,4	KCC(0,8)-AR	463,0
K-HL	1,6	CC(0,8)-RE	170,8	KCC(0,8)-RR	474,3
K-AR	2,9	CC(0,8)-FR(0,7)	391,4	KCC(0,8)-RE	461,7
K-RR	2,8	CC(0,8)-FR(0,8)	357,3	KCC(0,8)-FR(0,7)	500,3
K-RE	0,8	CC(0,8)-FR(0,9)	243,0	KCC(0,8)-FR(0,8)	500,3
K-FR(0,7)	20,7	CC(0,9)-EW	7,4	KCC(0,8)-FR(0,9)	488,2
K-FR(0,8)	11,7	CC(0,9)-MX	261,1	KCC(0,8)-AS(0,7)	7,7
K-FR(0,9)	6,6	CC(0,9)-MM	21,9	KCC(0,8)-AS(0,8)	8,7
K-AS(0,7)	0,9	CC(0,9)-HU	291,3	KCC(0,8)-AS(0,9)	58,3
K-AS(0,8)	1,5	CC(0,9)-HL	7,8	KCC(0,9)-EW	490,2
K-AS(0,9)	3,6	CC(0,9)-AR	21,5	KCC(0,9)-MX	330,3
F-EW	0,4	CC(0,9)-RR	62,6	KCC(0,9)-MM	389,7
F-MX	7,3	CC(0,9)-RE	7,6	KCC(0,9)-HU	488,3
F-MM	0,7	CC(0,9)-FR(0,7)	43,3	KCC(0,9)-HL	438,7
F-HU	4,2	CC(0,9)-FR(0,8)	31,3	KCC(0,9)-AR	462,4
F-HL	0,7	CC(0,9)-FR(0,9)	17,2	KCC(0,9)-RR	480,2
F-AR	1,1	KCC(0,7)-EW	145,8	KCC(0,9)-RE	488,5
F-RR	1,2	KCC(0,7)-MX	240,5	KCC(0,9)-FR(0,7)	499,0
F-RE	0,3	KCC(0,7)-MM	239,8	KCC(0,9)-FR(0,8)	500,2
CC(0,7)-EW	42,7	KCC(0,7)-HU	435,5	KCC(0,9)-FR(0,9)	496,9
CC(0,7)-MX	432,2	KCC(0,7)-HL	263,4	KCC(0,9)-AS(0,7)	5,9
CC(0,7)-MM	76,6	KCC(0,7)-AR	374,4	KCC(0,9)-AS(0,8)	6,8
CC(0,7)-HU	434,1	KCC(0,7)-RR	395,1	KCC(0,9)-AS(0,9)	29,9
CC(0,7)-HL	42,2				

Tab. 6.1: Rechenzeiten in Sekunden

6.2 Vollständige Information

Wir untersuchen die zuvor angegebenen Modelle anhand des modifizierten Pat- tern-Datensatzes mit 110 Probleminstanzen (Kap. 5.1), wobei wir zunächst davon ausgehen, daß *vollkommene Information über die Unsicherheit* vorliegt, d.h. die bei der Planausführung möglichen Anpassungsmaßnahmen und die Szenarien sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeit sind bestmöglich bekannt (Kap. 5.2.1).

Die Auswertung wird daher *ohne Berücksichtigung zusätzlicher Kompensations- maßnahmen* mit Hilfe von Modell M18 anhand der bei der Generierung erzeugten $K=24$ Szenarien und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten durchgeführt. Zur Beurtei- lung der Modelle dienen die in Kap. 5.2.3 dargestellten Maße, wobei jeweils Durch- schnittswerte über alle 110 Instanzen angegeben werden.

6.2.1 Beurteilung aller Modelle anhand von Basismaßen

Tab. 6.2 bis 6.10 geben eine erste Übersicht der ermittelten Ergebnisse aller Modellkombinationen anhand von Basismaßen für die Verteilung der Gewinne, der relativen und der absoluten Regrete. Danach konzentriert sich die Untersuchung mit weiteren Maßen auf ausgesuchte Modelle.

6.2.1.1 Deterministische Ersatzwertmodelle

Tab. 6.2 zeigt die Ergebnisse der D-Modelle. Die jeweils besten erzielten Werte sind hervorgehoben und in der vorletzten Zeile (Best) nochmals zusammengestellt. In der letzten Zeile (Opt) sind die optimalen Werte (ermittelt durch K-Modelle; vgl. Tab. 6.3) angegeben.

	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
D-EW	101,46	-301,64	296,51	213,98	560,63	52,35	59,1%	214,9%	11,1%
D-B	-249,06	-799,07	159,21	564,50	1058,17	198,68	166,5%	411,7%	47,4%
D-W	153,66	-3,97	234,66	161,78	308,01	64,41	43,6%	111,2%	18,1%
D-ES(1,1)	129,58	-218,19	291,65	185,86	477,87	50,30	49,7%	181,1%	10,8%
D-ES(1,2)	146,48	-148,84	282,82	168,95	412,89	50,37	44,2%	154,5%	11,3%
D-ES(1,3)	150,15	-103,58	268,03	165,29	374,52	55,72	43,2%	142,2%	12,9%
D-Q(0,7)	187,48	-67,94	299,42	127,96	327,84	39,10	35,8%	120,0%	9,8%
D-Q(0,8)	203,49	45,80	279,01	111,95	230,43	45,27	30,9%	77,5%	11,8%
D-Q(0,9)	197,88	88,42	254,42	117,56	204,35	55,86	32,3%	63,3%	15,8%
Best	203,49	88,42	299,42	111,95	204,35	39,10	30,9%	63,3%	9,8%
Opt	264,25	231,09	363,41	51,19	73,38	0,42	14,8%	20,3%	0,1%

Tab. 6.2: Basismaße der D-Modelle ohne zusätzliche Kompensation

Es zeigt sich das Problem der Bestimmung geeigneter Werte für die unsicheren Vorgangsdauern. So weisen der absolute und der relative Regret für alle Modelle hohe Werte auf, d.h. die Lösungen sind wenig optimalitätsrobust.

Der in der Praxis sicherlich am häufigsten gewählte Ansatz, für unsichere Parameter den Erwartungswert einzusetzen, erweist sich hier in Gestalt von D-EW als wenig zweckmäßig. Im ungünstigsten Fall wird ein Verlust verursacht (SZ), der den bestmöglichen Gewinn (BZ) betragsmäßig übersteigt. Der erwartete Gewinn ist weniger als halb so groß wie der bestmögliche. Ähnlich sieht es im umgekehrten Sinne in Bezug auf die Regrete aus.

Völlig ungeeignet ist das Modell D-B, das nicht einmal einen akzeptablen Wert BZ erreicht. D-W weist zwar aus Sicht der robusten Planung bessere Ergebnisse als D-EW auf, das Sicherheitsstreben ist jedoch zu ausgeprägt, d.h. es werden zu große Pufferzeiten zwischen den Ereigniszeitpunkten FZ_1 eingeplant. Daraus folgt eine geplante deutliche Überschreitung der Projektdauer, die für viele Szenarien keinesfalls notwendig wäre.

Die Modelle D-ES, bei denen der erwartete Wert der Vorgangsdauern mit den angegebenen Sicherheitszuschlagsfaktoren multipliziert wird, erzielen deutlich bessere Ergebnisse. Am besten schneiden jedoch die Modelle D-Q mit 80%- und 90%-Quantilen der Vorgangsdauern ab. D-Q(0,8) liefert die besten Maße für die Erwartungswerte, D-Q(0,9) bestimmt Lösungen mit den deutlich besten Worst-Case-Wert-

ten. Somit sind diese speziellen CC-Modelle relativ zu den anderen Modellen als robust anzusehen. Für letztere gilt, daß die Intervalle zwischen Best- und Worst Case sehr groß sind (geringe Ergebnisstabilität) und deutlich im Verlustbereich liegen. Daher kann man in diesen Fällen ganz sicher nicht von einem akzeptablen Grad an Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit ausgehen.

Im weiteren werden die Modelle D-EW, D-W sowie D-Q(0,8) und D-Q(0,9) betrachtet, ersteres wegen seiner allgemeinen Bedeutung und letztere, weil sie relativ am besten abschneiden.

Fazit: Vergleicht man die Ergebnisse mit den im folgenden dargestellten Ergebnissen für K-Modelle, so wird deutlich, daß kein D-Modell wirklich in der Lage ist, robuste Pläne zu ermitteln.

6.2.1.2 Kompensationsmodelle

Die in Tab. 6.3 dargestellten Ergebnisse der K-Modelle entsprechen den Erwartungswerten. So erzielt K-EW den höchsten erwarteten Gewinn EZ und den höchsten erwarteten absoluten Regret ER aller Modelle, K-MX maximiert den besten Wert BZ, K-MM den schlechtesten Wert SZ. Die regrebtasierten Modelle K-RR, K-AR und K-RE minimieren die Maße ST, SR und ET.

K-	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
EW	264,25	142,68	300,77	51,19	118,10	17,99	15,0%	46,3%	5,3%
MX	95,72	-332,03	363,41	221,72	589,48	0,42	69,5%	233,5%	0,1%
MM	247,65	231,09	265,40	67,79	108,68	17,30	18,9%	27,3%	6,3%
HU	253,40	221,58	291,13	63,04	99,66	21,63	17,4%	26,3%	7,6%
HL	254,43	229,05	277,70	61,00	98,83	17,08	17,0%	25,2%	6,1%
AR	257,26	179,04	294,57	58,18	73,38	27,24	16,8%	29,6%	8,1%
RR	257,10	200,33	286,26	58,34	82,63	26,14	16,6%	20,3%	8,5%
RE	263,64	165,93	296,43	51,80	104,25	16,68	14,8%	35,2%	5,3%
FR(0,7)	250,60	34,45	304,44	64,84	223,39	14,96	19,9%	87,8%	4,4%
FR(0,8)	255,94	85,89	295,51	59,49	174,75	15,29	17,8%	69,3%	4,7%
FR(0,9)	256,43	152,84	284,14	59,01	119,61	18,22	16,9%	44,0%	5,9%
AS(0,7)	232,69	200,99	248,51	82,75	126,12	32,89	23,4%	32,6%	11,8%
AS(0,8)	240,94	201,31	238,16	74,50	117,91	27,79	21,3%	34,3%	9,8%
AS(0,9)	252,07	178,63	273,51	63,36	111,29	19,62	18,2%	38,2%	6,5%
Best = Opt	264,25	231,09	363,41	51,19	73,38	0,42	14,8%	20,3%	0,1%

Tab. 6.3: Basismaße der K-Modelle ohne zusätzliche Kompensation

Das Modell K-MX kann nur extrem risikofreudigen Entscheidungsträgern empfohlen werden und ist aus Sicht der robusten Planung völlig ungeeignet.

Alle anderen Modelle erzielen wesentlich bessere Ergebnisse als die D-Modelle. K-EW liefert bezüglich aller Maße einen besseren Wert als das jeweils beste D-Modell und (zustands-) dominiert diese daher in Bezug auf die betrachteten Maße. Aber auch die anderen Modelle (mit Ausnahmen bei K-AS und K-FR) erreichen ähnlich gute Ergebnisse. Je nach Risikofreude und Finanzlage eines Unternehmens bieten sie sich jedoch unterschiedlich gut an.

Ein umsatzstarkes Unternehmen mit hohen Rücklagen, das sehr viele Projekte durchführt, wird am ehesten den maximalen Gewinnerwartungswert anstreben und

K-EW oder K-RE verwenden. Die Entscheidungsträger eines kleineren Unternehmens, dessen Existenz durch ein ungünstig laufendes Projekt gefährdet ist, werden eher eine risikoscheue Haltung innehaben und zur Projektplanung K-MM, K-HU oder K-HL wählen, die hohe gesicherte Werte SZ liefern, d.h. eine hohe Ergebnisrobustheit aufweisen.

Aus Sicht des Projektmanagers sind v.a. regretbasierte Modelle empfehlenswert, da sie das höchste Maß an Optimalitätsrobustheit erzielen.³⁵ Bei erheblicher Risikoscheu (Maße SR, ST) ist vor allem K-RR, aber auch K-AR, bei geringerer Risikoscheu (ER, ET) besonders K-RE (sowie K-EW) zu empfehlen.

Beim Aspirationskriterium besteht die Schwierigkeit der Festlegung eines geeigneten Anspruchsniveaus. Obwohl wir schon den optimalen Wert von EZ als bekannt voraussetzen und modifiziert als Anspruchsniveau vorgeben, weisen alle Modellvarianten Schwächen auf und werden – zumindest bezüglich der Basismaße – durch K-HL dominiert. Die Modelle mit Fraktill-Kriterium unterliegen starken Schwan- kungen (Worst Case zu Best Case) und sind somit einerseits für einen risikoscheuen Planer zu riskant, andererseits weisen sie für einen risikofreudigeren Planer zu geringe Gewinnmöglichkeiten auf. Lediglich K-FR(0.9) erzielt ähnlich gute Ergebnisse wie K-EW.

Als erstes Fazit können wir festhalten, daß K-Modelle (bei sinnvoller Zielfunktion) als geeignete Methoden zur Ermittlung robuster Pläne anzusehen sind.

6.2.1.3 Kombinierte Chance-Constrained-Kompensations-Modelle

In Tab. 6.4, 6.5 und 6.6 sind die Basismaße der kombinierten Chance-Constrained-Kompensations-Modelle (KCC) für die verschiedenen Zulässigkeitswahrscheinlichkeiten zusammengestellt.

Augenfällig sind die großen Intervalle der möglichen Werte zwischen SZ und BZ bei einer Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,7$ sowie die ausgeprägte Rechtsteilheit der Ergebnisverteilungen (BZ – EZ ist bei allen Modellen viel kleiner als EZ – SZ). Die Erzielung eines einigermaßen akzeptablen Mindestgewinns ist nur beim Erwartungswert-Kriterium (EW) und dem Aspirations-Kriterium (AS) sichergestellt, die annähernd so gut abschnitten wie K-EW, jedoch weitestgehend davon dominiert werden (vgl. Tab. 6.5).

Alle anderen Modelle werden praktisch von sämtlichen sinnvollen K-Modellen dominiert und können teilweise nicht einmal garantieren, daß ein Gewinn erzielt wird. Dabei ergeben sich bei einigen Ersatzzielfunktionen ihrer Definition scheinbar widersprechende Ergebnisse.

So ist es z.B. erstaunlich, daß das Maxi-Min-Kriterium (MM) einen extrem schlechten Worst Case-Wert SZ erzielt, obwohl es auf die Maximierung gerade dieses Wert-

³⁵ Dazu ist zu bemerken, daß Planungsleistungen häufig ex post evaluiert werden, wenn die eingetretene Umweltlage und mithin der (szenario-) optimale Gewinn ermittelbar ist. Daher sollten Planer auf mittleren Managementebenen v.a. auf die Optimalitätsrobustheit (und die Zulässigkeitsrobustheit) abzielen.

KCC(0.7)	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
EW	255,20	126,20	292,72	60,24	149,90	18,52	17,7%	55,6%	6,0%
MX	2,87	-175,39	72,52	312,57	453,18	244,49	114,6%	196,6%	82,5%
MM	94,76	-78,79	153,60	220,68	352,59	161,42	73,7%	146,0%	49,0%
HU	122,00	-36,62	175,62	193,43	316,25	137,22	63,2%	129,6%	40,3%
HL	152,77	-11,89	205,66	162,67	287,82	108,88	50,8%	116,6%	29,3%
AR	153,02	-10,84	206,17	162,41	286,32	109,50	50,7%	116,1%	29,5%
RR	155,72	-7,91	205,72	159,72	282,66	109,57	49,0%	111,9%	29,5%
RE	173,26	3,25	222,35	142,18	268,95	94,21	43,4%	106,6%	24,6%
FR(0.7)	172,45	7,61	220,10	142,99	267,47	94,64	43,5%	105,8%	24,8%
FR(0.8)	172,87	3,85	220,52	142,57	267,55	94,30	43,4%	106,6%	24,7%
FR(0.9)	188,84	17,67	236,17	126,60	254,13	78,37	38,9%	101,3%	20,7%
AS(0.7)	243,45	109,76	301,29	71,99	169,27	29,02	22,1%	62,9%	8,6%
AS(0.8)	247,73	136,18	294,52	67,71	151,76	24,57	20,2%	53,8%	7,6%
AS(0.9)	251,95	133,29	288,89	63,48	146,72	19,00	18,6%	54,6%	6,0%
Best	255,20	136,18	301,29	60,24	146,72	18,52	17,7%	53,8%	6,0%
Opt	264,25	231,09	363,41	51,19	73,38	0,42	14,8%	20,3%	0,1%

Tab. 6.4: Basismaße der KCC-Modelle mit $\alpha = 0,7$ ohne zusätzliche Kompensation

es angelegt ist. Dies kommt dadurch zustande, daß die KCC-Modelle mit bis zu einer Wahrscheinlichkeit von $1 - \alpha = 0,3$ die Verletzung der Reihenfolgebedingungen erlauben, wodurch in den entsprechenden Szenarien die Kompensationskosten zu Null gesetzt werden (vgl. Kap. 4.2.1.3). Am lohnendsten ist diese Relaxation für die Szenarien mit den höchsten Normaldauern, also insbesondere für das Worst Case-Szenario, durch das der Wert SZ entsteht. Somit maximiert KCC-MM nicht tatsächlich den kleinsten Gewinn, sondern (ungefähr) das $(1 - \alpha)$ -Quantil der Ergebnisverteilung. Der tatsächliche Wert SZ kann dadurch beliebig schlecht werden.

Der für MM beschriebene Effekt wirkt sich auch auf das Hurwicz-Kriterium (HU) und das Hodges-Lehmann-Kriterium (HL) negativ aus, da sie MM als Komponente beibehalten. Vorteilhaft ist der Effekt lediglich für das Aspirations-Kriterium, da die vorgegebenen Niveaus so leichter zu erreichen sind. Dennoch ergibt sich in bezug auf die Worst Case-Werte eine deutliche Verschlechterung gegenüber K-AS.

KCC(0.8)	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
EW	254,50	122,84	292,72	60,94	154,42	18,47	17,8%	56,4%	5,9%
MX	60,38	-121,00	134,52	255,06	401,27	182,02	84,0%	173,3%	53,5%
MM	114,66	-49,37	172,84	200,78	324,63	139,90	63,2%	136,4%	39,7%
HU	131,99	-11,97	180,49	183,45	291,70	128,63	55,1%	118,3%	35,1%
HL	159,76	3,89	206,92	155,68	271,31	105,11	43,9%	108,1%	25,8%
AR	159,68	-0,23	208,27	155,76	274,62	105,98	43,9%	109,4%	26,0%
RR	159,67	-3,39	208,95	155,77	276,69	106,96	44,0%	110,4%	26,3%
RE	178,64	7,52	226,95	136,80	262,65	90,68	38,5%	107,8%	22,0%
FR(0.7)	178,75	9,93	226,22	136,69	260,81	90,58	38,4%	107,0%	21,9%
FR(0.8)	178,72	10,33	226,05	136,72	260,50	90,54	38,4%	106,9%	21,9%
FR(0.9)	195,12	30,75	241,85	120,32	240,83	74,31	33,9%	100,5%	17,9%
AS(0.7)	247,24	136,96	300,94	68,20	145,54	27,95	20,6%	53,1%	8,2%
AS(0.8)	250,43	156,95	292,97	65,01	134,23	24,88	19,2%	47,2%	7,9%
AS(0.9)	254,75	152,18	286,66	60,69	129,33	19,66	17,6%	46,3%	6,6%
Best	254,75	156,95	300,94	60,69	129,33	18,47	17,6%	46,3%	5,9%
Opt	264,25	231,09	363,41	51,19	73,38	0,42	14,8%	20,3%	0,1%

Tab. 6.5: Basismaße der KCC-Modelle mit $\alpha = 0,8$ ohne zusätzliche Kompensation

Analoge Überlegungen wie für MM gelten für die Mini-Max-Regret-Kriterien (AR und RR), die bezüglich SR und ST erstaunlich schlecht abschneiden. Auf ähnliche Weise kommen auch die großen Ergebnisunterschiede zwischen EW und dem relativen Regretwartungswert-Kriterium (RE) zustande, deren Ergebnisse im Fall der K-Modelle kaum unterscheidbar sind (vgl. Tab. 6.3). Das deutlich schlechtere Abschneiden von KCC-RE beruht vorwiegend darauf, daß die von Unzulässigkeit betroffenen Szenarien diejenigen mit den kleinsten szenariooptimalen Werten sind. Dadurch schlägt deren Nichtberücksichtigung bei den relativen Regretwerten sehr viel stärker zu Buche als bei den absoluten Gewinnen.

Das V erhalten des Maxi-Max-Kriteriums (MX), das den schlechtesten Wert für BZ erzielt, obwohl es diesen eigentlich maximieren soll, läßt sich auf ähnliche Weise erklären: In der Zielfunktion wird nur ein Szenario, und zwar dasjenige mit dem höchsten Gewinn, herücksichtigt. Der höchste Gewinn läßt sich erzielen, wenn jeder Vorgang maximal beschleunigt ist, die Beschleunigungskosten jedoch nicht in der Zielfunktion erfaßt sind. Dies ist der Fall für Szenarien, bei denen Unzulässigkeit der Reihenfolgebedingungen erlaubt ist. Somit kann der maximale Zielfunktionswert von KCC-MX anhand eines Plans entstehen, der für alle Szenarien eine maximale Beschleunigung vorsieht und dementsprechend in allen Fällen hohe Kosten verursacht.

Erhöht man die Zulässigkeitswahrscheinlichkeit auf $\alpha = 0,9$, so nähern sich die KCC-Modelle den K-Modellen an (es gilt $KCC(1,0) = K$) und die Notwendigkeit ungeplanter teurer Kompensationsmaßnahmen bei der Planausführung wird vermindert (vgl. Tab. 6.6). Insbesondere verhalten sich KCC-EW und KCC-RE wieder vergleichbar. Die Werte sind allerdings immer noch schlechter als die der entsprechenden K-Modelle. Dennoch zeigen spätere Untersuchungen, bei denen zusätzliche Kompensationsmaßnahmen zugelassen sind, daß bei höherem α teilweise auch bessere Ergebnisse erzielt werden können (vgl. Tab. 6.23).

KCC(0,9)-	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
EW	260,65	83,58	305,53	54,78	174,11	16,92	16,7%	71,8%	4,8%
MX	-36,40	-250,00	41,01	351,84	525,89	278,43	110,2%	204,3%	76,7%
MM	181,04	63,14	218,41	134,40	212,15	87,04	38,5%	78,1%	22,0%
HU	191,15	77,80	225,59	124,29	198,78	78,94	35,2%	72,8%	19,6%
HL	250,42	119,35	285,36	65,02	146,62	24,20	18,9%	55,9%	7,6%
AR	249,59	108,69	287,39	65,85	157,13	25,44	19,2%	60,3%	8,0%
RR	249,86	111,57	287,43	65,58	154,48	26,25	19,1%	59,1%	8,3%
RE	260,87	84,39	305,45	54,57	172,89	16,32	16,4%	69,3%	4,9%
FR(0,7)	260,28	83,91	304,74	55,16	174,02	16,38	16,6%	69,2%	4,9%
FR(0,8)	260,15	83,98	304,61	55,29	174,06	16,39	16,6%	69,2%	4,9%
FR(0,9)	259,66	88,03	303,32	55,77	171,58	16,56	16,7%	67,6%	5,0%
AS(0,7)	248,48	154,94	299,32	66,96	130,78	28,19	20,1%	46,6%	8,4%
AS(0,8)	251,79	176,65	290,81	63,65	117,20	24,02	18,5%	39,5%	7,8%
AS(0,9)	254,77	166,98	285,13	60,67	116,95	20,10	17,4%	41,0%	6,6%
Best	260,87	176,65	305,53	54,57	116,95	16,32	16,4%	39,5%	4,8%
Opt	264,25	231,09	363,41	51,19	73,38	0,42	14,8%	20,3%	0,1%

Tab. 6.6: Basismaße der KCC-Modelle mit $\alpha = 0,9$ ohne zusätzliche Kompensation

Die obige Diskussion der Ergebnisse legt nahe, daß bei der gewählten Kombination KCC von Kompensations- und Chance-Constrained-Modellen die meisten Ersatzzielfunktionen nicht oder nur bei hoher Zulässigkeitswahrscheinlichkeit sinnvoll

eingesetzt werden können, da ihnen durch die szenarioabhängige Kompensation bei gleichzeitiger Möglichkeit, ihre Kostenbewertung in der Zielfunktion zu vermeiden, die Optimierunggrundlage entzogen ist.

Möchte man die genannten Kriterien auf sinnvollere Weise in einem kombinierten Kompensations- und Chance-Constrained-Modell einsetzen, so ist zu empfehlen, nicht die Reihenfolgebeziehungen, sondern die Budget- und die Beschleunigungsrestriktionen zu relaxieren, wie dies für das μ -Kriterium im Modell M5 gezeigt wird. Wie in Kap. 4.2.1.3 bereits dargelegt, ergibt sich dadurch auch bei unzulässigem Ausmaß von Kompensationsmaßnahmen zumindest eine abschätzende Einbeziehung ihrer Kosten in der Zielfunktion. Wir geben jedoch keine expliziten Ergebnisse für diesen Modelltyp an, da sie sich nur wenig von denjenigen der K-Modelle unterscheiden, an diese jedoch nicht ganz heranreichen.

Fazit: Reine K-Modelle sind zur Ermittlung robuster Pläne den kombinierten Modellen vorzuziehen, zumindest wenn alle denkbaren Kompensationsmaßnahmen in die Planung einbezogen werden können und vollständige Information vorliegt. Außerdem sind einige Ersatzzielfunktionen nicht mit dem Modelltyp KCC kompatibel.

6.2.1.4 Simultane Chance-Constrained- und Fat Solution-Modelle

Die simultanen CC-Modelle sehen keine szenarioabhängigen Kompensationsmaßnahmen vor (vgl. Modell M7 in Kap. 4.2.1.4). Tab. 6.7, 6.8 und 6.9 zeigen die ermittelten Werte der Basismaße. Die Ergebnisse der F-Modelle stellen wir ebenfalls in diesem Abschnitt dar, weil sie CC-Modellen mit $\alpha = 1$ entsprechen.

CC(0,7)-	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
EW	162,10	80,60	178,09	153,34	214,65	104,59	35,2%	63,7%	20,3%
MX	190,40	120,68	203,89	125,03	181,10	77,09	30,8%	54,6%	17,5%
MM	225,80	160,21	237,96	89,63	142,66	41,33	24,3%	41,8%	13,3%
HU	219,96	161,87	230,60	95,48	148,02	45,79	25,5%	41,7%	14,3%
HL	229,19	154,94	243,90	86,25	142,21	38,28	23,3%	43,3%	12,2%
AR	227,99	149,41	243,18	87,45	145,86	40,01	23,7%	44,8%	12,9%
RR	226,29	147,84	241,25	89,14	147,20	41,46	24,1%	45,3%	13,1%
RE	227,99	147,09	243,81	87,45	147,97	38,79	23,6%	46,0%	12,2%
FR(0,7)	225,91	157,03	239,24	89,52	142,83	41,41	24,1%	42,6%	13,1%
FR(0,8)	226,00	158,65	238,89	89,44	142,61	41,31	24,1%	42,1%	13,2%
FR(0,9)	225,86	160,03	238,39	89,58	142,58	41,59	24,2%	41,9%	13,4%
Best	229,19	161,87	243,90	86,25	142,21	38,28	23,3%	41,7%	12,2%
Opt	264,25	231,09	363,41	51,19	73,38	0,42	14,8%	20,3%	0,1%

Tab. 6.7: Basismaße der CC-Modelle mit $\alpha = 0,7$ ohne zusätzliche Kompensation

Mit der Zulässigkeitswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,7$ ergeben sich für die meisten Modelle deutlich bessere Ergebnisse als bei den kombinierten Modellen KCC(0,7). Jedoch sind die Ergebnisse insgesamt deutlich schlechter als diejenigen der K-Modelle. Das bedeutet, es ist in keinem der Fälle von ausreichender Ergebnis- oder Optimalitätsrobustheit auszugehen. Auffällig ist wiederum die Rechtssteilheit der Ergebnisverteilungen, die auch bei $\alpha = 0,9$ noch deutlich erkennbar ist. Während sich die meisten Kriterien kaum unterscheiden, fallen die Ergebnisse von CC-MX und CC-EW für $\alpha = 0,7$ und von CC-AS mit wachsendem α immer deutlicher ab.

Zur Erklärung der Beobachtungen betrachten wir die Eigenschaften der CC-Modelle genauer: Sämtliche Variablen sind szenariounabhängig festzulegen. Dies gilt auch für die Beschleunigungsfaktoren v_{ij} der Vorgänge. Somit sind Spielräume, die sich bei der Ausführung von Projekten ergeben, nicht szenariospezifisch ausnutzbar, die Pläne sind starr. Andererseits besteht gegenüber KCC-Modellen der Vorteil, daß selbst bei Verletzung von Nebenbedingungen die Kostenwirkungen der entsprechenden Szenarien über die szenariounabhängig festgelegten Beschleunigungswerten zumindest teilweise erfaßt werden.

Die Eigenschaft der Planstarrheit führt im Falle von CC-EW (0,7) zu einer Festlegung auf Beschleunigungsfaktoren v_{ij} , dertart, daß sie für die einer Wahrscheinlichkeit von 0,7 entsprechenden günstigeren Szenarien die geringsten Kosten verursachen. Bei den übrigen, ungünstigsten Szenarien wird eine Verletzung der Reihenfolgebedingungen in Kauf genommen. Für diese Szenarien entstehen im Rahmen des Auswertungsmodells jedoch die höchsten Beschleunigungskosten, während für die berücksichtigten Szenarien ggf. überhaupt keine Beschleunigung erforderlich ist. Anschaulich und vereinfacht gesprochen wird der ungünstigste Teil der (gemeinsamen) Verteilung der Normaldauern abgeschnitten und für die Restverteilung der Erwartungswert bestimmt. Damit sind die schlechten Ergebnisse von CC-EW (0,7) zu erklären.

Für CC-AS führt die Starrheit der Pläne zur Problematik, daß die vorgegebenen Anspruchsniveaus nur schwerlich, d.h. mit kleiner Wahrscheinlichkeit und ausgeprägter Unzulässigkeit, erreichbar sind. Dies gilt insbesondere für AS(0,9). Bei steigender Zulässigkeitswahrscheinlichkeit nimmt die Starrheit zu, wodurch die Anspruchsniveaus überhaupt nicht mehr erreicht werden können. Die in diesen Fällen ermittelten Pläne sind (beliebig) unzulässig und die zugehörigen Ergebnisse daher völlig unbrauchbar. Folglich geben wir für CC-AS überhaupt keine Ergebnisse an. Auch wenn die vorgegebenen Anspruchsniveaus ggf. zu hoch sind, zeigt sich dennoch wiederum die grundlegende Problematik des Aspirations-Kriteriums. Ein zu hohes Niveau ergibt keine zulässige Lösung, während bei einem zu niedrigen Anspruchsniveau ggf. sehr viele Lösungen dieses Niveau zu 100% erreichen, von denen dann eine beliebige ausgewählt wird.

CC(0,8)-	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
EW	221,64	168,78	231,55	93,80	142,32	43,50	25,1%	39,7%	14,0%
MX	218,14	170,36	226,80	97,30	143,67	46,29	26,1%	39,2%	15,0%
MM	219,04	177,20	226,47	96,40	141,88	44,92	26,1%	37,5%	14,8%
HU	215,18	173,59	222,57	100,26	145,65	48,66	26,8%	39,0%	15,6%
HL	221,69	173,16	230,96	93,75	140,04	43,08	25,1%	38,2%	13,9%
AR	220,55	169,14	229,84	94,89	141,69	45,56	25,5%	39,2%	14,8%
RR	219,64	166,61	229,02	95,80	143,97	45,76	25,7%	39,8%	14,9%
RE	221,64	169,04	231,55	93,80	142,35	43,27	25,1%	39,4%	13,9%
FR(0,7)	219,51	171,31	228,10	95,93	142,38	45,65	25,8%	38,9%	14,8%
FR(0,8)	219,50	172,03	227,74	95,94	141,84	45,08	25,8%	38,9%	14,6%
FR(0,9)	219,57	176,10	227,36	95,87	141,47	44,51	25,9%	37,9%	14,6%
Best	221,69	177,20	231,55	93,75	140,04	43,08	25,1%	37,5%	13,9%
Opt	264,25	231,09	363,41	51,19	73,38	0,42	14,8%	20,3%	0,1%

Tab. 6.8: Basismaße der CC-Modelle mit $\alpha = 0,8$ ohne zusätzliche Kompensation

Die Eigenschaft der kostenmäßigen Erfassung aller Szenarien verringert gegenüber KCC die Überschätzung der Gewinnmöglichkeiten bei unzulässigen Szenarien. Somit erzielen (bei $\alpha = 0,7$ und $\alpha = 0,8$) alle Modelle, deren Ersatzzielfunktion einen extremen Wert der Verteilung optimiert (MX, MM, HU, HL, AR, RR), wesentlich bessere Ergebnisse. Ebenso ermittelt CC-RE deutlich günstigere Pläne als KCC-RE. Der für CC-EW beschriebene Effekt tritt bei CC-RE abgemildert auf, da die relativen Regrete bei den günstigsten Szenarien wegen der höchsten szenariooptimalen Werte am geringsten sind.

Bei steigender Zulässigkeitswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,7$ über 0,8 auf 0,9 führen die zuvor erörterten Eigenschaften zu zunehmender Ergebnisstabilität der Lösungen aller Modelle, da der schlechteste Wert SZ steigt und gleichzeitig der beste Wert BZ sinkt (Ausnahmen bei EW und MX, die zunächst alle Maße erhöhen). Gemessen an EZ sinkt jedoch auch das Gewinniveau. Dies bedeutet, daß die Ergebnisrobustheit nur bei vollständiger Risikoscheu zunimmt. Bezüglich der Regrete und mithin der Optimalitätsrobustheit ergeben sich analoge Erkenntnisse.

Für $\alpha = 0,9$ geht dies so weit, daß sämtliche Modelle durch K-MM absolut dominiert werden, d.h. sie erzielen im besten Falle (BZ) einen geringeren Gewinn als K-MM im schlechtesten Fall (auf weitere Dominanzen wird in Kap. 6.2.3 eingegangen). Somit sind derartige Pläne trotz ihrer hohen Ergebnisstabilität (oder gerade deswegen) als völlig ungeeignet zu betrachten.

CC(0,9)-	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
EW	208,49	183,14	213,76	106,95	153,51	50,73	28,5%	38,1%	16,6%
MX	205,28	179,56	210,30	110,16	156,17	54,23	29,5%	38,9%	18,1%
MM	205,34	185,52	209,39	110,09	156,42	52,25	29,8%	38,7%	17,6%
HU	206,36	184,58	210,82	109,08	155,32	52,38	29,3%	38,2%	17,3%
HL	208,29	185,48	213,26	107,15	153,35	50,62	28,6%	37,7%	16,7%
AR	207,24	181,70	212,14	108,20	153,42	52,81	29,0%	38,3%	17,5%
RR	207,38	182,17	212,30	108,06	153,34	52,68	29,0%	38,2%	17,5%
RE	208,48	182,94	213,76	106,96	153,44	50,71	28,5%	38,2%	16,7%
FR(0,7)	206,75	183,79	211,12	108,69	154,82	52,62	29,2%	38,4%	17,5%
FR(0,8)	206,75	184,02	210,98	108,69	155,10	52,26	29,2%	38,3%	17,4%
FR(0,9)	206,70	184,99	210,88	108,74	155,09	51,96	29,3%	38,2%	17,3%
Best	208,49	183,52	213,76	106,95	153,34	50,62	28,5%	37,9%	16,6%
Opt	264,25	231,09	363,41	51,19	73,38	0,42	14,8%	20,3%	0,1%

Tab. 6.9: Basismaße der CC-Modelle mit $\alpha = 0,9$ ohne zusätzliche Kompensation

Die Ergebnisse für F-Modelle (Tab. 6.10) ähneln denjenigen für CC(0,9) sehr stark, auch wenn sie insgesamt marginal besser sind. Die Lösungen sind total zulässigkeitsrobust im strengen Sinne, d.h. es sind keinerlei Anpassungsmaßnahmen erforderlich, um Pläne zulässig ausführen zu können. Die Pläne sind dadurch jedoch so gestaltet, daß sie kaum Vorteile aus der Möglichkeit szenarioabhängiger Kompensationsmaßnahmen ziehen können.

Als Fazit läßt sich zusammenfassen, daß simultane CC-Modelle (zumindest in der gewählten Ausprägung) und F-Modelle nur sehr eingeschränkt zur Ermittlung robuster Pläne geeignet sind.

F-	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
EW	211,15	186,34	216,73	104,29	148,34	48,58	26,9%	35,7%	14,8%
MX	210,23	182,36	215,27	105,22	148,31	48,84	27,3%	36,7%	16,1%
MM	209,35	186,42	212,26	106,09	147,25	51,76	28,0%	35,4%	16,8%
HU	210,37	183,84	213,74	105,06	149,62	50,85	26,8%	37,6%	16,3%
HL	211,25	186,21	215,37	104,19	147,42	48,47	26,2%	35,3%	16,8%
AR	210,23	185,63	215,83	105,20	147,42	49,74	26,5%	35,6%	16,9%
RR	211,19	183,65	215,17	104,25	146,57	50,19	26,5%	37,5%	15,5%
RE	212,85	185,38	216,78	102,59	148,27	49,74	26,2%	35,4%	15,6%
FR(0,7)	209,94	184,74	213,77	108,50	148,96	51,87	27,9%	35,9%	16,8%
FR(0,8)	209,73	184,74	213,66	105,71	148,95	51,86	27,9%	35,9%	16,8%
FR(0,9)	209,85	184,72	213,63	105,59	148,95	51,86	28,0%	36,0%	16,9%
Best	212,85	186,42	216,78	102,59	146,57	48,47	26,2%	35,3%	14,8%
Opt	264,25	231,09	363,41	51,19	73,38	0,42	14,8%	20,3%	0,1%

Tab. 6.10: Basismaße der F-Modelle ohne zusätzliche Kompensation

6.2.2 Weitere Maße für ausgewählte Modelle

Im folgenden konzentrieren wir uns auf insgesamt 16 besonders geeignete oder wichtige Modelle jedes Grundtyps. Die jeweiligen Ergebnismwerte werden in Tab. 6.11 im Überblick zusammengestellt.

	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
K-EW	264,25	142,68	300,77	51,19	118,10	17,99	15,0%	46,3%	5,3%
K-MM	247,65	231,09	265,40	67,79	108,68	17,30	18,9%	27,3%	6,3%
K-HU	253,40	221,58	291,13	62,04	99,66	21,63	17,4%	26,3%	7,6%
K-HL	254,43	229,05	277,70	61,00	98,83	17,08	17,0%	25,2%	6,1%
K-AR	257,26	179,04	294,57	58,18	73,38	27,24	16,8%	29,6%	8,1%
K-RR	257,10	200,33	286,26	58,34	82,63	26,14	16,6%	20,3%	9,5%
K-RE	263,64	165,93	296,43	51,80	104,25	16,68	14,8%	35,2%	5,3%
KCC(0,9)-EW	260,65	83,58	305,53	54,78	174,11	16,92	16,7%	71,8%	4,8%
KCC(0,9)-RE	260,87	84,59	305,45	54,57	172,89	16,32	16,4%	69,3%	4,9%
CC(0,8)-EW	221,64	168,78	231,55	93,80	142,32	43,50	25,1%	39,7%	14,0%
CC(0,8)-HL	221,69	173,16	230,96	93,75	140,04	43,08	25,1%	38,2%	13,9%
CC(0,8)-RE	221,64	169,04	231,55	93,80	142,35	43,27	25,1%	39,4%	13,9%
D-EW	101,46	-301,64	296,51	213,98	560,63	52,35	59,1%	214,9%	11,1%
D-W	153,66	-3,97	234,66	161,78	308,01	64,41	43,6%	111,2%	18,1%
D-Q(0,8)	203,49	45,80	279,01	111,95	230,43	45,27	30,8%	78,5%	11,8%
D-Q(0,9)	197,88	88,42	254,42	117,56	204,35	55,86	32,3%	63,3%	15,8%
Best	264,25	231,09	305,53	51,19	73,38	16,32	14,8%	20,3%	4,8%
Opt	264,25	231,09	363,41	51,19	73,38	0,42	14,8%	20,3%	0,1%

Tab. 6.11: Wichtigste Modelle: Basismaße ohne zusätzliche Kompensation

Zusammenfassung: Es zeigt sich, daß die K-Modelle allen anderen Modellen zum Teil deutlich überlegen sind. Dies gilt v.a. für die D-Modelle, bei denen die relativen und absoluten Regrete in den meisten Fällen weit mehr als doppelt so groß sind. Zwischen den ausgewählten K-Modellen ist eine Rangfolge nur mit Hilfe einer übergeordneten Präferenzfunktion aufstellbar. Die KCC-Modelle weisen deutliche Schwächen bezüglich der Worst Case-Ergebnisse und der Ergebnisstabilität auf, während die CC-Modelle bei hoher Ergebnisstabilität auf einem zu geringen Gewinniveau verharren.³⁶

Quantile: Um die Ergebnisverteilungen genauer beurteilen zu können, geben wir im folgenden das 5%-, 50% - und das 95% -Quantil für die Gewinne (SZ, MZ, BZ) und

die relativen Regrete (ST, MT, BT) an. Die Randquantile eliminieren extreme, ggf. verfälschende Ausreißer und die Mediane erlauben weitere Aussagen über die Verteilungsschiefe. V.a. die Quantile SQZ und SQT sind zur Beurteilung der Ergebnis- und Optimalitätsrobustheit von Plänen von großer Bedeutung (95% ist ein typisches Sicherheitsniveau). Tab. 6.12 zeigt die genannten Maße für die ausgewählten Modelle.

	MZ	SQZ	BOZ	MT	SQT	BQT	VW
K-EW	274,90	189,63	298,77	13,5%	29,5%	6,5%	0,38%
K-MM	248,27	231,13	263,64	19,7%	26,3%	9,0%	0,00%
K-HU	254,40	221,63	285,16	17,7%	24,9%	9,2%	0,00%
K-HL	256,49	229,17	275,50	17,5%	24,1%	8,2%	0,00%
K-AR	264,41	198,29	292,07	16,4%	25,3%	9,7%	0,21%
K-RR	262,17	213,33	284,14	17,2%	20,3%	9,9%	0,00%
K-RE	272,10	202,27	294,42	14,0%	25,6%	6,6%	0,08%
KCC(0,9)-EW	277,51	140,72	303,36	12,6%	47,9%	6,1%	1,04%
KCC(0,9)-RE	276,49	145,41	303,05	12,8%	44,8%	6,1%	1,00%
CC(0,8)-EW	227,49	185,26	231,33	25,2%	34,9%	15,6%	1,88%
CC(0,8)-HL	226,97	188,73	230,76	25,3%	34,2%	15,6%	1,92%
CC(0,8)-RE	227,47	185,25	231,33	25,3%	35,0%	15,6%	1,92%
D-EW	150,97	-224,22	254,96	42,4%	161,3%	13,4%	13,96%
D-W	167,40	22,46	224,67	39,0%	77,7%	21,6%	4,67%
D-Q(0,8)	223,45	84,07	264,40	26,5%	62,4%	13,9%	3,54%
D-Q(0,9)	209,27	118,36	244,02	29,8%	53,5%	18,2%	3,13%
Best	277,51	231,13	303,36	12,6%	20,3%	6,1%	0,00%

Tab. 6.12: Quantile und Verlustwahrscheinlichkeit ohne zus. Komp.

Die CC- und KCC-Modelle (mit dem jeweils besten Wert für α) erscheinen nunmehr in einem günstigeren Licht. Aufgrund der Rechtssteilheit ihrer Verteilungen ist der Median MZ deutlich höher als der Erwartungswert EZ, während dies bei den K-Modellen nur eingeschränkt der Fall ist. Das gleiche gilt für SQZ im Vergleich zu SZ. Ein noch deutlicheres Bild ergibt sich in bezug auf die relativen Regrete (MT, ST). Dennoch sind aus Sicht der robusten Planung nach wie vor die K-Modelle als günstiger einzuschätzen.

Desweiteren zeigt sich eine Relativierung des schwachen Worst Case-Verhaltens von K-EW und K-RE. Auch wenn die extremen Ausschläge der D-Modelle gemindert sind, bleiben sie nach wie vor bei weitem die schlechteste Wahl.

Verlustwahrscheinlichkeit: Die letzte Spalte von Tab. 6.12 gibt die über alle Instanzen gemittelte Verlustwahrscheinlichkeit VW an. Es zeigt sich, daß bei D-Modellen ein signifikantes Verlustrisiko besteht. Dies gilt v.a. für das in Praxis und Theorie für viele Probleme verwendete Ersatzwertmodell D-EW. Die anderen Modelle weisen kein oder ein geringes Verlustrisiko auf. V.a. die auf dem Mini-Max- bzw. Maxi-Min-Kriterium basierenden risikoscheuen Regeln (MM, HU, HL, RR) sind besonders empfehlenswert.

Ex post-Evaluation: Zur Simulation einer Ex post-Beurteilung wird für jede Instanz ein Szenario α aus der Menge der Szenarien proportional zu den Eintrittswahrscheinlichkeiten ausgewählt.

³⁶ Die Chance-Constrained Modelle sind in dieser Auswertung (ohne zusätzliche Kompensationsmöglichkeit) naturgemäß im Nachteil. Dieser Nachteil wird bei der Möglichkeit zusätzlicher Kompensationsmaßnahmen aufgehoben.

scheinlichkeiten zufällig ausgewählt und als real eintretendes angesehen (vgl. Kap. 5.2.3.4).

	OZ	OT	OT _{max}	OT _{max}
K-EW	269,99	14,35%	72,41%	39,21%
K-MM	248,68	19,07%	76,23%	44,89%
K-HU	256,21	17,48%	79,68%	48,64%
K-HL	256,39	16,99%	66,28%	41,11%
K-AR	264,37	16,97%	108,82%	40,14%
K-RR	261,10	16,57%	64,58%	42,05%
K-RE	266,71	14,42%	56,99%	42,34%
KCC(0,9)-EW	268,45	15,78%	157,74%	51,95%
KCC(0,9)-RE	268,60	15,40%	143,76%	46,94%
CC(0,8)-EW	224,99	25,60%	140,20%	62,90%
CC(0,8)-HL	225,22	24,97%	139,73%	59,26%
CC(0,8)-RE	225,04	25,57%	140,20%	62,90%
D-EW	156,68	62,26%	849,25%	293,45%
D-W	178,39	45,00%	746,87%	117,58%
D-Q(0,8)	221,78	31,24%	468,70%	93,43%
D-Q(0,9)	208,00	31,26%	435,21%	77,04%
Best	269,99	14,35%	56,99%	39,21%

Tab. 6.13: Ex post-Maße ohne zus. Komp.

Tab. 6.13 enthält die Maße OZ (Gewinn für Szenario o) und OT (relativer Regret für Szenario o). Es zeigt sich, daß die Modelle ähnlich einzuschätzen sind wie in bezug auf die Erwartungswerte EZ und ET. Dies rührt aus dem Gesetz der großen Zahlen her, da die angegebenen Werte über alle 110 Instanzen des Datensatzes gemittelt sind. Um das Worst Case-Verhalten der Modelle einzuschätzen zu können, geben wir daher zusätzlich den größten relativen Regret OT_{max} an, den ein Modell für eine der 110 Instanzen verursacht hat. Es zeigt sich, daß v.a. die D-Modelle in Einzelfällen extreme Ausreißer verursachen. Ignoriert man für jedes Modell die 5 (ca. 5%) ungünstigsten Instanzen, so erhält man die gestutzten größten relativen Regrete OT_{gmax}. Auch wenn die extremen Ausreißer nun eliminiert sind, so zeigt sich dennoch, daß die D-Modelle keinesfalls als optimalitätsrobust einzuschätzen sind, wohingegen die KCC- und CC-Modelle nun besser abschneiden.

6.2.3 Direkter Vergleich der Modelle

Im folgenden betrachten wir Maße, die einen unmittelbaren Vergleich der Modelle erlauben.

Relative Abweichungen: In Tab. 6.14 werden die relativen Abweichungen Δw vom jeweils optimalen Wert w^* für wichtige Maße angegeben. Die Werte w^* finden sich in den letzten Zeilen von Tab. 6.11 bis 6.13.³⁷ Die geringsten erreichten relativen Abweichungen vom jeweiligen Optimum befinden sich in der letzten Zeile von Tab. 6.14. Die relativen Abweichungen werden für jede Instanz einzeln berechnet und dann über alle Instanzen gemittelt.

Der Vergleich der relativen Abweichungen bestätigt im wesentlichen die bisherigen Einschätzungen der Modelle. In der Spalte \emptyset geben wir den Durchschnitt der relativen Abweichungen für alle in Tab. 6.14 aufgeführten und für die robuste Planung als besonders relevant erachteten Maße an. Es handelt sich um eine *Meta-Präferenzfunktion* (d.h. eine Präferenzfunktion zur Verknüpfung von Beurteilungsmaßen), bei der wir unterstellen, daß dem Entscheidungsträger alle diese Maße gleich wichtig sind. Unter dieser Annahme zeigt sich insbesondere K-RR als robust, da für alle

³⁷ Bei den in Tab. 6.12 angegebenen Maßen sind teilweise die optimalen Werte nicht bekannt, da kein Modell zur expliziten Optimierung des Maßes vorhanden ist. In diesen Fällen wird der beste bekannte Wert verwendet.

	EZ	SZ	ER	SR	ET	ST	MZ	SOZ	OZ	\emptyset
K-EW	0,00	41,50	0,00	58,62	0,20	33,34	2,72	19,93	7,47	18,20
K-MM	6,13	0,00	37,77	51,64	13,82	15,63	11,58	1,89	13,44	16,88
K-HU	3,98	4,10	22,69	36,38	8,06	11,90	9,44	5,77	11,55	12,65
K-HL	3,62	0,92	21,46	35,35	7,56	10,63	8,85	2,72	11,09	11,36
K-AR	2,51	24,29	15,02	0,00	5,67	9,18	6,17	16,06	9,31	9,80
K-RR	2,66	13,47	15,67	9,56	5,62	0,00	7,02	9,21	10,06	8,14
K-RE	0,25	28,31	0,50	44,72	0,00	24,71	3,68	13,94	8,22	13,81
KCC(0,9)-EW	1,31	70,68	5,87	130,16	3,35	68,47	1,60	42,35	8,20	36,89
KCC(0,9)-RE	1,09	68,37	5,46	126,04	2,83	64,98	1,94	39,35	8,16	35,36
CC(0,8)-EW	14,16	28,15	71,13	91,68	24,00	37,62	16,90	20,64	18,99	35,92
CC(0,8)-HL	14,15	26,00	71,73	85,40	24,57	31,09	17,13	19,01	18,93	34,22
CC(0,8)-RE	14,16	27,80	71,21	92,17	24,03	37,50	16,91	20,67	18,97	35,94
D-EW	54,12	242,42	207,36	490,52	229,83	701,79	37,25	189,20	407,9	243,70
D-W	38,34	111,55	154,49	188,50	157,14	260,61	35,15	83,45	33,86	118,12
D-Q(0,8)	19,92	77,25	97,27	166,43	133,50	417,14	18,13	58,45	22,28	112,26
D-Q(0,9)	22,22	59,41	113,73	142,58	128,85	352,52	22,74	45,12	26,19	101,48
Best	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	1,89	7,47	8,14

Tab. 6.14: Relative Abweichungen (in %) ohne zusätzliche Kompensation

Maße nur eine geringe relative Abweichung vom jeweils besten Wert (max. 16%) auftritt. Mit Abstrichen sind in dieser Reihenfolge K-AR, K-HL, K-HU, K-RE und K-MM zu nennen. K-EW weist hingegen v.a. bei den Worst Case-Maßen recht hohe Abweichungen auf. Ist von einer anderen Meta-Präferenzfunktion auszugehen, so können sich andere Rangfolgen innerhalb der Gruppe der K-Modelle ergeben.

Die übrigen Modelle verursachen sehr viel höhere durchschnittliche Abweichungen. Im Fall von KCC kommt diese durch das sehr schlechte Worst Case-Verhalten, bei CC durch ungünstige Werte in bezug auf die Regretmaße zustande. Letzteres gilt auch für die D-Modelle, die zudem hohe Abweichungen bei den Zentralmaßen aufweisen. Insbesondere zeigt sich wieder das völlig inakzeptable Ergebnisverhalten von D-EW.

Rangmaße: Ein weiterer direkter Vergleich der 16 ausgewählten Modelle wird mit Hilfe von Ranglisten für verschiedene Maße durchgeführt. Die Ränge ergeben sich dabei durch Einordnung des gemessenen Wertes in eine geordnete Rangliste. Der Rang wird für jede Instanz ermittelt und schließlich über alle Instanzen gemittelt. Haben mehrere Modelle denselben Wert, wird der Rang unter diesen gemittelt. Daher ist z.B. R(EZ) für das Modell K-EW 1,02 und nicht 1.

	R(EZ)	RSZ)	R(ET)	R(ST)	R(OZ)	R(OT)	\emptyset
K-EW	1,02	9,42	2,06	6,98	4,51	4,51	4,75
K-MM	9,67	1,04	9,32	6,30	9,63	9,63	7,60
K-HU	7,42	3,15	7,03	4,90	8,05	8,05	6,43
K-HL	6,95	2,04	6,31	4,12	7,60	7,60	5,77
K-AR	5,87	7,46	5,85	3,90	6,48	6,48	6,01
K-RR	5,85	5,46	5,66	2,02	6,72	6,72	5,41
K-RE	2,03	7,90	1,02	5,29	5,09	5,09	4,40
KCC(0,9)-EW	4,34	12,72	5,13	11,05	4,42	4,42	7,01
KCC(0,9)-RE	3,56	12,04	4,17	10,32	4,55	4,55	6,53
CC(0,8)-EW	11,53	8,11	11,41	9,26	10,75	10,75	10,30
CC(0,8)-HL	11,86	7,15	11,62	9,31	11,12	11,12	10,36
CC(0,8)-RE	11,65	8,20	11,55	9,26	10,77	10,77	10,37
D-EW	15,20	15,66	15,35	15,65	11,46	11,46	14,13
D-ES(1,1)	12,72	14,29	13,15	14,29	10,25	10,25	12,49
D-Q(0,8)	12,45	11,47	12,65	11,81	11,53	11,53	11,91
D-Q(0,9)	13,87	9,88	13,72	11,54	13,07	13,07	12,53
Best	1,02	1,04	1,02	2,02	4,42	4,42	4,40

Tab. 6.15: Ränge für wichtige Maße ohne zus. Komp.

Die Ergebnisse bestätigen die vorhergehenden Erkenntnisse, so daß wir auf weitergehende Erläuterungen verzichten. Es sei jedoch auf die in der letzten Spalte angegebenen Durchschnittsränge $\bar{O}R$ hingewiesen, die (im Gegensatz zur Betrachtung relativer Abweichungen) die erwartungswertbasierten K-Modelle vorteilhafter erscheinen lassen als K-RR und K-AR sowie K-HL.

Dominanzkriterien: Tab. 6.16 bis 6.18 vergleichen die Modelle anhand der in Kap. 5.2.3.5 definierten Dominanzkriterien. Die Modelle werden für jede Instanz miteinander verglichen. Die Einträge in den nachfolgenden Tabellen geben an, in wieviel Prozent der 110 Instanzen ein Modell A (als Zeileneintrag geschrieben) ein anderes Modell B (als Spalteneintrag geschrieben) dominiert. Spalten, die nur mit Nullen gefüllt sind, wurden zur Erhöhung der Übersichtlichkeit aus den Tabellen entfernt. Dabei ist zu beachten, daß nur die ausgewählten 16 Modelle untersucht wurden. Es ist zu erwarten, daß die nicht betrachteten Modelle zum Teil noch deutlich schlechter abschneiden würden.

Die **Wahrscheinlichkeitsdominanz** stellt das schwächste Dominanzkriterium dar. Dies bedeutet, daß ein Modell, das hier niemals dominiert wird, auch bei den beiden folgenden stärkeren Kriterien nicht dominiert werden kann. Dominiert ein Modell A ein anderes Modell B in großem Umfang, so kann B als wenig empfehlenswert angesehen werden.

	K-MM	K-AR	CC(0,8)-			D-EW	D-ES	D-Q
			EW	HL	RE	(1,1)	(0,8)	(0,9)
K-EW	0,0	0,9	22,7	15,5	23,6	25,5	32,7	47,3
K-MM	0,0	0,0	44,5	45,5	44,5	9,1	10,0	20,0
K-HU	2,7	0,0	38,2	35,5	39,1	20,9	19,1	39,1
K-HL	5,5	0,0	57,3	56,4	57,3	15,5	16,4	36,4
K-AR	0,0	0,0	24,5	22,7	24,5	20,0	25,5	45,5
K-RR	0,0	0,0	38,2	36,4	37,3	20,0	19,1	40,9
K-RE	0,0	0,9	25,5	22,7	27,3	24,5	30,9	51,8
KCC(0,9)-EW	0,0	0,0	8,2	6,4	9,1	31,8	31,8	28,2
KCC(0,9)-RE	0,0	0,9	9,1	6,4	10,0	31,8	32,7	30,0
CC(0,8)-EW	0,0	0,0	7,3	15,5	4,5	4,5	2,7	2,7
CC(0,8)-HL	0,0	0,0	4,5	0,0	3,6	4,5	2,7	1,8
CC(0,8)-RE	0,0	0,0	9,1	6,4	0,0	4,5	2,7	2,7
D-EW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6
D-ES(1,1)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	0,0	7,3
D-Q(0,8)	0,0	0,0	5,5	4,5	5,5	6,4	4,5	0,0
D-Q(0,9)	0,0	0,0	1,8	1,8	1,8	4,5	4,5	0,0

Tab. 6.16: Wahrscheinlichkeitsdominanz ohne zusätzl. Kompensation (in %)

Wird ein Modell hingegen niemals dominiert, ist dies nicht unbedingt ein Anzeichen dafür, daß es im Sinne der robusten Planung empfehlenswert ist. So kann K-MX nie bzw. nur in seltenen Einzelfällen dominiert werden, wenn ein anderes Modell denselben Best Case-Gewinn BZ erzielt. Es reicht also ein Spitzenwert in einem entscheidungsirrelevanten Szenario aus, um die Dominanz zu verhindern.

Alle K-Modelle mit Ausnahme von K-MM und K-AR werden in keinem Fall dominiert. Beim Vergleich von K-Modellen mit D-Modellen ergeben sich hingegen hohe Dominanzquoten.

	K-MM		CC(0,8)-			D-EW	D-ES	D-Q
	EW	HL	RE	HL	RE	(1,1)	(0,8)	(0,9)
K-EW	0,0	8,2	7,3	8,2	16,4	10,9	23,6	24,5
K-MM	0,0	30,9	31,8	31,8	6,4	5,5	8,2	36,4
K-HU	2,7	19,1	20,0	19,1	12,7	6,4	16,4	36,4
K-HL	5,5	29,1	31,8	30,0	12,7	9,1	16,4	47,3
K-AR	0,0	10,9	12,7	10,0	11,8	10,9	14,5	29,1
K-RR	0,0	20,0	20,9	20,0	11,8	10,0	13,6	38,2
K-RE	0,0	11,8	11,8	10,9	15,5	10,9	24,5	32,7
KCC(0,9)-EW	0,0	4,5	3,6	4,5	18,2	13,6	11,8	11,8
KCC(0,9)-RE	0,0	4,5	4,5	4,5	20,0	13,6	14,5	12,7
CC(0,8)-EW	0,0	0,0	6,4	15,5	3,6	1,8	1,8	6,4
CC(0,8)-HL	0,0	2,7	0,0	2,7	3,6	1,8	1,8	7,3
CC(0,8)-RE	0,0	8,2	6,4	0,0	3,6	1,8	1,8	5,5
D-EW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,9
D-ES(1,1)	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	2,7	3,6
D-Q(0,8)	0,0	0,9	0,9	0,9	3,6	3,6	0,0	7,3
D-Q(0,9)	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	1,8	0,0	0,0

Tab. 6.17: Zustandsdominanz ohne zusätzliche Kompensation (in %)

Die **Zustandsdominanz** stellt ein stärkeres Kriterium dar. Dominiert hierbei ein Modell A ein Modell B, so erzielt A für jedes Szenario mindestens einen ebenso hohen Gewinn wie B. Daher gilt diese Dominanzbeziehung gleichfalls für die Wahrscheinlichkeitsdominanz. Wird ein Modell B von einem anderen mit hoher Quote zustandsdominiert, so liegt es nahe, Modell B als ungeeignet anzusehen.

Tab. 6.17 zeigt die Dominanzquoten für die ausgewählten Modelle. Die K-Modelle dominieren weiterhin deutlich die D-Modelle. So dominiert z.B. K-RE jedes D-Modell für mindestens 10% der Instanzen.

Die **absolute Dominanz** stellt das stärkste Kriterium dar (vgl. Tab. 6.18). Entsprechend seltener kommen solche Dominanzen vor. Wird ein Modell B absolut dominiert, so bedeutet dies, daß B

	CC(0,8)-		D-EW	D-ES	D-Q
	EW	HL	RE	(1,1)	(0,8)
K-EW	2,7	2,7	2,7	2,7	0,0
K-MM	20,9	22,7	20,9	3,6	2,7
K-HU	12,7	13,6	12,7	3,6	2,7
K-HL	19,1	20,9	19,1	3,6	2,7
K-AR	2,7	2,7	2,7	3,6	1,8
K-RR	4,5	4,5	4,5	3,6	1,8
K-RE	5,5	5,5	5,5	3,6	1,8
KCC(0,9)-EW	0,0	0,0	0,0	2,7	0,9
KCC(0,9)-RE	0,0	0,0	0,0	2,7	0,9
CC(0,8)-EW	0,0	0,0	0,0	3,6	1,8
CC(0,8)-HL	0,0	0,0	0,0	3,6	1,8
CC(0,8)-RE	0,0	0,0	0,0	3,6	1,8
D-EW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
D-ES(1,1)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
D-Q(0,8)	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0
D-Q(0,9)	0,0	0,0	0,0	1,8	0,9

Tab. 6.18: Absolute Dominanz ohne zus. Komp. (in %)

im günstigsten Fall (BZ) nicht besser als das dominierende Modell ist, selbst wenn man für dieses den ungünstigsten Fall (SZ) unterstellt.

Modelle, die mit hoher Quote absolut dominiert werden, sind völlig inakzeptabel. Dies gilt vor allem für die CC(0,8)-Modelle. Da diese zwar relativ ergebnisstabil, aber mitschlechten ergebnisrobust sind, werden sie vor allem von K-MM absolut dominiert.

6.2.4 Fazit

Die Ergebnisse der bisherigen Analysen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- K-Modelle sind extrem empfehlenswert, wenn die bei der Planausführung verfügbaren Handlungsmöglichkeiten zur Anpassung von Plänen an die Umweltentwicklung ex ante bekannt sind. Sie erzielen als einziger Modelltyp im Test, gepaart mit geeigneten Zielkriterien, Ergebnisse, die sich als ergebnis- und optimalitätsrobust charakterisieren lassen.
- KCC-Modelle können bei hoher Zulässigkeitswahrscheinlichkeit und den Er-satzziel-funktionen EW und RE ähnlich gute Ergebnisse erzielen wie K-Modelle, andere Kriterien sind jedoch inkompatibel zu diesem Modelltyp.
- CC-Modelle sind völlig ungeeignet für das betrachtete Problem, da sie sehr starre Pläne ermitteln, die zwar relativ ergebnisstabil, aber in keiner Weise er-gebnis- und optimalitätsrobust sind. Gleiches gilt für F-Modelle.
- D-Modelle weisen insbesondere ein schlechtes Worst Case-Verhalten mit extre-men Ergebnisausschlägen und teilweise hohen Verlustrisiken auf. Die Einschät-zung verbessert sich bei Einbeziehung geeigneter Sicherheitszuschläge auf die Vorgangsdauern. Jedoch sind D-Modelle in bezug auf die Planungsgüte bei voll-kommener Kenntnis der Kompensationsmaßnahmen den K-Modellen deutlich un-terlegen.

6.3 Unvollständige Information über Handlungsmöglichkeiten

Wir wiederholen sämtliche Untersuchungen und Analysen von Kap. 6.2, beziehen nun allerdings die Möglichkeit **zusätzlicher Kompensationsmaßnahmen** bei der Planausführung mit ein, die keines der Modelle bei der Planung berücksichtigt, da sie noch unbekannt oder als Bestandteil von Plänen unerwünscht sind (*Handlungs-unsicherheit*).

Somit erfolgt die Auswertung anhand des Modells M19 (vgl. Kap. 5.2.2.2). Auch wenn die für die (unerwünschten) Zusatzmaßnahmen festgelegten Kostensätze auf den ersten Blick sehr hoch erscheinen, zeigt sich anhand der im folgenden darge-stellten Ergebnisse, daß sie im Hinblick auf die Vermeidung ihrer Anwendung of-fensichtlich noch zu niedrig sind. Dies ist jedoch beabsichtigt, da die vorliegende Auswertung gerade zeigen soll, welche Ergebnisse die verschiedenen Modelle er-zielen, wenn bei der Planung nicht alle ggf. günstigen Maßnahmen der Ausführung einbezogen werden können (aus welchen Gründen auch immer). Dies ist insbeson-dere für die K-Modelle ein Test dahingehend, ob sich eine Detailplanung von Even-tualmaßnahmen auch dann lohnt, wenn diese nicht vollständig bekannt sind. Somit läßt sich überprüfen, ob die K-Modelle in den vorhergehenden Untersuchungen nur deshalb so gute Ergebnisse erzielen, weil sie von vollkommener Voraussicht bezüg-lich der Planausführung ausgehen. Durch die Bereitstellung zusätzlicher, wenn auch unerwünschter bzw. unsicherer Zusatzmaßnahmen wird dieser strikte Untersu-chungsrahmen ausgeweitet, wodurch die anderen Modelltypen eine größere Bedeu-tung erlangen könnten.

6.3.1 Beurteilung aller Modelle anhand von Basismaßen

Wie in Kap. 6.2.1 analysieren wir alle Modelle anhand der Basismaße für die Ver-teilungen des Gewinns sowie des absoluten und relativen Regrets.

Die szenariooptimalen Werte z_k^* werden wie zuvor mit Hilfe des Grundmodells M1 ohne zusätzliche Kompensation ermittelt, da bei der Planung die zusätzlichen Maß-nahmen unerwünscht sind. Dies bedeutet aber, daß ein Plan, der anhand des Modells M19 mit zusätzlicher Kompensation ausgewertet wurde, u.U. einen Zielfunktions-wert z_k aufweisen kann, der größer als das zugehörige z_k^* ist. In diesem Fall, der aber nur bei günstigen Szenarien auftritt, also nur Best Case-Maße betrifft, können sich geringfügige negative (absolute und relative) Regrete ergeben.³⁸

Um im Sinne der *Zulässigkeitsrobustheit* die zur Erzielung eines hohen Gewinns notwendige Inanspruchnahme der zusätzlichen Kompensationsmaßnahmen ein-schätzen zu können, gibt die neu hinzugefügte letzte Spalte UW jeder Tabelle die Wahrscheinlichkeit (Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten betroffener Szena-rien) an, mit der diese genutzt werden.

6.3.1.1 Deterministische Ersatzwertmodelle

Tab. 6.19 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der D-Modelle. Aufgrund der zusätzlichen Kompensationsmöglichkeiten sind die erzielbaren Werte wesentlich höher als ohne diese Maßnahmen (vgl. Tab. 6.2). Augenfällig wird dies vor allem bei den Worst Case-Werten SZ, SR und ST.

	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT	UW
D-EW	250,52	124,08	322,37	64,92	147,09	19,17	20,0%	51,8%	5,9%	69%
D-B	121,90	-92,25	271,17	193,54	360,16	79,55	61,8%	134,9%	22,3%	94%
D-W	218,10	169,09	248,58	97,34	145,50	44,92	28,9%	42,3%	15,3%	26%
D-ES(1,1)	251,76	141,65	312,82	63,67	134,18	20,56	18,9%	44,5%	6,2%	58%
D-ES(1,2)	249,30	155,73	301,00	66,14	126,91	23,01	19,4%	40,0%	7,2%	48%
D-ES(0,7)	244,47	164,45	287,62	70,97	127,14	26,38	20,9%	38,4%	8,6%	40%
D-Q(0,8)	240,31	169,98	282,58	75,13	123,41	30,83	21,9%	37,5%	10,1%	49%
D-Q(0,9)	223,83	170,14	257,91	91,61	136,66	44,01	26,3%	39,6%	14,4%	38%
Best	251,76	170,14	322,37	63,67	123,41	19,17	18,9%	37,5%	5,9%	26%
Opt	275,27	233,64	363,41	40,17	73,34	-2,73	11,4%	19,8%	-0,9%	1%

Tab. 6.19: Basismaße der D-Modelle mit zusätzlicher Kompensation

Die deutliche Verbesserung ist darauf zurückzuführen, daß die zusätzlichen Maß-nahmen (verstärkte Beschleunigung, Ausweitung des Budgets) geeignet sind, einen Plan, der auch bei maximaler normaler Beschleunigung bzw. völliger Ausschöp-fung des Budgets stets in Verzug wäre, im vorgesehenen Zeitrahmen auszuführen. Die Kosten dafür sind zwar relativ hoch, tragen allerdings zur Ersparnis von sich (entlang der kritischen Wege) aufschaukelnden, noch höheren Verzugskosten bei.

Es zeigt sich, daß die Zusatzmaßnahmen v.a. von den Modellen genutzt werden, die bei der Planung für die Vorgangsdauern zu geringe Werte annehmen (D-B, D-EW)

³⁸ Wenn man stattdessen die szenariooptimalen Werte unter Einbeziehung von Kompensa-tionsmaßnahmen ermittelt, ergeben sich nur marginale Änderungen.

und so für viele Szenarien extreme Verspätungen in Kauf nehmen müßten. So benötigt z.B. D-EW mit einer Wahrscheinlichkeit von $UW = 69\%$ derartige Anpassungen, für D-B gilt gar $UW = 94\%$. Selbst im Falle von D-W, wo sich der größte zeitliche Puffer ergibt, sind zusätzliche Maßnahmen mit $UW = 26\%$ lohnend.

6.3.1.2 Kompensationsmodelle

In Tab. 6.20 sind die Basiswerte für alle K-Modelle zusammengetragen. Die mit ihnen erzeugten Pläne erzielen durch die zusätzlichen Maßnahmen eine Gewinnerhöhung von jeweils ca. 1-5% (vgl. Tab. 6.3) und verwenden diese mit beachtlicher Häufigkeit UW , die jedoch geringer als bei entsprechenden D-Modellen ist. Eine ungleich deutlichere Verbesserung ergibt sich für das bisher sehr schlechte Modell K-MX. Daran (sowie an den Ergebnissen der D-Modelle) zeigt sich, daß die zusätzlichen Maßnahmen erhebliche Möglichkeiten zum Ausgleich von Planungsfehlern bieten. Dies zeugt von einer sehr optimistischen Einschätzung der Reagibilität des planausführenden Systems und bietet günstige Voraussetzungen für Verfahren, die Planungsinformationen nicht vollständig ausschöpfen.

K-	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT	UW
EW	273.34	219.99	300.83	42.10	78.77	7.96	12.0%	21.4%	2.7%	37%
MX	243.53	92.56	363.41	71.91	176.54	-2.73	24.3%	68.1%	-0.9%	81%
MM	248.94	232.79	265.40	66.50	108.07	13.68	18.6%	27.1%	5.1%	22%
HU	258.54	229.42	291.13	56.90	94.80	10.33	16.0%	24.4%	4.2%	37%
HL	257.06	233.64	277.73	58.38	97.36	9.97	16.3%	24.5%	3.9%	28%
AR	265.98	222.16	294.58	49.46	73.34	14.07	14.2%	19.8%	5.2%	40%
RR	262.01	225.02	286.27	53.42	82.50	14.31	15.1%	20.3%	5.5%	35%
RE	270.42	221.41	296.54	45.02	81.96	8.69	12.6%	21.9%	3.2%	35%
FR(0.7)	272.76	196.58	304.55	42.68	88.31	7.88	12.4%	27.2%	2.3%	44%
FR(0.8)	268.99	205.96	295.61	46.45	88.38	8.81	13.2%	25.0%	2.7%	37%
FR(0.9)	262.07	218.42	284.15	53.37	91.98	11.06	14.9%	24.0%	3.9%	31%
AS(0.7)	233.59	207.61	248.51	81.85	125.66	30.30	23.2%	32.1%	10.8%	16%
AS(0.8)	242.60	218.00	258.16	72.84	115.02	23.05	20.8%	29.6%	8.4%	17%
AS(0.9)	255.95	233.20	273.56	59.49	98.92	13.62	16.9%	25.4%	4.8%	22%
Best	273.34	233.64	363.41	42.10	73.34	-2.73	12.0%	19.8%	-0.9%	16%
Opt	275.27	233.64	363.41	40.17	73.34	-2.73	11.4%	19.8%	-0.9%	1%

Tab. 6.20: Basismasse der Kompensationsmodelle mit zusätzlicher Kompensation

Dennoch schneiden die K-Modelle weiterhin merklich besser als die D-Modelle ab. Am deutlichsten wird dies bei Betrachtung der Regretwerte und insbesondere der Worst-Case-Werte (SR, ST). Allgemein kann man von signifikant höherer Optimalitäts- und Ergebnisrobustheit ausgehen. Die K-Modelle sind bei weitem nicht so stark auf die (zum Planungszeitpunkt ungewisse) tatsächliche Verfügbarkeit der zusätzlichen Kompensationsmaßnahmen angewiesen, so daß ihre Robustheit im Hinblick auf die Handlungsunsicherheit größer ist.

Ein weiterer Effekt ist, daß die Unterschiede zwischen den verschiedenen K-Modellen abnehmen.

6.3.1.3 Kombinierte Chance-Constrained-Kompensations-Modelle

Tab. 6.21 bis 6.23 zeigen die Basismasse für die KCC-Modelle, die die zusätzlichen Kompensationsmaßnahmen ähnlich intensiv wie die D-Modelle nutzen (Spalte UW). Dies nimmt auch mit zunehmender Zulässigkeitswahrscheinlichkeit nur wenig ab.

KCC(0.7)-	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT	UW
EW	264.80	210.12	292.86	50.64	95.02	9.60	14.4%	26.9%	3.6%	42%
MX	314.2	-391.6	72.72	284.01	339.53	236.23	103.5%	141.8%	80.4%	54%
MM	117.80	49.61	153.79	197.64	248.49	153.40	64.7%	94.7%	46.9%	47%
HU	142.53	78.02	175.73	172.91	221.12	129.62	55.0%	82.2%	38.2%	43%
HL	172.52	106.69	205.72	142.92	190.06	101.53	42.6%	67.8%	27.3%	44%
AR	172.67	107.27	206.21	142.77	189.27	101.98	42.6%	67.0%	27.5%	45%
RR	173.11	108.05	205.76	142.33	189.00	101.81	42.3%	67.0%	27.4%	45%
RE	190.47	125.33	222.42	124.97	170.15	86.62	36.7%	59.8%	22.5%	45%
FR(0.7)	189.07	125.94	220.14	126.36	171.10	87.21	37.1%	59.9%	22.7%	44%
FR(0.8)	189.42	126.07	220.56	126.02	170.93	87.08	37.0%	59.9%	22.7%	44%
FR(0.9)	205.21	139.92	236.22	110.22	156.76	71.38	32.6%	54.7%	18.8%	43%
AS(0.7)	262.17	203.02	301.70	53.27	98.46	11.55	16.2%	30.2%	4.3%	65%
AS(0.8)	260.69	208.42	294.77	54.75	98.38	11.29	16.1%	28.8%	4.0%	58%
AS(0.9)	261.86	211.39	289.18	53.57	95.43	9.19	15.4%	27.1%	3.1%	42%
Best	264.80	211.39	301.70	50.64	95.02	9.19	14.4%	26.9%	3.1%	42%
Opt	275.27	233.64	363.41	40.17	73.34	-2.73	11.4%	19.8%	-0.9%	1%

Tab. 6.21: Basismasse der KCC-Modelle bei $\alpha = 0,7$ mit zus. Kompensation

Vor allem in bezug auf die Worst-Case-Maße ergeben sich für $\alpha = 0,7$ bei allen Modellen erhebliche Verbesserungen (vgl. Tab. 6.4). Dennoch sind die meisten Ersatzziel-funktionen aufgrund ihrer mangelnden Kompatibilität zu diesem Modelltyp wiederum als ungeeignet anzusehen; sie schneiden deutlich schlechter als die D-Modelle ab.

Die erste Erhöhung der Zulässigkeitswahrscheinlichkeit auf $\alpha = 0,8$ verändert die Ergebnisse nur wenig.

KCC(0.8)-	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT	UW
EW	264.99	212.65	292.80	50.45	94.31	9.62	14.2%	25.9%	3.5%	41%
MX	91.90	21.13	134.65	223.54	281.37	175.13	72.1%	118.4%	51.8%	55%
MM	137.24	70.29	172.95	178.20	230.26	133.73	54.8%	91.8%	38.2%	45%
HU	148.58	86.84	180.60	166.86	216.92	122.50	49.4%	84.3%	33.6%	42%
HL	176.27	114.89	207.01	139.17	184.75	97.93	38.2%	70.0%	24.0%	40%
AR	176.78	113.51	208.35	138.66	184.69	98.73	38.0%	70.2%	24.3%	41%
RR	177.05	112.50	209.03	138.39	184.93	99.13	38.0%	70.3%	24.5%	41%
RE	194.97	127.74	227.01	120.47	167.35	82.76	32.7%	65.1%	20.1%	43%
FR(0.7)	194.76	129.02	226.27	120.68	166.70	82.75	32.7%	64.8%	20.1%	42%
FR(0.8)	194.65	128.88	226.10	120.78	166.93	82.74	32.8%	64.9%	20.1%	42%
FR(0.9)	210.81	147.41	241.90	104.63	149.13	66.47	28.3%	59.2%	16.1%	42%
AS(0.7)	262.70	208.23	301.29	52.74	93.61	11.35	15.6%	27.8%	4.2%	62%
AS(0.8)	260.64	214.09	293.20	54.80	95.15	11.85	15.9%	26.8%	4.4%	55%
AS(0.9)	261.68	216.91	286.80	53.76	93.49	10.86	15.3%	25.3%	4.2%	38%
Best	264.99	216.91	301.29	50.45	93.49	9.62	14.2%	25.3%	3.5%	41%
Opt	275.27	233.64	363.41	40.17	73.34	-2.73	11.4%	19.8%	-0.9%	1%

Tab. 6.22: Basismasse der KCC-Modelle bei $\alpha = 0,8$ mit zus. Kompensation

Die deutlich besten Ergebnisse sind in Tab. 6.23 für die höchste Zulässigkeitswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,9$ zu erkennen. Die Unterschiede zu den K-Modellen nehmen

ab, jedoch weisen diese das bessere Worst-Case-Verhalten auf, da die ungünstigsten Szenarien bei KCC-Modellen relaxiert und damit "falsch behandelt" werden. Jedoch weisen einige Modelle höhere Erwartungs- und Best Case-Werte als das jeweils zugehörige K-Modell auf, insbesondere KCC-EW und KCC-RE.

KCC(0.9)	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT	UW
EW	274,87	207,32	305,64	40,57	80,11	8,18	11,5%	23,6%	2,5%	42%
MX	-4,07	-86,00	41,16	319,50	380,72	272,18	98,2%	137,8%	74,9%	53%
MM	191,99	142,12	218,48	123,44	165,19	80,24	34,6%	51,4%	20,1%	36%
HU	200,76	153,20	225,66	114,68	155,27	72,01	31,8%	47,3%	17,7%	34%
HL	259,91	209,63	285,48	55,52	94,67	16,14	15,7%	25,8%	5,1%	3%
AR	260,36	205,94	287,50	55,08	93,04	17,61	15,5%	25,7%	5,6%	3%
RR	260,44	206,71	287,55	55,00	92,25	17,74	15,5%	25,2%	5,7%	3%
RE	275,27	210,72	305,65	40,17	79,29	7,54	11,4%	22,8%	2,4%	1%
FR(0.7)	274,68	209,90	304,95	40,76	80,75	7,61	11,6%	23,3%	2,4%	41%
FR(0.8)	274,60	209,90	304,82	40,84	80,74	7,61	11,7%	23,3%	2,4%	41%
FR(0.9)	273,72	210,15	303,53	41,72	82,33	7,78	12,0%	23,6%	2,5%	40%
AS(0.7)	261,85	211,89	299,58	53,59	94,94	11,20	15,8%	27,4%	4,2%	63%
AS(0.8)	259,55	218,17	290,94	55,89	96,68	11,46	16,1%	26,2%	4,3%	53%
AS(0.9)	260,56	221,01	285,23	54,87	94,34	11,26	15,6%	24,8%	4,2%	37%
Best	275,27	221,01	305,65	40,17	79,29	7,54	11,4%	22,8%	2,4%	34%
Opt	275,27	233,64	363,41	40,17	73,34	-2,73	11,4%	19,8%	-0,9%	1%

Tab. 6.23: Basismasse der KCC-Modelle bei $\alpha = 0,9$ mit zus. Kompensation

Beim Aspirations-Kriterium ist das Ergebnis im wesentlichen unabhängig von der Zulässigkeitswahrscheinlichkeit, da die ungünstigeren Szenarien aufgrund der Wahl des Aspirationsniveaus (70%-90% des optimalen Erwartungswertes) in der Zielfunktion kaum Beachtung finden.

6.3.1.4 Simultane Chance-Constrained-Modelle

Die simultanen CC-Modelle können die erweiterten Kompensationsmaßnahmen nur bedingt nutzen, die Werte von UW sind auffällig klein. Lediglich im Hinblick auf die Worst-Case-Werte ergibt sich gegenüber der Auswertung ohne zusätzliche Kompensation (vgl. Kap. 6.2.1.4) eine nennenswerte Verbesserung.

CC(0.7)	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT	UW
EW	165,49	119,50	178,09	149,95	194,40	103,66	33,8%	50,5%	20,1%	13%
MX	192,99	150,82	203,89	122,45	167,10	76,16	29,8%	44,3%	17,4%	12%
MM	227,97	186,60	237,96	87,47	131,43	40,18	23,5%	33,7%	13,1%	10%
HU	221,75	183,63	230,60	93,69	138,67	44,70	24,8%	35,0%	14,0%	8%
HL	232,03	187,79	243,90	83,41	127,57	37,13	22,1%	32,6%	12,0%	12%
AR	231,06	185,55	243,18	84,38	127,88	39,03	22,5%	32,7%	12,7%	13%
RR	229,34	183,99	241,25	86,10	129,38	40,54	22,9%	33,0%	12,9%	12%
RE	231,29	185,37	243,81	84,14	128,28	37,89	22,3%	32,9%	12,0%	13%
FR(0.7)	228,32	185,77	239,24	87,11	130,67	40,54	23,1%	33,1%	12,9%	11%
FR(0.8)	228,31	185,92	238,89	87,13	130,94	40,26	23,2%	33,3%	13,0%	11%
FR(0.9)	228,11	186,91	238,39	87,33	130,87	40,42	23,3%	33,3%	13,2%	10%
Best	232,03	187,79	243,90	83,41	127,57	37,13	22,1%	32,6%	12,0%	8%
Opt	275,27	233,64	363,41	40,17	73,34	-2,73	11,4%	19,8%	-0,9%	1%

Tab. 6.24: Basismasse der CC-Modelle bei $\alpha = 0,7$ mit zus. Kompensation

Die mangelnde Verbesserungsfähigkeit beruht auf der Starrheit der Pläne, die zwar ergebnisstabil und weitgehend zulässigkeitsrobust, aber keinesfalls ergebnis- oder

CC(0.8)	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT	UW
EW	223,04	187,55	231,55	92,40	136,72	42,63	24,5%	34,1%	13,8%	8%
MX	219,18	185,42	226,80	96,24	140,34	45,62	25,6%	34,9%	14,8%	7%
MM	219,88	189,23	226,47	95,56	140,06	44,00	25,7%	34,9%	14,6%	6%
HU	216,11	186,58	222,57	99,33	143,80	47,60	26,4%	35,5%	15,5%	5%
HL	222,88	189,40	230,96	92,55	136,47	42,22	24,6%	33,8%	13,7%	7%
AR	221,85	187,18	229,84	93,59	136,70	44,39	25,0%	33,9%	14,6%	7%
RR	223,09	185,55	229,02	94,44	138,00	44,61	25,1%	34,2%	14,6%	8%
RE	223,04	187,59	231,55	92,40	136,64	42,44	24,5%	34,1%	13,7%	8%
FR(0.7)	220,66	187,20	228,10	94,78	138,86	44,82	25,3%	34,5%	14,6%	7%
FR(0.8)	220,63	188,17	227,74	94,81	138,98	44,16	25,3%	34,5%	14,4%	7%
FR(0.9)	220,46	188,71	227,36	94,98	139,33	43,79	25,5%	34,7%	14,5%	6%
Best	223,04	189,40	231,55	92,40	136,47	42,22	24,5%	33,8%	13,7%	5%
Opt	275,27	233,64	363,41	40,17	73,34	-2,73	11,4%	19,8%	-0,9%	1%

Tab. 6.25: Basismasse der CC-Modelle bei $\alpha = 0,8$ mit zus. Kompensation

CC(0.9)	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT	UW
EW	208,67	186,63	213,76	106,76	152,64	50,37	28,4%	37,4%	16,6%	3%
MX	205,49	183,50	210,30	109,95	155,58	54,04	29,4%	37,9%	18,1%	3%
MM	205,42	187,03	209,39	110,01	156,18	52,00	29,8%	38,6%	17,5%	2%
HU	206,48	186,88	210,82	108,96	154,93	52,11	29,2%	38,0%	17,3%	2%
HL	208,43	188,28	213,26	107,01	152,60	50,27	28,6%	37,3%	16,7%	2%
AR	207,43	185,50	212,14	108,01	152,97	52,47	28,9%	37,4%	17,5%	3%
RR	207,56	185,86	212,30	107,88	152,88	52,34	28,9%	37,3%	17,5%	2%
RE	208,66	186,36	213,76	106,78	152,66	50,37	28,4%	37,4%	16,6%	2%
FR(0.7)	206,89	186,60	211,12	108,55	154,63	52,31	29,2%	37,9%	17,5%	2%
FR(0.8)	206,89	186,79	210,98	108,55	154,73	51,90	29,2%	37,9%	17,4%	2%
FR(0.9)	206,82	187,45	210,88	108,61	154,62	51,67	29,2%	37,9%	17,3%	2%
Best	208,67	188,28	213,76	106,76	152,60	50,27	28,4%	37,3%	16,6%	2%
Opt	275,27	233,64	363,41	40,17	73,34	-2,73	11,4%	19,8%	-0,9%	1%

Tab. 6.26: Basismasse der CC-Modelle bei $\alpha = 0,9$ mit zus. Kompensation

optimalitätsrobust sind. Wie Tab. 6.24 bis 6.26 zeigen, liefert kein Modell Ergebnisse, die mit denen der besseren Modelle anderer Typen konkurrieren könnten.

Wie schon bei Handlungssicherheit erzielen die Modelle mit Aspirations-Kriterium keine sinnvollen Lösungen und sind daher nicht aufgeführt.

F-	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT	UW
F-	213,32	188,24	217,34	102,12	146,63	46,52	26,3%	34,7%	14,6%	2%
MX	211,63	185,74	215,53	103,81	148,32	48,23	26,7%	34,5%	16,0%	1%
MM	210,85	189,12	213,52	104,59	145,47	50,36	27,5%	33,5%	16,5%	1%
HU	211,76	185,38	214,54	103,68	148,82	49,34	26,6%	35,6%	16,3%	2%
HL	213,43	189,16	216,65	102,01	145,11	47,64	25,6%	33,3%	16,7%	2%
AR	212,69	187,84	216,12	102,75	146,26	48,26	25,9%	33,6%	16,8%	3%
RR	212,47	186,27	215,64	102,97	148,08	48,34	26,0%	34,3%	15,3%	1%
RE	213,17	188,23	215,28	102,27	146,27	48,92	25,7%	33,4%	15,3%	2%
FR(0.7)	211,35	187,20	213,74	104,09	147,12	50,49	27,4%	33,8%	16,6%	2%
FR(0.8)	211,34	187,17	213,69	104,10	147,13	50,49	27,3%	33,8%	16,6%	1%
FR(0.9)	211,27	187,71	213,56	104,17	146,12	50,47	27,2%	34,7%	16,5%	1%
Best	213,43	189,16	217,34	102,01	145,11	46,52	25,6%	33,3%	14,6%	1%
Opt	275,27	233,64	363,41	40,17	73,34	-2,73	11,4%	19,8%	-0,9%	1%

Tab. 6.27: Basismasse der F-Modelle mit zus. Kompensation

Schließlich zeigt Tab. 6.27, daß F-Modelle sehr ähnliche Ergebnisse wie CC(0.9) liefern. Es ist zu erkennen, daß die zusätzlichen Kompensationsmaßnahmen prak-

fisch nicht gewinnerhöhend genutzt werden können (vgl. Tab. 6.10). Dies ist grundsätzlich von Vorteil, wenn es sich – wie hier unterstellt – um unerwünschte Maßnahmen handelt. Jedoch ist das Gewinnniveau insgesamt viel zu niedrig, so daß dieser potentielle Vorteil nicht relevant ist.

6.3.2 Weitere Maße für ausgewählte Modelle

Tab. 6.28 faßt nochmals die Werte der besten bzw. wichtigsten Modelle jedes Typs zusammen. Bei den weiteren Analysen werden nur noch diese Modelle betrachtet. Auf CC-Modelle verzichten wir wegen ihrer schwachen Ergebnisse vollständig.

	EZ	SZ	BZ	BR	SR	BR	ET	ST	BT	UW
K-EW	273,34	219,99	300,83	42,10	78,77	7,96	12,0%	21,4%	2,7%	37%
K-MX	243,53	92,56	363,41	71,91	176,54	-2,73	24,3%	68,1%	-0,9%	81%
K-MM	248,94	232,79	265,40	66,50	108,07	13,68	18,6%	27,1%	5,1%	22%
K-HU	258,54	229,42	291,13	56,90	94,80	10,33	16,0%	24,4%	4,2%	37%
K-HL	257,06	233,64	277,73	58,38	97,36	9,97	16,3%	24,5%	3,9%	28%
K-AR	262,91	225,02	294,58	49,46	73,34	14,07	14,2%	19,8%	5,2%	40%
K-RR	265,98	222,16	286,27	53,42	82,50	14,31	15,1%	20,3%	5,5%	35%
K-RE	270,42	221,41	296,54	45,02	81,96	8,69	12,6%	21,9%	3,2%	35%
KCC(0,9)-EW	274,87	207,32	305,64	40,57	80,11	8,18	11,5%	23,6%	2,5%	42%
KCC(0,9)-RE	275,27	210,72	305,65	40,17	79,29	7,54	11,4%	22,8%	2,4%	41%
D-EW	250,52	124,08	322,37	64,92	147,09	19,17	20,0%	51,8%	5,9%	69%
D-ES(1,1)	251,76	141,65	312,82	63,67	134,18	20,56	18,9%	44,5%	6,2%	58%
D-Q(0,8)	240,31	169,98	282,58	75,13	123,41	30,83	21,9%	37,5%	10,1%	49%
D-Q(0,9)	223,83	170,14	257,91	91,61	136,66	44,01	26,3%	39,6%	14,4%	38%
Best	275,27	233,64	363,41	40,17	73,34	-2,73	11,4%	19,8%	-0,9%	22%

Tab. 6.28: Wichtigste Modelle: Basismaße mit zusätzlicher Kompensation

Quantile: In Tab. 6.29 werden die Quantile der Modelle angegeben. Damit soll sichergestellt werden, daß vereinzelte Ausreißer die Maßwerte nicht verzerren. Die K- und KCC-Modelle halten sich hierbei in etwa die Waage mit besserem Worst Case-Verhalten bei ersteren und besserem Durchschnitts- und Best Case-Verhalten bei letzteren. Das Worst Case-Verhalten der D-Modelle ist trotz der Eliminierung von Ausreißern ungenügend.

	MZ	SOZ	BOZ	MT	SQT	BQT	VW
K-EW	277,48	234,78	298,88	11,9%	19,1%	4,3%	0,00%
K-MX	254,19	116,25	338,05	20,3%	59,7%	3,5%	2,38%
K-MM	249,10	233,35	263,64	19,5%	26,2%	8,2%	0,00%
K-HU	258,33	232,44	285,43	16,6%	23,5%	6,8%	0,00%
K-HL	257,96	235,79	275,54	17,0%	23,6%	6,7%	0,00%
K-AR	268,15	230,88	292,20	14,7%	19,2%	7,3%	0,00%
K-RR	264,17	232,36	284,20	15,7%	20,2%	7,7%	0,00%
K-RE	273,96	235,28	294,60	12,7%	19,8%	5,1%	0,00%
KCC(0,9)-EW	280,38	226,27	303,49	11,1%	19,8%	4,6%	0,00%
KCC(0,9)-RE	280,43	229,15	303,24	11,2%	19,3%	4,4%	0,00%
D-EW	263,99	144,61	302,34	16,7%	45,6%	7,3%	1,08%
D-ES(1,1)	264,82	161,44	295,10	16,4%	39,1%	7,7%	1,17%
D-Q(0,8)	247,96	184,43	271,82	21,4%	34,2%	11,9%	0,25%
D-Q(0,9)	228,25	180,76	250,09	26,1%	36,7%	16,4%	0,50%
Best	280,43	235,28	338,05	11,1%	19,1%	3,5%	0,00%

Tab. 6.29: Quantile und Verlustwahrscheinlichkeit mit zus. Kompensation

Verlustwahrscheinlichkeit: Sämtliche sinnvollen K- und KCC-Modelle garantieren Gewinne (Spalte VW von Tab. 6.29). Aber auch die D-Modelle weisen nun nur noch geringe Verlustwahrscheinlichkeiten auf (vgl. Tab. 6.12).

Ex post-Evaluation: Tab. 6.30

zeigt die Zielfunktionswerte OZ sowie relative Regrete OT bei zufälliger Auswahl eines Szenarios. Erkennbar ist v. a. das gute Abschneiden der KCC-Modelle, die gegenüber den zugehörigen K-Modellen geringfügig bessere Werte erzielen. Dies deutet darauf hin, daß ein geringes Maß an erlaubter Unzulässigkeit durchaus vertretbar bzw. vorteilhaft ist. Dies gilt zumindest, wenn die Risikoscheu nicht extrem groß ist.

Die größten bzw. gestützten größten relativen Regrete (OT_{max} und OT_{gmax}) über alle Instanzen zeigen, daß nun auch die D-Modelle weitaus weniger extreme Ausreißer aufweisen als bei fehlender Zusatzkompensation (vgl. Tab. 6.13).

6.3.3 Direkter Vergleich der Modelle

Relative Abweichungen: Tab. 6.31 beschreibt die relativen Abweichungen der Modelle vom besten Wert, den ein Modell für eine Instanz erzielt hat. Die angegebenen Werte sind die Mittelwerte der relativen Abweichungen für alle Instanzen.

	EZ	SZ	ER	SR	ET	ST	MZ	SOZ	OZ	\emptyset
K-EW	2,03	8,19	15,45	24,50	3,58	10,01	4,47	11,04	7,11	9,60
K-MX	14,14	65,36	117,65	205,12	55,89	111,02	55,74	1,29	17,60	71,53
K-MM	9,98	1,94	83,92	68,96	26,87	20,38	4,10	20,49	14,39	27,89
K-HU	6,89	3,57	55,89	47,02	17,53	14,23	4,70	14,72	11,59	19,57
K-HL	7,32	1,74	59,47	50,05	18,38	14,24	3,28	17,21	11,86	20,39
K-AR	4,54	7,26	38,20	12,11	11,87	3,89	5,75	13,01	9,20	11,76
K-RR	5,77	5,82	45,66	23,00	13,93	3,74	4,91	14,99	10,47	14,25
K-RE	2,93	7,39	20,48	27,04	4,93	10,14	3,99	12,02	8,00	10,77
KCC(0,9)-EW	1,31	13,55	10,40	30,27	2,25	17,75	7,96	9,47	6,41	11,04
KCC(0,9)-RE	1,30	12,12	10,03	29,32	2,24	16,66	6,76	9,69	6,49	10,51
D-EW	9,89	46,82	88,90	140,86	95,94	189,37	39,01	11,81	12,68	70,59
D-ES(1,1)	9,07	38,10	76,95	112,55	81,69	147,94	30,95	13,54	11,83	58,07
D-Q(0,8)	13,03	27,14	113,74	105,4	115,32	119,30	22,79	19,23	17,17	61,46
D-Q(0,9)	18,26	26,84	155,95	123,34	156,45	129,63	23,87	24,78	22,30	75,71
Best	1,30	1,74	10,03	12,11	2,24	3,74	3,99	1,29	6,41	9,60

Tab. 6.31: Relative Abweichungen (in %) mit zusätzlicher Kompensation

Im Gegensatz zur Auswertung ohne Zusatzkompensation (vgl. Tab. 6.14) erscheinen nun die erwartungswertbasierten K- und KCC-Modelle günstiger als die regretebasierten K-Modelle. Die D-Modelle schneiden besser ab, weichen bei den Worst Case-Maßen jedoch immer noch enorm von den besten Werten ab.

Ranglisten: Im Vergleich der Modelle mit Hilfe von Ranglisten zeigen sich dieselben Modelle als vorteilhaft wie bei Betrachtung von relativen Abweichungen.

Dominanzen: Tab. 6.33 zeigt die Quoten der *Wahrscheinlichkeitsdominanzen*. Bis auf K-MX wird jedes Modell in einzelnen Instanzen dominiert.

	R(EZ)	R(SZ)	R(ET)	R(ST)	R(OZ)	R(OT)	ØR
K-EW	2,69	5,30	2,63	2,87	4,21	3,21	3,49
K-MX	10,50	12,53	11,04	11,95	8,62	7,62	10,38
K-MM	10,71	1,20	10,53	8,50	9,87	8,87	8,28
K-HU	7,74	2,76	7,60	6,35	7,87	6,87	6,53
K-HL	8,08	1,47	7,96	6,13	7,97	6,97	6,43
K-AR	5,66	5,33	5,66	2,80	6,25	5,25	5,16
K-RR	6,55	4,19	6,51	3,53	6,85	5,85	5,58
K-RE	3,84	4,46	3,69	3,34	4,91	3,91	4,03
KCC(0,9)-EW	1,98	8,66	2,10	3,71	3,65	2,65	3,79
KCC(0,9)-RE	2,34	7,69	2,40	3,45	3,91	2,91	3,78
D-EW	10,53	9,67	10,52	9,05	9,53	8,53	9,64
D-ES(1,1)	12,42	8,99	12,45	10,55	11,24	10,24	10,98
D-Q(0,8)	10,61	9,65	10,62	9,19	9,65	8,65	9,73
D-Q(0,9)	11,36	9,09	11,31	9,60	10,47	9,47	10,22
Best	1,98	1,20	2,10	2,80	3,65	2,65	3,49

Tab. 6.32: Ränge für wichtige Maße mit zus. Komp.

	K-				KCC(0,9)-				D-				
	EW	MM	HU	HL	AR	RR	RE	EW	RE	ES(1,1)	Q(0,8)	Q(0,9)	
K-EW	0,0	14,5	10,9	11,8	13,6	13,6	6,4	2,7	0,9	23,6	30,9	68,2	80,0
K-MX	0,0	2,7	1,8	1,8	2,7	0,9	0,9	0,0	0,0	6,4	8,2	8,2	14,5
K-MM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	4,5	20,9	59,1
K-HU	0,0	15,5	0,0	0,9	0,0	0,9	0,0	0,9	0,0	14,5	13,6	40,0	77,3
K-HL	0,0	28,2	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,9	0,0	8,2	10,9	37,3	76,4
K-AR	0,0	10,9	6,4	6,4	0,0	10,0	0,9	0,9	15,5	19,1	54,5	79,1	
K-RR	0,0	10,0	2,7	4,5	0,9	0,0	0,0	0,9	0,9	12,7	13,6	47,3	80,0
K-RE	0,0	14,5	10,9	13,6	11,8	15,5	0,0	1,8	0,9	21,8	28,2	65,5	81,8
KCC(0,9)-EW	1,8	4,5	4,5	3,6	4,5	4,5	1,8	0,0	1,8	29,1	34,5	71,8	66,4
KCC(0,9)-RE	0,9	8,2	5,5	7,3	8,2	9,1	0,9	1,8	0,0	29,1	32,7	71,8	69,1
D-EW	0,0	0,9	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5	10,0	12,7
D-ES(1,1)	0,0	0,9	0,9	0,9	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	5,5	0,0	18,2	25,5
D-Q(0,8)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	0,9	0,0	30,0
D-Q(0,9)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0

Tab. 6.33: Wahrscheinlichkeitsdominanz bei zusätzlicher Kompensation (in %)

Tab. 6.34 zeigt die Quoten der *Zustandsdominanzen*. Es wird weiterhin jedes Modell mindestens bei einer Instanz dominiert.

	K-				KCC(0,9)-				D-				
	EW	MM	HU	HL	AR	RR	RE	EW	RE	ES(1,1)	Q(0,8)	Q(0,9)	
K-EW	0,0	11,8	3,6	7,3	8,2	9,1	5,5	0,9	0,0	10,0	8,2	44,5	60,9
K-MX	0,0	2,7	0,9	0,9	0,0	0,9	0,9	0,0	0,0	1,8	3,6	5,5	7,3
K-MM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	1,8	7,3	36,4
K-HU	0,0	12,7	0,0	0,9	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	5,5	0,9	20,9	46,4
K-HL	0,0	26,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	3,6	18,2	52,7
K-AR	0,0	6,4	3,6	4,5	0,0	5,5	0,9	0,0	0,0	5,5	3,6	24,5	51,8
K-RR	0,0	7,3	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	4,5	20,9	53,6
K-RE	0,0	11,8	1,8	8,2	2,7	9,1	0,0	0,9	0,0	9,1	7,3	40,0	60,9
KCC(0,9)-EW	0,9	2,7	0,9	1,8	3,6	2,7	1,8	0,0	0,9	12,7	10,0	43,6	50,0
KCC(0,9)-RE	0,9	5,5	1,8	2,7	4,5	5,5	0,9	1,8	0,0	13,6	10,9	43,6	51,8
D-EW	0,0	0,9	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	1,8	6,4
D-ES(1,1)	0,0	0,9	0,9	0,9	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	9,1	11,8
D-Q(0,8)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,7
D-Q(0,9)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. 6.34: Zustandsdominanz bei zusätzlicher Kompensation (in %)

Absolute Dominanzen treten, wie in Tab. 6.35 zu sehen, nur noch vereinzelt auf. Einzig das Modell D-Q(0,9) zeigt Schwächen, die im Vergleich zum Modell D-Q(0,8) daher rühren, daß durch die verstärkte Einhaltung der Nebenbedingungen, d.h. der zu großzügigen Wahl der Vorgangsdauern, die Projektverzugskosten starke Einbußen am Gewinn verursachen.

Im Vergleich zur Auswertung ohne zusätzliche Kompensationsmaßnahmen treten insgesamt sehr viel weniger Fälle von Dominanzen auf.

6.3.4 Fazit

Als Ergebnisse der Untersuchungen bei zusätzlicher Kompensation halten wir fest:

- K-Modelle sind auch dann empfehlenswert, wenn sie nicht sämtliche Möglichkeiten der Anpassung von Plänen explizit berücksichtigen. Sie minimieren die Inanspruchnahme der zusätzlichen, hier als unerwünscht angenommenen Maßnahmen, wie sich an den lediglich geringfügigen Kostenverringerungen (Gewinnerhöhungen) ablesen läßt (auch wenn sich relativ hohe Werte für UW ergeben). Dadurch entsteht weniger Planungsnervosität als bei anderen (v.a. den D-) Modellen.
- KCC-Modelle können bei hoher Zulässigkeitswahrscheinlichkeit und den Er-satzziel-funktionen EW und RE ähnlich gute Ergebnisse erzielen wie K-Modelle, führen jedoch häufiger und umfangreicher zu unerwünschten Maßnahmen, wodurch sich eine höhere Nervosität ergibt. Bei schwach ausgeprägter Risikoscheu sind sie den entsprechenden K-Modellen vorzuziehen.
- CC- und F-Modelle sind völlig ungeeignet für das betrachtete Problem, ob mit oder ohne zusätzliche Kompensationsmöglichkeiten. Die Pläne sind völlig starr und auch bei zusätzlichen Handlungsmöglichkeiten kaum zu verbessern.
- D-Modelle ermitteln bei sinnvoll gewählten Sicherheitszuschlägen auf die verwendeten Vorgangsdauern Pläne, die sich bei ausreichend zur Verfügung stehender Flexibilität des planausführenden Systems akzeptabel gestalten lassen. Jedoch ist die Notwendigkeit der (nachträglichen) Plananpassung durch Kompensationsmaßnahmen erheblich, das Worst-Case-Verhalten ungünstig und die Festlegung der geeigneten Sicherheitskorrekturen schwierig.

6.4 Unvollständige Information über die Umweltentwicklung

Nun betrachten wir den Fall, daß der bei der Planung berücksichtigte Informationsstand A nicht dem bestmöglichen Stand B entspricht (vgl. Kap. 5.2.1). Dies kann einerseits darauf beruhen, daß diese Informationen nicht verfügbar sind, und ander-

Tab. 6.35: Absolute Dominanz bei zusätzl. Kompensation (in %)

	K-		D-	
	MM	HL	Q(0,8)	Q(0,9)
K-EW	0,9	0,9	0,9	9,1
K-MX	0,9	0,0	0,0	2,7
K-MM	0,0	0,0	0,0	15,5
K-HU	0,0	0,0	0,0	10,9
K-HL	0,0	0,0	0,0	14,5
K-AR	0,0	0,0	0,0	6,4
K-RR	0,0	0,0	0,0	7,3
K-RE	0,0	0,0	0,0	11,8
KCC(0,9)-EW	0,9	0,9	0,0	6,4
KCC(0,9)-RE	0,9	0,0	0,0	0,9
D-EW	0,0	0,0	0,0	0,9
D-ES(1,1)	0,0	0,0	0,0	1,8
D-Q(0,8)	0,0	0,0	0,0	0,9
D-Q(0,9)	0,0	0,0	0,0	0,0

renseits darauf, daß die Lösung der Modelle bei vollständiger Berücksichtigung der verfügbaren Informationen zu aufwendig wird. In letzterem Fall wird man sich auf eine Teilmenge der Szenarien beschränken müssen.

Um die Auswirkungen der Unkenntnis oder Nichtverwendung von Informationen zu überprüfen, erzeugen wir einen fiktiven bestmöglichen Informationsstand B, anhand dessen wir die Lösungsgüte der Modelle untersuchen (bei Handlungssicherheit, d. h. ohne Zusatzkompensation). B wird mit derselben Vorgehensweise erzeugt wie der bei der Planung verwendete Informationsstand A (vgl. Kap. 5.1), und besteht aus 240 Szenarien. Die Hauptszenarien werden dabei nicht geändert, alleine die Anzahl der Unterszenarien wird von 4 auf 40 verzehnfacht. Da v. a. die Auswertung bei einer großen Anzahl von Szenarien sehr zeitintensiv ist, wird die Untersuchung an einer Teilmenge von 40 zufällig gewählten Instanzen des modifizierten Patterson-Datensatzes mit 20 bis 30 Vorgängen durchgeführt (vgl. Kap. 6.5).

6.4.1 Unkenntnis des bestmöglichen Informationsstandes B

In einem ersten Experiment soll untersucht werden, wie das Lösungsverhalten der Modelle ist, wenn bei der Planung der bestmögliche Informationsstand B unbekannt ist. Stattdessen sei ein Informationsstand A gegeben, der zwar von den gleichen Annahmen über zukünftige Ereignisse und Umwelteinflüsse ausgeht, jedoch von B aufgrund von Informationsmängeln in gewissem Maße abweicht. Dies simulieren wir dadurch, daß A mit derselben Generierungsmethode erzeugt wird wie B, dabei jedoch nur 24 Szenarien mit zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten zufällig bestimmt werden.

Tab. 6.36 zeigt die ermittelten Basismaße. Es ist deutlich zu erkennen, daß bei allen Modellen sehr große Intervalle zwischen besten und schlechtesten Werten auftreten.

	EZ	SZ	BZ	SR	BR	ET	ST	BT
K-EW	210,21	-103,16	290,16	85,40	323,55	19,22	32,8%	184,5%
K-MX	55,51	-528,01	313,33	240,10	744,76	37,01	96,2%	423,4%
K-MM	207,70	-20,04	260,78	87,91	248,31	25,34	31,5%	133,4%
K-HU	206,31	-68,78	281,63	89,30	291,98	23,31	33,2%	161,8%
K-HL	210,47	-36,65	271,78	85,13	262,03	22,68	31,0%	144,8%
K-AR	207,38	-85,67	285,15	88,22	305,79	22,24	33,3%	173,4%
K-RR	209,47	-67,09	280,32	86,13	288,60	21,34	32,0%	160,1%
K-RE	211,96	-91,08	288,13	83,65	312,83	19,15	31,8%	176,9%
KCC(0,9)-EW	204,53	-136,96	296,59	91,08	354,73	19,80	35,5%	201,3%
KCC(0,9)-RE	205,93	-129,65	295,23	89,68	349,05	19,79	34,9%	198,7%
D-EW	103,83	-437,19	312,55	191,78	654,10	29,03	77,7%	381,3%
D-W	188,55	30,51	231,08	107,06	219,43	42,98	37,2%	103,1%
D-ES(L,3)	191,67	-109,22	273,94	103,94	328,12	29,25	38,9%	185,0%
D-Q(0,8)	192,18	-72,82	275,24	103,43	292,54	33,69	38,1%	156,2%
D-Q(0,9)	192,69	-73,36	251,76	102,92	211,73	19,15	31,0%	103,1%
Best	211,96	30,51	313,33	83,65	211,73	19,15	31,0%	103,1%

Tab. 6.36: Unkenntnis von B: Basismaße

Zum Vergleich sind in Tab. 6.37 die Ergebnisse bei Auswertung anhand von Informationsstand A gegeben, der Grundlage der Lösungsermittlung ist. Man kann sehen, daß das Gewinnniveau (v. a. im Worst Case) deutlich höher ist als in bezug auf

Informationsstand B, obwohl aufgrund der Art der Generierung bei einer Planung anhand B (240 Szenarien) ein ähnliches Niveau erreichbar wäre.

	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
K-EW	294,54	194,82	329,11	45,85	100,67	14,67	13,6%	34,6%	4,7%
K-MX	152,47	-211,38	384,20	187,92	504,36	0,00	59,8%	179,3%	0,0%
K-MM	280,17	262,79	298,03	60,22	96,40	17,17	17,4%	25,5%	6,1%
K-HU	285,51	252,05	323,79	54,88	86,92	20,59	16,0%	24,6%	6,7%
K-HL	285,99	261,05	308,51	54,41	87,62	16,67	15,7%	23,6%	5,7%
K-AR	288,09	220,99	323,57	52,31	65,48	25,08	15,5%	23,5%	7,8%
K-RR	287,91	233,60	317,85	52,49	72,03	24,60	15,4%	18,8%	8,0%
K-RE	294,39	206,22	326,82	46,00	92,02	14,80	13,6%	31,0%	4,7%
KCC(0,9)-EW	292,43	145,24	335,24	47,97	145,37	13,56	14,6%	51,4%	4,2%
KCC(0,9)-RE	292,98	153,85	334,32	47,41	137,02	13,60	14,4%	48,4%	4,3%
D-EW	195,25	-126,24	342,44	145,15	418,02	30,13	46,2%	149,6%	8,3%
D-W	245,33	192,91	267,84	95,07	143,69	45,44	27,9%	41,8%	15,5%
D-ES(L,3)	260,32	116,11	310,58	80,08	186,53	31,20	24,3%	64,2%	9,7%
D-Q(0,8)	264,96	145,32	313,82	75,44	159,39	31,24	22,9%	53,5%	9,9%
D-Q(0,9)	254,70	184,92	288,48	85,70	135,57	42,13	25,5%	41,8%	14,1%
Best	294,54	262,79	384,20	45,85	65,48	0,00	13,6%	18,8%	0,0%

Tab. 6.37: Auswertung unter der Annahme B = A für dieselben 40 Instanzen

Keines der Modelle kann garantieren, daß ein Gewinn erzielt wird. Dies gilt auch nicht für D-W und D-Q(0,9), die jedoch die kleinsten Verlustwahrscheinlichkeiten VW aller Modelle aufweisen (vgl. Tab. 6.38). Insgesamt präsentieren sich diese extrem risikoreichen deterministischen Modelle am robustesten gegen extreme Ausreißer. Entfernt man diese durch Betrachtung der in Tab. 6.38 angegebenen Quantile, so ergibt sich für die K-Modelle ein ähnliches Worst Case-Verhalten. In bezug auf das mittlere Lösungsverhalten (Zentralmaße EZ, MZ usw.) schneiden die K-Modelle deutlich besser ab. Die KCC-Modelle sind etwas ungünstiger als die korrespondierenden K-Modelle. Völlig indiskutabel sind aus Sicht der robusten Planung – wie schon bei allen Untersuchungen zuvor – D-EW und K-MX.

	MZ	SOZ	BOZ	MT	SQT	BQT	VW
K-EW	232,68	56,39	282,13	23,6%	88,7%	12,5%	4,30%
K-MX	99,95	-321,08	285,99	69,3%	262,9%	17,7%	30,21%
K-MM	221,01	107,95	256,23	27,5%	63,9%	16,0%	2,05%
K-HU	224,01	73,83	273,85	26,2%	78,8%	14,1%	3,63%
K-HL	225,09	101,45	265,16	26,1%	67,1%	13,4%	2,45%
K-AR	228,09	64,27	277,19	25,4%	84,4%	13,4%	4,24%
K-RR	227,82	79,96	273,41	25,3%	76,1%	13,6%	3,55%
K-RE	233,31	65,74	280,42	23,5%	84,1%	12,6%	3,78%
KCC(0,9)-EW	230,35	26,46	287,49	24,4%	101,2%	11,8%	5,83%
KCC(0,9)-RE	230,97	33,04	286,57	24,2%	98,5%	12,1%	5,49%
D-EW	149,07	-230,41	293,67	52,6%	223,5%	15,0%	21,65%
D-W	199,58	114,71	226,15	34,6%	59,8%	24,1%	1,99%
D-ES(L,3)	212,30	43,47	266,08	30,3%	92,2%	16,6%	4,99%
D-Q(0,8)	197,93	-24,95	279,22	35,0%	122,9%	17,2%	9,25%
D-Q(0,9)	202,23	110,83	242,87	33,8%	59,0%	22,0%	1,88%
Best	233,31	114,71	293,67	23,5%	59,0%	11,8%	1,99%

Tab. 6.38: Unkenntnis von B: Quantile und Verlustwahrscheinlichkeiten

Die Ergebnisse zeigen, daß die Ergebnissgüte von K-Modellen stark von der verfügbaren Informationslage abhängt.

In einem Fall großer Unsicherheit sind robuste Pläne allenfalls von den extrem risikoscheuen deterministischen Modellen zu erwarten. Es empfiehlt sich also, potentiell verfügbare Informationen möglichst vollständig zu erfassen und bei der Planung zu verwenden. Kann man sich dieser Informationen jedoch nicht sicher sein, sollte man risikoscheuere Modelle wie K-MM – im Extremfall D-W – anwenden.

Tab. 6.39 zeigt die relativen Abweichungen der Werte aus Tab. 6.36, die die vorhergehenden Beobachtungen stützen, sowie die durchschnittliche relative Abweichung über die 6 Maße.

6.4.2 Systematische Szenarioaggregation

Im folgenden untersuchen wir den Fall, daß der Informationsstand B (240 Szenarien) zwar bekannt ist, jedoch aus Aufwandsgründen nicht vollständig verwendet werden kann. Wir gehen davon aus, daß sich lediglich ein Informationsstand A mit 24 Szenarien bei der Planung berücksichtigen läßt.

Die Wahl der einzubeziehenden Szenarien kann durch rein zufällige Auswahl einer Teilmenge oder durch systematische Konstruktion vorgenommen werden.

Der erstere Fall entspricht prinzipiell der Vorgehensweise in Kap. 6.4.1, wobei dort jedoch aufgrund von Informationsmängeln auch Szenarien im Informationsstand A enthalten sein können, die nicht zu B gehören. Da die Generierung jedoch stets mit Hilfe derselben Prozedur vorgenommen wird, ist der Unterschied in den erzielten Ergebnissen vernachlässigbar, wie auch weitere nicht dokumentierte Untersuchungen zeigen. Somit sollen die Ergebnisse aus Kap. 6.4.1 den Fall der Zufallsauswahl repräsentieren.

Zur systematischen Konstruktion eines Informationsstandes A verwenden wir folgende **Cluster-Methode zur Bildung aggregierter Szenarien**.³⁹

Start: Zu Beginn liegen die Menge $M = \{1, \dots, 240\}$ aller Szenarien des Informationsstandes B und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten P_k , mit $k \in M$ vor. Zur Ermittlung der Ähnlichkeit von Szenarien berechnen wir für alle Kombinationen zweier unterschiedlicher Szenarien $q \in M$ und $r \in M$ das folgende symmetrische Abstandsmaß für die szenarioabhängigen Vorgangsdauern:

³⁹ Zum Einsatz von Cluster-Methoden zur Szenarioaggregation im Rahmen der Szenario-Technik vgl. Brauers und Weber (1986).

$$\Delta(q, r) = \sqrt{\sum_{(i,j) \in E} (d_{ij}^q - d_{ij}^r)^2} \quad (6.1)$$

In jeder Iteration des Verfahrens werden zwei in M verbliebene Szenarien e und f zusammengefaßt, deren gemeinsame Wahrscheinlichkeit eine Schranke von 0,1 nicht übersteigt⁴⁰ und deren Abstand kleinstmöglich ist:

$$\Delta(e, f) = \min\{\Delta(q, r) \mid q, r \in M \wedge P_q + P_r \leq 0,1\} \quad (6.2)$$

Das entstehende *aggregierte Szenario* g wird wie folgt gebildet:

$$d_{ij}^g = \frac{P_e \cdot d_{ij}^e + P_f \cdot d_{ij}^f}{P_e + P_f} \quad \text{ sowie } P_g = P_e + P_f \quad (6.3)$$

Das Szenario g ersetzt in der Menge M das Szenario e, und f wird entfernt. Anschließend werden die Abstandsmaße $\Delta(g, h)$ zwischen dem neuen Szenario g und den in M verbliebenen übrigen Szenarien h berechnet.

Abbruch: Das Verfahren endet (nach $240 - 24 = 216$ Iterationen), sobald die gewünschte Anzahl von 24 Szenarien erreicht ist. Diese werden durchgehend von 1 bis 24 durchnummeriert.

	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
K-EW	228,61	3,83	294,17	67,00	228,91	14,73	23,8%	104,0%	5,1%
K-MX	181,65	-124,21	300,90	113,96	359,08	17,44	43,1%	167,1%	5,8%
K-MM	225,89	116,20	264,47	69,71	140,49	16,97	23,8%	55,3%	6,8%
K-HU	227,69	91,51	279,91	67,91	152,64	16,05	23,5%	64,2%	6,0%
K-HL	229,43	105,19	274,06	66,17	142,36	16,26	22,6%	58,2%	6,2%
K-AR	223,36	97,15	266,51	72,25	154,20	18,13	24,8%	62,7%	7,2%
K-RR	224,17	103,67	265,56	71,44	149,81	17,78	24,5%	59,7%	7,2%
K-RE	228,74	5,11	294,03	66,86	227,54	14,70	23,8%	103,3%	5,1%
KCC(0,9)-EW	224,91	-16,62	294,57	70,69	249,13	16,07	25,1%	113,3%	5,4%
KCC(0,9)-RE	221,32	-16,40	292,60	74,28	250,67	16,90	26,4%	114,6%	5,6%
D-W	121,30	-327,73	299,03	174,31	559,79	32,58	64,9%	257,1%	10,2%
D-ES(1,3)	180,42	78,38	221,27	115,18	198,18	51,52	39,7%	76,0%	20,8%
D-Q(0,8)	195,85	-39,31	264,81	99,75	277,99	37,70	35,9%	127,9%	13,6%
D-Q(0,9)	199,82	55,87	255,13	95,78	191,87	40,14	33,0%	80,6%	14,8%
D-Q(0,9)	190,07	95,88	233,22	105,53	174,48	46,93	36,1%	65,7%	18,6%
Best	229,43	116,20	300,90	66,17	140,49	14,70	22,6%	55,3%	5,1%

Tab. 6.40: Szenarioaggregation: Basismaße

Tab. 6.40 bis 6.42 zeigen die anhand des Informationsstandes A mit aggregierten Szenarien erzielten Ergebnisse der verschiedenen Modelle.

Es zeigt sich bei allen Modellen eine mehr oder weniger deutliche Verbesserung gegenüber der rein zufälligen Auswahl von Szenarien (vgl. Tab. 6.36, 6.38, 6.39). Die bemerkenswertesten Ergebnisse erzielen die K-Modelle mit risikoscheuen Ersatzzielfunktionen (MM, AR, RR, HL, HU), die v. a. im Worst Case erheblich günstiger abschneiden als bei zufälliger Auswahl. Die Verlustwahrscheinlichkeit geht gegen 0,

⁴⁰ Diese Beschränkung wird eingeführt, um zu vermeiden, daß eine sehr ungleiche Aggregation zustandekommt mit einigen Szenarien, die eine hohe Wahrscheinlichkeit aufweisen und anderen, deren Wahrscheinlichkeit sehr gering ist.

bei den meisten Instanzen ergibt sich ein akzeptabler Mindestgewinn. Die Worst Case-Regrete SR und ST sind nur noch etwa halb so groß. Bei der Betrachtung der Erwartungswerte fällt die Verbesserung zwar geringer, aber immer noch deutlich aus.

	MZ	SOZ	BOZ	MT	SQT	BQT	VW
K-EW	242,63	122,01	284,83	19,6%	53,3%	9,5%	1,20%
K-MX	204,16	2,42	283,45	33,3%	108,3%	11,3%	8,98%
K-MM	232,35	172,20	258,06	23,1%	37,3%	12,7%	0,09%
K-HU	235,02	160,16	270,51	21,9%	40,4%	11,7%	0,31%
K-HL	236,12	169,73	266,16	21,7%	36,6%	11,7%	0,17%
K-AR	230,90	162,35	259,38	23,8%	40,0%	13,2%	0,18%
K-RR	231,18	165,69	258,52	23,6%	39,0%	13,1%	0,11%
K-RE	242,80	122,13	284,68	19,6%	53,2%	9,5%	1,18%
KCC(0,9)-EW	240,37	107,03	284,76	20,3%	58,9%	9,9%	1,55%
KCC(0,9)-RE	237,86	101,28	282,58	21,1%	62,3%	10,2%	2,21%
D-EW	153,94	-153,66	278,82	49,8%	168,0%	16,1%	19,41%
D-W	186,87	122,17	215,14	38,4%	57,2%	27,6%	1,61%
D-ES(1,3)	211,98	73,75	255,57	30,3%	75,6%	18,6%	3,59%
D-Q(0,8)	206,53	131,20	245,00	31,2%	51,3%	20,9%	0,92%
D-Q(0,9)	194,77	138,11	225,16	35,1%	50,2%	24,9%	0,74%
Best	242,80	172,20	284,83	19,6%	36,6%	9,5%	0,09%

Tab. 6.41: Szenarioaggregation: Quantile und Verlustwahrscheinlichkeiten

Die deterministischen Modelle können von der besseren Informationslage nur bedingt profitieren, ebenso die erwartungsbasierten K- und KCC-Modelle. Dies liegt daran, daß sich bei zufälliger Auswahl einer genügend großen Anzahl von Szenarien ähnliche Erwartungswerte der Vorgangsdauern einstellen wie bei der zugrundeliegenden Gesamtheit, wohngegen unterschiedliche Extremwerte auftreten können.

Betrachtet man die relativen Abweichungen in Tab. 6.42, so wird deutlich, daß v.a. die Modelle K-MM, K-HL und K-RR empfehlenswert sind.

Fazit: Die zuvor präsentierten Ergebnisse legen nahe, daß es bei unvollständiger Information über die Umweltentwicklung aus Sicht der robusten Planung ratsam ist, risikoscheu ausgerichtete Modellansätze zu wählen. Außerdem zeigt sich, daß bei beschränkter Rechenkapazität eine sorgsame Aggregation der verfügbaren Informationen erforderlich ist, um robuste Projektpläne erzielen zu können.

6.5 Einfluß der Projektgröße

Im folgenden soll untersucht werden, ob die Komplexität des Netzplanes (hier gemessen durch die Anzahl seiner Vorgänge) einen Einfluß auf die Güte der Lösungen der verschiedenen Modelle hat und ob sich daraus Empfehlungen bezüglich der Auswahl zu verwendender Modelle ergeben.

Zur Untersuchung des Einflusses der Vorgangszahl werden die Probleminstanzen entsprechend gruppiert und jede Gruppe getrennt für K- und D-Modelle analysiert. Es bietet sich beim modifizierten Patterson-Datensatz eine Einteilung in drei Gruppen an. Die erste Gruppe enthält alle Instanzen mit maximal 20 Vorgängen, die zweite Gruppe setzt sich aus Instanzen mit einer Vorgangszahl zwischen 21 und 30 zusammen, und die dritte Gruppe wird aus den verbleibenden Instanzen mit mehr als 50 Vorgängen gebildet. Im Patterson-Datensatz sind keine Instanzen mit 31 bis 50 Vorgängen enthalten.

Die mittlere Gruppe bildet den größten Teil mit 89 Instanzen, die erste Gruppe beinhaltet 11, die letzte 10 Instanzen. Von Interesse sind vor allem die Unterschiede zwischen der ersten und dritten Gruppe. Tab. 6.43 zeigt die Basismaße bei Auswertung ohne zusätzliche Kompensation für die erste Gruppe.

	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
K-EW	115,87	91,79	123,25	6,93	20,25	1,25	5,3%	17,2%	1,1%
K-MX	100,34	46,94	130,92	22,47	64,09	0,00	16,4%	49,8%	0,0%
K-MM	111,49	107,75	113,50	11,32	19,18	2,02	8,1%	12,8%	1,8%
K-HU	113,90	107,40	119,36	8,91	15,14	1,79	6,8%	11,0%	1,7%
K-HL	113,94	107,59	118,76	8,87	15,16	1,80	6,8%	11,1%	1,7%
K-AR	114,64	99,52	120,38	8,16	11,58	3,22	6,1%	9,7%	2,6%
K-RR	114,41	101,04	119,47	8,40	12,21	3,18	6,3%	8,5%	2,6%
K-RE	115,86	93,94	122,86	6,94	18,73	1,27	5,3%	15,8%	1,1%
D-EW	107,29	74,43	120,32	15,52	39,12	4,46	11,8%	32,1%	3,2%
D-W	107,99	102,51	109,67	14,82	22,76	4,54	10,7%	16,4%	3,7%
D-ES(1,1)	110,25	83,49	118,92	12,55	30,95	3,72	9,6%	25,8%	2,8%
D-Q(0,8)	110,31	90,84	119,51	12,49	27,42	3,39	9,0%	21,5%	2,4%
D-Q(0,9)	109,58	93,90	117,50	13,23	25,95	3,49	9,4%	19,3%	2,6%
Best	115,87	107,75	130,92	6,93	11,58	0,00	5,3%	8,5%	0,0%

Tab. 6.43: Ergebnisse der Instanzen mit maximal 20 Vorgängen

Dem gegenübergestellt werden in Tab. 6.44 die Instanzen der zweiten Gruppe, die zwischen 21 und 30 Vorgänge enthalten. Während bei den kleinen Instanzen sämtliche Modelle ähnliche Ergebnisse erzielen können, zeigt sich bei den mittleren Instanzen schon ein deutliches Abfallen der deterministischen Ansätze.

Tab. 6.45 zeigt die Ergebnisse der größten Instanzen mit mehr als 50 Vorgängen. Hier sind nun dramatische Unterschiede zwischen den Modellen erkennbar. Sämtliche deterministische Modelle weisen extreme Ausreißer, die weniger risikoscheu gar deutliche erwartete Verluste auf, wohngegen alle sinnvollen K-Modelle erhebliche Gewinne garantieren und sehr viel robustere Lösungen liefern.

Hieraus ist der Schluß zu ziehen, daß der Einsatz von K-Modellen bei größeren Projekten dringend geboten erscheint, da deterministische Modelle die sich aufschaukelnden Effekte entlang kritischer Pfade des Netzplans nicht mehr kontrollieren

rung eines Planes durch szenariospezifische (kostenmäßige) Einbeziehung von Maßnahmen zum Ausgleich von Restriktionsverletzungen zu antizipieren.

Während es bei deterministischen Modellen ausreichend, einen erwarteten, evtl. um Sicherheitsfaktoren korrigierten Wert für jeden Datenparameter zu schätzen, benötigt man bei robusten Modellen eine umfangreiche Datenbasis in Form der Szenarien. Außerdem werden die Modelle, je nach Ausprägung, deutlich umfangreicher, was zu erhöhtem Rechenaufwand führt. Daher wurde eine experimentelle Untersuchung durchgeführt, die v.a. zur Klärung der folgenden Fragen beitragen sollte:

1. Lohnt sich der erhöhte Aufwand robuster Optimierungsmodelle?
2. Welche ErsatzzielFunktionen sind v.a. für risikoscheue Entscheidungsträger empfehlenswert?
3. Welche Ersatzrestriktionen sind zur Bewältigung der Zulässigkeitsproblematik einzusetzen?

In bezug auf Frage 1 zeigt sich, daß die herkömmliche deterministische Planung zu erheblichen Einbußen an Planungsqualität führen kann und es sich durchaus lohnt, den Aufwand robuster Planungsmodelle in Kauf zu nehmen. Für komplexe Projekte sollte dies sogar unbedingt getan werden. Dies gilt jedoch nur, wenn man mit Hilfe von K-Modellen plant bzw. planen kann (Frage 3). Fat Solution-Modelle sind viel zu pessimistisch, da sie sich nur an der ungünstigsten Umweltentwicklung orientieren. CC-Modelle sind erheblich aufwendiger als K-Modelle, erzielen jedoch ungünstigere Lösungen, da keine Beurteilung der mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten erlaubten Unzulässigkeiten und deren Ausmaß vorgenommen wird. Weiterhin ist die Festlegung der Zulässigkeitswahrscheinlichkeit ein unsicherer Planungsfaktor. Die Kombination aus K- und CC-Modellen führt zu günstigen Lösungen, erfordert aber einen ungleich höheren Rechenaufwand als K-Modelle.

Gegenüber D-Modellen verursachen K-Modelle keinen übermäßig erhöhten Rechenaufwand, so lange man eine verhältnismäßig geringe Anzahl an Szenarien zu betrachten hat. Müssen jedoch mehrere tausend oder noch mehr Szenarien untersucht werden, so wird man sich ggf. auf heuristische (Näherungs-) Lösungen beschränken bzw. Methoden zur geschickten Auswahl "repräsentativer" Szenarien anwenden. Dennoch zeigen Experimente, daß selbst die Berücksichtigung weniger, geeignet aggreasierter Szenarien der auf einem Szenario basierenden deterministischen Planung im allgemeinen vorzuziehen ist.

Bezüglich der Frage 2 ist folgendes zu bemerken: Unter den K-Modellen sind grundsätzlich diejenigen mit erwartungswert- und regretbasierten ErsatzzielFunktionen (K-EW, K-ER, K-AR, K-RR) zu empfehlen. Welches der Modelle im konkreten Entscheidungsfall gewählt wird, hängt vor allem von der Risikoeinstellung des Entscheidungsträgers ab. Bei besonderer Risikoscheu sind die regretbasierten Kriterien vorzuziehen.

Obwohl die zugrundegelegten Modelle nur bedingt in der Praxis anwendbar und auch die Auswertungsmethoden kritisiert werden, da es kein absolutes Maß zur Bewertung einer Lösung gibt, zeigt sich die Bedeutung robuster Planungsansätze. Es

	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
K-EW	267,25	159,03	299,48	43,54	103,50	13,56	14,2%	41,1%	4,7%
K-MX	134,68	-235,33	352,05	176,11	494,93	0,23	63,5%	207,6%	0,1%
K-MM	252,57	236,89	268,53	58,21	94,15	14,88	18,2%	26,9%	5,9%
K-HU	258,04	227,88	291,20	52,74	85,42	17,94	16,7%	25,7%	6,7%
K-HL	258,54	234,96	278,88	52,24	85,16	14,53	16,4%	24,8%	5,6%
K-AR	261,22	192,64	292,74	49,57	63,51	22,36	16,0%	26,6%	7,5%
K-RR	260,88	207,49	286,85	49,90	70,15	22,33	15,9%	19,8%	7,7%
K-RE	267,00	174,01	296,79	43,78	92,62	13,27	14,1%	34,7%	4,6%
D-EW	191,35	-119,52	311,65	119,44	24,40	40,6%	40,6%	150,8%	7,4%
D-W	215,66	161,10	236,25	95,12	153,19	43,01	30,5%	46,6%	16,6%
D-ES(L1)	217,56	-32,08	304,73	93,22	193,17	23,15	31,0%	114,1%	7,4%
D-Q(0,8)	234,52	123,02	281,59	76,26	153,85	31,07	25,3%	58,0%	10,4%
D-Q(0,9)	226,78	160,50	259,58	84,01	134,61	40,19	27,3%	45,8%	14,1%
Best	267,25	236,89	352,05	43,54	63,51	0,23	14,1%	19,8%	0,1%

Tab. 6.44: Ergebnisse der Instanzen mit einer Vorgangszahl zwischen 21 und 30

	EZ	SZ	BZ	ER	SR	BR	ET	ST	BT
K-EW	400,71	53,13	507,56	168,03	355,61	75,82	32,6%	125,0%	15,3%
K-MX	-278,11	-1609,52	720,22	846,85	2008,88	2,55	181,4%	666,5%	0,3%
K-MM	353,59	315,15	404,62	215,15	336,38	55,64	37,1%	47,4%	14,9%
K-HU	365,57	291,16	479,41	203,17	319,43	76,25	35,8%	48,2%	21,8%
K-HL	372,42	310,02	442,05	196,33	312,50	56,59	34,1%	44,6%	15,2%
K-AR	378,87	145,49	502,51	189,87	229,19	97,07	35,6%	77,8%	18,9%
K-RR	380,37	245,84	464,49	188,37	271,17	85,23	33,5%	37,7%	22,0%
K-RE	396,21	173,22	484,19	172,54	301,81	65,93	31,0%	60,8%	16,0%
D-EW	-704,92	-2336,21	355,54	1273,67	2740,89	353,81	275,5%	985,7%	53,6%
D-W	-347,95	-1590,23	358,03	916,70	1999,68	320,78	197,1%	790,9%	47,5%
D-ES(L1)	-632,23	-2206,47	365,21	1200,97	2613,35	343,11	259,9%	948,1%	50,6%
D-Q(0,8)	29,72	-691,01	431,56	539,02	1135,22	217,73	105,4%	312,6%	34,7%
D-Q(0,9)	37,79	-559,17	359,06	530,95	1021,27	252,91	101,9%	266,6%	45,0%
Best	400,71	315,15	720,22	168,03	229,19	2,55	31,0%	37,7%	0,3%

Tab. 6.45: Ergebnisse der Instanzen mit einer Vorgangszahl von mehr als 50

können. Dies gelingt weder durch extreme Risikozuschläge (D-W), die ohne nachträgliche Anpassung zu erheblicher Projektverzögerung führen würden, wodurch ungeplante, teure Beschleunigungsmaßnahmen erforderlich werden, noch durch Verwendung mittlerer Dauern (D-EW), da sich in diesem Fall Verzugskosten anschaulen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit befaßt sich mit der kosten- bzw. gewinnorientierten Projektplanung unter besonderer Beachtung der Unsicherheit der Vorgangsdauern. Neben den üblichen, rein deterministischen Modellen werden sogenannte robuste Optimierungsmodelle formuliert. Diese basieren auf der Einbeziehung unterschiedlicher Szenarien (Umweltlagen), die individuelle Eintrittswahrscheinlichkeiten aufweisen können, in sogenannte Ersatzmodelle. Dabei lassen sich unterschiedliche ErsatzzielFunktionen und Möglichkeiten der Ersatzformulierung von Restriktionen verwenden. Bei den sogenannten Fat Solution-Modellen wird gefordert, daß eine Lösung für alle Szenarien zulässig ist, während die Einhaltung der Restriktionen bei Chance-Constrained (CC)-Modellen nur mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten erfolgen muß. Kompensationsmodelle (K-Modelle) versuchen, die spätere Realisie-

ist daher wichtig, derartige Ansätze auf praxisrelevantere Modelle zu übertragen. So wären die Untersuchung des diskreten Time-Cost Tradeoff-Problems oder die Einbeziehung begrenzter Ressourcen ein erster Schritt.

8 Literatur

- Adam, D. (1996): Planung und Entscheidung. 4. Aufl., Gabler, Wiesbaden.
- Bamberg, G. und A.G. Coenenberg (1996): Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. 9. Aufl., Vahlen, München.
- Bitz, M. (1981): Entscheidungstheorie. Vahlen, München.
- Bowman, R.A. (1995): Efficient estimation of arc criticalities in stochastic activity networks. *Management Science* 41, S. 58-67.
- Brauers, J. und M. Weber (1986): Szenarioanalyse als Hilfsmittel der strategischen Planung: Methodenvergleich und Darstellung einer neuen Methode. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 56, S. 631-652.
- Brucker, P., A. Drexel, R. Möhring, K. Neumann und E. Pesch (1999): Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. *European Journal of Operational Research* 112, S. 3-43
- Bühler, W. und R. Dick (1973): Stochastische Lineare Optimierung: Chance-Constrained-Modell und Kompensationsmodell. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 43, S. 101-120.
- Cleef, H.J. und W. Gaul (1982): Project scheduling via stochastic programming. *Mathematische Operationsforschung Statistik, Series Optimization* 13/3, S. 449-468.
- Connors, M.M. und W.I. Zangwill (1969): Cost minimization in networks with discrete stochastic requirements. *Operations Research* 19, S. 794-821.
- De, P.; E.J. Dunne, J.B. Ghosh und C.E. Wells (1995): The discrete time-cost tradeoff problem revisited. *European Journal of Operational Research* 81, S. 225-238.
- De, P.; E.J. Dunne, J.B. Ghosh und C.E. Wells (1997): Complexity of the discrete time-cost tradeoff problem for project networks. *Operations Research* 45, S. 302-306.
- Demeulemeester, E.; W. Herroelen und S.E. Elmaghraby (1996): Optimal procedures for the discrete time/cost trade-off problem in project networks. *European Journal of Operational Research* 88, S. 50-68.
- Demeulemeester, E.; B. de Reyck, B. Foubert, W. Herroelen und M. Vanhoucke (1998): New computational results on the discrete time/cost trade-off problem in project networks. *Journal of the Operational Research Society* 49, S. 1153-1163.
- Dinkelbach, W. (1982): Entscheidungsmodelle. de Gruyter, Berlin.
- Dinkelbach, W. und A. Kleine (1996): Elemente einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre. Springer, Berlin.
- Domschke, W. und A. Drexl (1998): Einführung in Operations Research, 4. Aufl., Springer, Berlin, Kap. 5.
- Elmaghraby, S. und W.S. Herroelen (1978): On the measurement of complexity in activity networks. *European Journal of Operational Research* 5 (1980), S. 223-234.
- Ewert, R. und A. Wagenhofer (1997): Interne Unternehmensrechnung. 3. Aufl., Springer, Berlin.
- Fulkerson, D.R. (1962): Expected critical path lengths in PERT networks. *Operations Research* 10, S. 808-817.
- Golenko-Ginzburg, D. und A. Gomik (1998): A heuristic for network project scheduling with random activity durations depending on the resource allocation. *International Journal on Production Economics* 55, S. 149-162.
- Gujtjahr, W.J.; C. Strauss und M. Toth (1998): Project risk reduction - Activity crashing by sampling and optimization. *Arbeitspapier, Universität Wien*.
- Heike, H.-D. und C. Tárcolea (2000): Grundlagen der Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung - Statistik I. Oldenbourg, München-Wien.
- Heller, U. (1981): On the shortest overall duration in stochastic project networks. *Methods of Operations Research* 42, S. 85-104.
- Kall, P. und S.W. Wallace (1994): *Stochastic Programming*. Wiley, New York.
- Kamburowski, J.; D.J. Michael und M. Stallmann (1993): On the minimum dummy-arc problem. *Revue Française de Recherche Opérationnelle* 27, S. 153-168.
- Kelley, J.E. und M.R. Walker (1959): Critical path planning and scheduling: An introduction. *Mauchly Associates, Ambler*.
- Klein, R. (2000): Scheduling of resource-constrained projects. *Kluwer, Boston*.
- Klein, R. und A. Scholl (1999): Betriebswirtschaftliche Planungs- und Entscheidungstechniken. *Manuskript, TU Darmstadt*.
- Kolisch, R. und A. Drexel (1997): Local search for nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling. *IEE Transactions* 29, S. 987-999.
- Kolisch, R.; A. Sprecher und A. Drexl (1995): Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems. *Management Science* 41, S. 1693-1703.
- Küpper, H.-U. (1997): *Controlling*. 2. Aufl., Schäffer-Poeschel, Stuttgart.
- Küpper, W.; K. Lüder und L. Streifert (1975): *Netzplantechnik*. Physica, Würzburg-Wien.
- Moder, J.J.; C.R. Phillips und E.W. Davis (1983): *Project management with CPM, PERT and precedence diagramming*. Van Nostrand, New York.
- Möhring, R.H. und F.J. Radermacher (1989): The order-theoretic approach to scheduling. In: *Slo-winski, R. und J. Weglarz (Hrsg.): Advances in project scheduling*, Elsevier, Amsterdam, S. 497-531.
- Morlock, M. und K. Neumann (1973): Ein Verfahren zur Minimierung der Kosten eines Projektes bei vorgegebener Projektdauer. *Angewandte Informatik* 15, S. 135-140.
- Patterson, J.H. (1984): A comparison of exact approaches for solving the multiple constrained resource, project scheduling problem. *Management Science* 30, S. 854-867.
- Prohl, H.-C. und G.E. Braun (1981): *Entscheidungstheorie*. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech.
- Riess, M. (1996): Effizienzkonzepte und nutzentheoretische Ansätze zur Lösung stochastischer Entscheidungsmodelle. *Physica, Heidelberg*.
- Salger, E. (1993): Betriebswirtschaftliche Entscheidungstheorie. 3. Aufl., Oldenbourg, München.
- Scholl, A. (1998): *Robuste Planung: Produktionsprogrammentscheidungen bei Unsicherheit von Daten*. Schriften zur Quantitativen Betriebswirtschaftslehre 8/98.
- Scholl, A. (2000): *Robuste Planung und Optimierung*. Manuskript, TU Darmstadt.
- Scholl, A. und R. Klein (1998a): Produktionsprogrammplanung bei unsicheren Daten, Teil I. *Schriften zur Quantitativen Betriebswirtschaftslehre* 3/98.
- Scholl, A. und R. Klein (1998b): Produktionsprogrammplanung bei unsicheren Daten, Teil II. *Schriften zur Quantitativen Betriebswirtschaftslehre* 4/98.
- Sieben, G. und T. Schildbach (1994): *Betriebswirtschaftliche Entscheidungstheorie*. 4. Aufl., Werner-Verlag, Düsseldorf.
- Skutella, M. (1998): *Approximation and randomization in scheduling*. Dissertation, TU Berlin.
- Sprecher, A. und A. Drexl (1998): Solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems by a simple, general and powerful sequencing algorithm. *European Journal of Operational Research* 107, S. 431-450.
- Sprecher, A.; S. Hartmann und A. Drexl (1997): An exact algorithm for project scheduling with multiple modes. *OR Spektrum* 19, S. 195-203.
- Vladimirov, H. und S.A. Zenios (1997): Stochastic programming and robust optimization. In: *Gal, T. und H.J. Greenberg (Hrsg.): Advances in sensitivity analysis and parametric programming*. Kluwer, Boston, Kap. 12.
- Wollmer, R.D. (1985): *Critical path planning under uncertainty*. *Mathematical Programming Study* 25, S. 164-171.