

Entscheidungsfindung in der humanitären Logistik

Ein multikriterielles Transshipmentmodell zur Allokation von
Hilfsgütern in laufenden Hilfsaktionen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktorin der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr. rer. pol.)

genehmigte Dissertation

von
Beate Rottkemper

aus
Bielefeld

2016

Vorsitzender des Prüfungsverfahrens: Prof. Dr. Matthias Meyer

1. Gutachterin: Prof. Dr. Kathrin Fischer
2. Gutachter: Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten
3. Gutachter: Prof. Dr. Christian M. Ringle

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Oktober 2015

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
Symbolverzeichnis	xi
1. Einleitung	1
2. Grundlagen der humanitären Logistik und Abgrenzung des Forschungsthemas	3
2.1. Definition des Katastrophenbegriffs	3
2.2. Phasen des Katastrophenmanagements	5
2.3. Charakteristika der humanitären Logistik und Abgrenzung zur kommerziellen Logistik	13
2.4. Literaturüberblick und Motivation	17
2.5. Abgrenzung zu anderen Forschungsgebieten	21
2.6. Forschungsfrage und Zielsetzung	26
2.7. Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit	28
3. Grundlagen multikriterieller Entscheidungsfindung und Anwendung in der humanitären Logistik	33
3.1. Zielsetzungen in der humanitären Logistik	33
3.2. Einführung in die Entscheidungstheorie	35
3.3. Lineare multikriterielle Optimierung	39
3.3.1. Pareto Optimalität	40
3.3.2. Bewertung Pareto optimaler Lösungen	42
3.4. Methoden zur Lösung linearer multikriterieller Optimierungsprobleme .	45
3.4.1. Vektoroptimierung	45
3.4.2. Evolutionäre Algorithmen	55

3.4.3. <i>Goal Programming</i>	56
3.5. Gemischt-ganzzahlige multikriterielle Optimierung	57
3.6. Multikriterielle Optimierung - Untersuchung der Pareto-Front	59
3.7. Lösungsmethoden für multikriterielle Probleme in der humanitären Logistik	61
4. Multikriterielle Optimierung in <i>Overlapping Disasters</i>	65
4.1. Einführung des multikriteriellen Transshipment-Modells <i>mHumLog</i>	65
4.1.1. Ausgangssituation und Planungsproblem	65
4.1.2. Transshipment-Modell als Grundlage des Modells <i>mHumLog</i>	67
4.1.3. Zielsetzungen bei <i>Overlapping Disasters</i>	72
4.2. Annahmen und Voraussetzungen für das Modell <i>mHumLog</i>	74
4.3. Multikriterielles Transshipment-Modell <i>mHumLog</i>	78
4.4. Methoden zur Lösung des multikriteriellen Modells <i>mHumLog</i>	88
4.4.1. Methode der gewichteten Summe	89
4.4.2. Operationale Kosten als Nebenbedingung	91
4.4.3. <i>Constraint</i> Methode	93
5. Szenariotechnik und robuste Optimierung	99
5.1. Klassifizierung und Qualitätskriterien für Szenarien	102
5.2. Phasen des Szenario-Managements	104
5.3. Modellierung von Unsicherheiten in Szenarien	112
5.4. Robuste Optimierung	113
6. Anwendung der Szenariotechnik in der humanitären Logistik	121
6.1. Szenarien in der humanitären Logistik - Stand der Forschung	122
6.2. Charakteristika von Szenarien in der humanitären Logistik	124
6.3. Die Phasen des Szenario-Managements in Reaktion auf die Unterbrechung einer Hilfsaktion	126
6.4. Fallbeispiel - Burundi vor einer Malaria-Epidemie	129
7. Lösungen der Szenarien mit dem Modell <i>mHumLog</i>	149
7.1. Technische Umsetzung der Lösungsmethoden	150
7.2. Methode der gewichteten Summe	151
7.3. <i>Constraint</i> Methode	159

7.4. Gegenüberstellung der Ergebnisse und Diskussion	163
7.5. Diskussion zur Robustheit der vorliegenden Lösungen	166
7.6. Ergebnisanalyse zur Bewertung von Einflussfaktoren auf Entscheidungen in <i>Overlapping Disasters</i>	168
7.6.1. Ermittlung von relevanten Distributionsfaktoren durch detaillierte Ergebnisanalyse	170
7.6.2. Bewertung der Handlungsalternativen für die Szenariogruppen .	176
8. Zusammenfassung und Ausblick	183
8.1. Zusammenfassung der Ergebnisse	184
8.2. Limitationen der vorliegenden Arbeit	186
8.3. Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen	187
A. Humanitäre Hilfe in der wissenschaftlichen Literatur	189
A.1. Definitionen der Katastrophenmanagement-Phasen	189
A.2. Zielsetzungen in der humanitären Logistik	190
A.3. Szenarien in der humanitären Logistik	191
B. Karten - Afrika und Burundi	193
B.1. Afrika - Übersicht Staaten	193
B.2. Burundi und seine Provinzen	194
C. Vollständiger Datensatz des Anwendungsbeispiels	195
C.1. Beschreibung der Ist-Situation	195
C.2. Alle Haupt- und Einzelszenarien	197
D. Ergebnisse der Szenarien	201
D.1. Referenzmodell	201
D.2. Perfekte Information	203
D.3. Methode der gewichteten Summe	205
D.4. <i>Constraint</i> Methode	211
Literaturverzeichnis	217

Abbildungsverzeichnis

2.1. Klassifizierung von Katastrophen in zwei Dimensionen nach van Wassenhove (2006) und EM-DAT	4
2.2. Die Phasen des Katastrophenmanagements	6
2.3. <i>Overlapping Disasters</i>	12
2.4. Die Struktur einer humanitären Supply Chain nach Balçık und Beamon (2008)	13
2.5. Die Struktur einer kommerziellen Supply Chain nach Simchi-Levi u. a. (2003)	14
2.6. Verwandte Planungsprobleme	22
2.7. Einzelne Arbeitsschritte zur Erfüllung der Teilaspekte	30
3.1. Übersicht ausgewählter Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung	38
3.2. Schematische Darstellung der zulässigen Lösungen im Zielraum und der Pareto-Front	41
3.3. Schematische Darstellung schwach Pareto optimaler Punkte	44
3.4. Übersicht über die verschiedenen Methoden der Vektoroptimierung . .	46
3.5. Schematische Darstellung der <i>Constraint</i> Methode	50
3.6. Visualisierung der <i>Noninferior Set Estimation</i> Methode	52
3.7. Visualisierung der <i>Normal Boundary Intersection</i> Methode	53
3.8. Visualisierung der <i>Normal Constraint</i> Methode	54
3.9. Schematische Darstellung Pareto optimaler Lösungen im Zielraum gemischt-ganzzahliger Probleme	58
3.10. Beispiel für Lösungen auf einer Pareto-Front mit markierter Knie-Region	60
4.1. Lagerhaltungsstruktur des betrachteten Problems	66
4.2. Netzwerkflussmodell von Herer u. a. (2006)	68
4.3. Netzwerkstruktur des linearen Modells	75

4.4.	Schema der rollierenden Planung	76
4.5.	Sichere und unsichere Nachfrage in der rollierenden Planung	78
4.6.	Die Bestimmung der Variablen UD_{itk} für den Fall, dass $k > t$	86
4.7.	Die Bestimmung der Variablen UD_{itk}^{OF} für den Fall, dass $k = t$	87
4.8.	Darstellung der effizienten Front	95
4.9.	Grafische Darstellung der Auswahl einer effizienten Lösung nach Rottkemper und Fischer (2013)	97
5.1.	Framework zur Generierung von Szenarien	100
5.2.	Die Dimensionen der Szenario-Erstellung nach Gausemeier u. a. (1996)	103
5.3.	Die fünf Phasen des Szenariomanagements nach Gausemeier u. a. (1996)	105
6.1.	Der Zyklus einer Malaria-Epidemie	130
6.2.	Endemisches Auftreten von Malaria in Burundi	134
6.3.	Die drei betrachteten Provinzen im Norden Burundis und die Distributionsstruktur	137
6.4.	Klassifikation der Einflussfaktoren auf die Entstehung einer Malaria-Epidemie	140
6.5.	Potentielle Einflussfaktoren auf die Handlungsempfehlung zur Reaktion auf eine Malaria-Epidemie	142
7.1.	Einordnung der beiden Referenzmethoden	149
7.2.	Unbefriedigte Nachfrage in Relation zum Referenzmodell	152
7.3.	Operationale Kosten in Relation zum Referenzmodell	153
7.4.	Unbefriedigte Nachfrage für verschiedene Szenarien und ausgewählte Strafkostensätze	154
7.5.	Operationale Kosten für verschiedene Szenarien und ausgewählte Strafkostensätze	155
7.6.	Nachbestellte Menge an ACT für verschiedene Szenarien und ausgewählte Strafkostensätze	156
7.7.	Gesamtbestand an ACT in den Lagern am Ende des Planungshorizontes	157
7.8.	Transportierte Menge an ACT zwischen den regionalen Lagern	158
7.9.	Unbefriedigte Nachfrage für verschiedene Varianten der <i>Constraint</i> Methode	160
7.10.	Operationale Kosten für verschiedene Varianten der <i>Constraint</i> Methode	161

7.11. Nachbestellte Menge für verschiedene Varianten der <i>Constraint</i> Methode	162
7.12. Lagerbestand am Ende des Planungshorizontes für verschiedene Varianten der <i>Constraint</i> Methode	162
7.13. Transshipmentmengen für verschiedene Varianten der <i>Constraint</i> Methode	163
7.14. Gegenüberstellung der unbefriedigten Nachfrage für beide Lösungsmethoden und ausgewählte Szenarien	164
7.15. Gegenüberstellung der operationalen Kosten für beide Lösungsmethoden und ausgewählte Szenarien	165
7.16. Nachbestellungen pro Periode gemittelt über alle Szenarien bei Lösung mit der gewichteten Summe	167
7.17. Nachbestellung pro Periode gemittelt über alle Szenarien bei Lösung mit der <i>Constraint</i> Methode	168
7.18. Vorgehen zur Analyse der Ergebnisse der Szenarien bei Lösung mit dem Modell <i>mHumLog</i>	169
7.19. Abhängigkeitsstruktur der Einflussfaktoren in Bezug auf die Distributionsentscheidung	171
7.20. Abhängigkeitsstruktur für die Alternative KW 1,2	175
A.1. Die Katastrophenmanagement-Phasen nach verschiedenen Autoren . .	189
B.1. Übersichtskarte von Afrika mit Ländergrenzen	193
B.2. Übersichtskarte von Burundi und den 17 Provinzen	194

Tabellenverzeichnis

4.1. Symbole des Modells von Herer u. a. (2006)	70
4.2. Parameter und Indizes des Modells <i>mHumLog</i>	79
4.3. Variablen des Modells <i>mHumLog</i>	80
4.4. Binäre und ganzzahlige Variablen des Modells <i>mHumLog</i>	81
4.5. Strafkostenparameter für die Methode der gewichteten Summe	89
4.6. Variablen und Parameter für die <i>Constraint</i> Methode	93
6.1. Krankenhäuser und Gesundheitsstationen in Kayanza, Karuzi und Ngozi	136
6.2. Nachfragedaten und Startbestände in den Regionallagern und im Zen- trallager	138
6.3. Beispiel für Haupt- und Einzelszenarien	145
7.1. Durchschnittliche Ergebnisse in den Hauptszenarien	172
7.2. Durchschnittliche Ergebnisse bei erhöhtem Lagerbestand	173
7.3. Durchschnittliche Ergebnisse bei geringerem Lagerbestand	174
7.4. Durchschnittliche Ergebnisse bei vier Regionallagern	174
7.5. Durchschnittliche Ergebnisse bei längeren Transportzeiten	175
7.6. <i>Worst Case</i> -Szenario der verschiedenen Handlungsalternativen	177
7.7. Differenz zwischen möglichen Ergebnissen der verschiedenen Handlungs- alternativen	177
7.8. Differenz der Ergebnisse zu den Ergebnissen unter perfekter Information	178
7.9. Ergebnisse im Vergleich zur besten Alternative für jedes Kriterium	180
A.1. Zielsetzungen in multikriteriellen Modellen in der humanitären Logistik	190
A.2. Szenarien in quantitativen Modellen zur Lösung von Fragestellungen in der humanitären Logistik	191
A.3. Methoden zur Lösung der Szenarien zu Fragestellungen in der humani- tären Logistik	192

C.1. Nachfragedaten in den Regionallagern in Einheiten ACT	195
C.2. Unsichere Nachfrage in den Regionallagern in Einheiten ACT	195
C.3. Strafkosten für unbefriedigte sichere Nachfrage (pro Einheit ACT) . . .	196
C.4. Strafkosten für unbefriedigte unsichere Nachfrage (pro Einheit ACT) .	197
D.1. Ergebnisse aller Szenarien mit dem Referenzmodell	201
D.2. Ergebnisse aller Szenarien unter der Annahme perfekter Information . .	203
D.3. Ergebnisse aller Szenarien mit der Methode der gewichteten Summe . .	205
D.4. Ergebnisse aller Szenarien mit der <i>Constraint</i> Methode	211

Symbolverzeichnis

Mengen und Indizes

i, j	Index für die Einzelhändler/ regionalen Lager, $i, j \in DE$ und $DE := \{1, \dots, N\}$.
k, t, v	Index für die Perioden, $t, k, v \in PE$, und $PE := \{1, \dots, T\}$.
q, o	Index für die betrachteten Kriterien (Ziele), in einem multikriteriellen Entscheidungsproblem, $q, o = \{1, \dots, krit\}$.
sol	Index für die Lösung mit einer bestimmten rechten Seite: $gridPoint_{sol}$.

Parameter

$bigM$	Eine hinreichend große Zahl.
c_{ij}	Transportkosten pro Einheit des betrachteten Hilfsgutes, die zwischen Depot i und Depot j transportiert wird.
c_{0i}	Transportkosten pro Einheit des betrachteten Hilfsgutes, die vom Zentrallager zu Depot i transportiert wird.
$cFix_{ij}$	Fixe Transportkosten pro Transport zwischen Depot i und Depot j .
$cFix_{0i}$	Fixe Transportkosten pro Transport vom Zentrallager zu Depot i .
d_i	Aktuelle Nachfrage, die am Lager i auftritt in ME.
d_{it}^1	Sicherer Bedarf in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes an Lager i in Periode t .
d_{it}^2	Unsicherer Bedarf in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes an Lager i in Periode t .
g	Die Anzahl der rechten Seiten, für die ein Optimierungsmodell mit der Constraint-Methode gelöst wird
g_{ik-t}^1	Gewichtungsfaktor für unbefriedigten sicheren Bedarf, der in Periode t an Depot i aufgetreten ist und in Periode k noch unbefriedigt ist (in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes).
g_{ik-t}^2	Gewichtungsfaktor für unbefriedigten unsicheren Bedarf, der in Periode t an Depot i aufgetreten ist und in Periode k noch unbefriedigt ist (in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes).
$gridPoint_{sol}$	Rechte Seite für die sekundäre Zielfunktion, die die Lösung sol erzeugt.
h	Lagerhaltungskosten pro Einheit des betrachteten Hilfsgutes und Periode.
h_i	Lagerhaltungskosten, die am Lager i auftreten (je ME).
$kritWert$	Parameter, der angibt, ab welchem Quotienten der Lösungsprozess abgebrochen wird.
$Maxi$	Grenze für den Tradeoff des Quotienten der Zielausprägungen von zwei Alternativen
$maxRoad$	Maximale Transportkapazität in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes für den Straßentransport.

p_i	Strafkosten, die am Lager i auftreten, je ME unbefriedigter Nachfrage.
p_{i0}^1	Strafkosten für sicheren Bedarf, der seit dieser Periode unbefriedigt ist, an Lager i , pro Einheit.
p_{i0}^2	Strafkosten für unsicheren Bedarf, der seit dieser Periode unbefriedigt ist, an Lager i , pro Einheit.
p_{ik-t}^1	Strafkosten für unbefriedigten sicheren Bedarf, der in Periode t an Depot i aufgetreten ist und in Periode k noch unbefriedigt ist (in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes).
p_{ik-t}^2	Strafkosten für unbefriedigten unsicheren Bedarf, der in Periode t an Depot i aufgetreten ist und in Periode k noch unbefriedigt ist (in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes).
r	Transportkosten bei Nachbestellung pro Einheit des betrachteten Hilfsgutes.
$rFix$	Fixe Transportkosten, pro Nachbestellung.
s_i	Startbestand (ME) in Lager i in jeder Periode.
s_{i1}	Bestand zu Beginn der ersten Periode in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes in Lager i .
s_{01}	Bestand zu Beginn der ersten Periode in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes im Zentrallager.
w_q	Gewichtungsfaktor für das Ziel q .

Variablen

$F_{B_i E_i}$	Teil des Lagerbestands, der bei Einzelhändler i verbleibt (in Einheiten des betrachteten Gutes).
$F_{B_i M_i}$	Teil des Lagerbestands, der bei Einzelhändler i genutzt wird, um Bedarf zu decken (in Einheiten des betrachteten Gutes).
$F_{B_i M_j}$	Teil des Lagerbestands, der von Einzelhändler i zu Einzelhändler j transportiert wird, um Bedarf zu decken (in Einheiten des betrachteten Gutes).
F_{RE_i}	Lagerbestand, der durch Nachbestellung vom Zentrallager bei Einzelhändler i hinzukommt (in Einheiten des betrachteten Gutes).
F_{RM_i}	Unbefriedigte Nachfrage bei Einzelhändler i , die durch Nachbestellung befriedigt wird (in Einheiten des betrachteten Gutes).
$F_{S_t^{GD} S_{t+3}^{CD}}$	Fluss vom globalen zum Zentrallager, der das globale Lager in Periode t verlässt, in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{S_t^{CD} S_{t+2}}$	Fluss vom Zentrallager zu Depot i , der das Zentrallager in Periode t verlässt, in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{S_{it} S_{j,t+1}}$	Fluss vom Depot i zum Depot j , der das Depot i in Periode t verlässt, in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{S_t^{CD} S_{t+1}^{CD}}$	Lagerbestand im Zentrallager am Ende von Periode t in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{S_{it} S_{t+1}}$	Lagerbestand in Depot i am Ende von Periode t in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{S_{it} M_{it}}$	Zur Nachfragebefriedigung verwendete Einheiten des betrachteten Hilfsgutes an Lager i in Periode t .
$F_{U_{it} M_{it}}$	Unbefriedigte Nachfrage (sichere und unsichere) an Depot i in Periode t in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.

$F_{UitM_{it}}^{Cert}$	Unbefriedigte sicherer Nachfrage an Depot i in Periode t in Einheiten des betrachteten Hilfs-gutes.
$F_{UitM_{it}}^{CertPos}$	$\max(0, F_{UitM_{it}}^{Cert})$.
UD_{itk}	Unbefriedigte sichere Nachfrage an Depot i in Periode k in Einheiten des betrachteten Hilfs-gutes, die in oder vor Periode t aufgetreten ist.
UD_{itk}^2	Unbefriedigte unsichere Nachfrage an Depot i in Periode k in Einheiten des betrachteten Hilfs-gutes, die in oder vor Periode t aufgetreten ist.
UD_{itk}^{Pos}	$\max(0, UD_{itk})$.
UD_{itk}^{2Pos}	$\max(0, UD_{itk}^2)$.
UD_{itk}^{Of}	Unbefriedigte sichere Nachfrage an Depot i in Periode k in Einheiten des betrachteten Hilfs-gutes, die in Periode t aufgetreten ist.
UD_{itk}^{2Of}	Unbefriedigte unsichere Nachfrage an Depot i in Periode k in Einheiten des betrachteten Hilfs-gutes, die in Periode t aufgetreten ist.

Ganzzahlige und binäre Variablen

$Y_{F_{ijt}}$	Anzahl an Fahrzeugen, die für den Transport zwischen Lager i und j in Periode t benötigt werden.
$Y_{F_{it}^{CD}}$	Anzahl an Fahrzeugen, die für den Transport zwischen dem Zentrallager und Lager i in Periode t benötigt werden.
$Y_{F_t^{GDCCD}}$	Binäre Variable, die angibt, ob in Periode t eine Nachbestellung vorgenommen wird (Wert 1) oder nicht (Wert 0).
$Y_{F_{UitM_{it}}^{CertPos}}$	Binäre Variable, die angibt, ob Teile der sicheren Nachfrage in Periode t am Depot i noch unbefriedigt sind (Wert 0) oder nicht (Wert 1).
$Y_{UD_{itk}^{Pos}}$	Binäre Variable, die angibt, ob Teile des sicheren Bedarfs an Lager i aus Periode t in Periode k noch unbefriedigt sind (Wert 0) oder nicht (Wert 1).
$Y_{UD_{itk}^{2Pos}}$	Binäre Variable, die angibt, ob Teile des unsicheren Bedarfs an Lager i aus Periode t in Periode k noch unbefriedigt sind (Wert 0) oder nicht (Wert 1).
$Y_{UD_{itk}}$	Binäre Variable, die angibt, ob der gesamte sichere Bedarf an Lager i aus Periode t in Periode k noch unbefriedigt ist (Wert 0) oder nicht (Wert 1).
$Y_{2UD_{itk}}$	Binäre Variable, die angibt, ob der gesamte unsichere Bedarf an Lager i aus Periode t in Periode k noch unbefriedigt ist (Wert 0) oder nicht (Wert 1).

Sonstige Symbole

f_q	Eine beliebige Funktion.
L	Der Lösungsraum eines Entscheidungsproblems der durch die Restriktionen aufgespannt wird.
x	Vektor der Entscheidungsvariablen in einem Optimierungsproblem.
x_*	Pareto optimale Lösung eines Optimierungsproblems.
z^*	Der Idealzielpunkt, definiert durch die optimalen Werte aller q Kriterien.
\bar{z}_q	Der Aspirationslevel für das Ziel $q = 1, \dots, krit$.

1. Einleitung

Humanitäre Hilfe zielt darauf ab, Menschen in Gebieten mit zerstörter oder schlechter Infrastruktur zu versorgen. Diese Hilfe muss erfolgen, bis sich die Bevölkerung in der entsprechenden Region wieder selber versorgen kann. Wird ein Hilfsprojekt in Folge einer Naturkatastrophe oder einer von Menschen ausgelösten Krise notwendig, wird auch von Katastrophenhilfe gesprochen. Über die Unterstützung direkt nach einer Katastrophe hinaus werden im Zuge der Katastrophenhilfe längerfristige Projekte durchgeführt, um Menschen medizinisch zu versorgen, Nahrungssicherheit zu gewährleisten, Wiederaufbau voran zu treiben oder die Wirtschaft in den betroffenen Gebieten wieder anzukurbeln.

Bis zu 80% einer Hilfsaktion besteht aus logistischen Aufgaben (van Wassenhove, 2006). Demnach kann eine Hilfsaktion nur erfolgreich durchgeführt werden, wenn die Logistik effizient ist (van Wassenhove, 2006). Es gibt jedoch regelmäßig Berichterstattungen, die zeigen, dass dies nicht der Fall ist: Flughäfen, die mit großen Mengen an Hilfsgütern überfüllt sind, Hilfsgüter, die nicht benötigt werden und Lagerhäuser füllen, aber auch unzureichende Lagerkapazitäten und Verzögerungen in der Distribution der Hilfsgüter (Cassidy, 2003; Hoffman, 2005).

Vor allem direkt nach einer Katastrophe laufen die logistischen Prozesse zumeist sehr unorganisiert ab und sind weit davon entfernt effizient zu sein (Cassidy, 2003). Verschärft wird diese Situation dadurch, dass die Akteure der humanitären Logistik oftmals erst reagieren können, wenn eine Katastrophe bereits eingetreten ist. Das führt dazu, dass logistische Entscheidungen schnell und lediglich aufgrund von Erfahrungswerten der Mitarbeiter getroffen werden müssen. Eine sorgfältige Evaluation der aktuellen Situation kann oftmals nicht stattfinden (Besiou u. a., 2010).

Die Unsicherheiten über Lagerkapazitäten, Lieferzeiten und zur Verfügung stehende Ressourcen nehmen im Laufe einer Hilfsaktion ab. Gerade in längerfristigen Hilfsaktionen sind die Distributionswege bekannt. Gleichzeitig nimmt jedoch auch das verfügbare Budget ab, da das Spendenaufkommen beim Ausbruch einer Katastrophe deutlich höher ist. In solchen Situationen müssen dann Entscheidungen darüber getroffen wer-

den, wie mit den knappen Ressourcen eine möglichst große Anzahl an betroffenen Menschen versorgt werden kann. Nichtsdestotrotz bestehen auch in diesen Hilfsaktionen noch Unsicherheiten: Selten ist die Nachfrage an den verschiedenen Orten gänzlich bekannt und gerade in Ländern mit politischen Krisen kann es passieren, dass Hilfskonvois überfallen und an der Weiterfahrt gehindert werden. Solche oder andere Zwischenfälle führen dazu, dass bereits laufende Hilfsaktionen nicht wie geplant fortgeführt werden können. Stattdessen müssen Belieferungs- und Versorgungspläne oftmals auf die neue Situation angepasst werden.

In der vorliegenden Arbeit werden Entscheidungssituationen zur Umverteilung von Hilfsgütern in langfristigen Hilfsaktionen betrachtet. Diese Umverteilungen werden aufgrund von Epidemieausbrüchen während eines laufenden Projektes zur Gesundheitsvorsorge in Burundi notwendig. Der Ausbruch einer Epidemie führt dazu, dass in einer Region die Menge der gelagerten Medikamente nicht mehr ausreicht, um die Nachfrage zu decken. In diesen Situationen muss über eine Allokation der Hilfsgüter entschieden werden, so dass sowohl auf die Unterbrechung reagiert werden kann, zugleich aber auch die Fortführung der Hilfsaktion sichergestellt wird. Dabei sind mehrere Zielsetzungen zu berücksichtigen: Es soll die Nachfrage, die trotz der Hilfsaktion unbefriedigt bleibt, minimiert werden. Gleichzeitig sollen die Logistikkosten nicht höher sein als notwendig, da die Ressourcen in solchen längerfristigen Hilfsaktionen knapp sind.

Zur Entscheidungsunterstützung wird in dieser Arbeit ein multikriterielles mathematisches Modell aufgestellt, mit dem die Umverteilung der Hilfsgüter anhand von Szenarien optimiert wird. Anschließend werden die Allokationspläne für die betrachteten Szenarien analysiert und es werden Kriterien identifiziert, die berücksichtigt werden müssen, um eine gute Entscheidung in der beschriebenen Situation zu treffen. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur Unterstützung von Entscheidungsträgern, die in vergleichbaren Katastrophensituationen die Versorgung der betroffenen Bevölkerung planen müssen.

2. Grundlagen der humanitären Logistik und Abgrenzung des Forschungsthemas

Im Folgenden wird der Katastrophenbegriff näher definiert und anschließend werden zur Abgrenzung der humanitären Logistik gegenüber der kommerziellen Logistik Unterschiede und Gemeinsamkeiten in den jeweiligen Planungssituationen aufgezeigt. Um eine Einordnung der in dieser Arbeit untersuchten Fragestellung zu ermöglichen, werden daraufhin die verschiedenen Phasen, die ein Hilfsprojekt durchläuft, eingeführt. Darauf aufbauend wird die Forschungsfrage und die Zielsetzung der Arbeit definiert, bevor ein kurzer Einblick in die, zu ihrer Erreichung angewendete, Forschungsmethodik gegeben wird.

2.1. Definition des Katastrophenbegriffs

Der Begriff „Katastrophe“ hat einen altgriechischen Ursprung und setzt sich aus zwei Begriffen zusammen. Zum einen *κατα*, was so viel bedeutet wie „Abwärtsrichtung“ oder „Umkehr“, und zum anderen *στροφή*, mit der Bedeutung „Wendung“. Eine Katastrophe kann also rein nach ihrer Begrifflichkeit als „entscheidende Wendung des Geschehens zum endgültigen Schlimmen“ definiert werden (Treptow, 2007, S. 9). Darauf aufbauend wurden zahlreiche Definitionen des Katastrophenbegriffs entwickelt. Dieser Arbeit wird die Definition vom Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) zugrundegelegt, welche sowohl in der Praxis als auch in der Wissenschaft des Katastrophenmanagements Anwendung gefunden hat: *„a situation or event which overwhelms local capacity, necessitating a request to a national or international level for external assistance; an unforeseen and often sudden event that causes great damage, destruction and human suffering.“* (Guha-Sapir u. a., 2012, S. 7). Ein Ereignis, welches als Katastrophe eingestuft wird, muss dabei mindestens eines der folgenden Merkmale aufweisen (Guha-Sapir u. a., 2012):

2. Grundlagen der humanitären Logistik und Abgrenzung des Forschungsthemas

- Der Tod von 10 oder mehr Menschen wurde bestätigt oder wird bei vermissten Personen angenommen,
- 100 oder mehr Menschen sind betroffen und brauchen Unterstützung (inklusive evakuierter und aus ihrer Region verdrängter Menschen),
- das Ereignis wird als Notfall deklariert oder
- internationale Hilfe wird erbeten.

Webster u. a. (2009) legen den Fokus in ihrer Definition einer Katastrophe verstärkt auf die Verwundbarkeit der Bevölkerung: Eine Situation wird erst zur Katastrophe, wenn die Bevölkerung durch ein Ereignis stark beeinträchtigt ist. Diese Definition kann dazu führen, dass ein Ereignis in einer wohlhabenden Gesellschaft nicht als Katastrophe deklariert wird, während es an einem anderen Ort katastrophale Auswirkungen hat.

		Natürlich	Menschlich verschuldet	
Plötzlich auftretend	Geophysikalisch	Erdbeben Vulkan	Technolog.	Nicht aufgeführt
	Meteorologisch	Hurrikan Tornado	Chemische Katas. Unfall	Terrorismus Staatsstreich
	Hydrologisch	Flut		
Langsam auftretend	Klimatologisch	Dürre	Politische Krise Flüchtlingskrise	
	Biologisch	Epidemie		
	Nicht aufgeführt	Hunger Armut		

Abbildung 2.1.: Klassifizierung von Katastrophen in zwei Dimensionen nach van Wassenhove (2006) und EM-DAT

Der Begriff Katastrophe wird weiter diversifiziert, und zwar nach Ursache und Geschwindigkeit des Auftretens. So wird zwischen Naturkatastrophen und solchen unterschieden, die von Menschen verursacht werden. Diese Klassifizierung ist jedoch nicht immer eindeutig und variiert zudem von Autor zu Autor. Van Wassenhove (2006) definiert vier Kategorien zur Klassifizierung von Katastrophen: Plötzlich auftretende Naturkatastrophen, plötzlich auftretende menschlich verursachte Katastrophen und langsam auftretende menschlich verursachte und Naturkatastrophen. Das sind die

übergeordneten Kategorien in Abbildung 2.1. In der internationalen Katastrophen-Datenbank EM-DAT (betrieben durch das CRED) wird zwischen technischen Katastrophen und Naturkatastrophen unterschieden. Ereignisse, die in vom Menschen geschaffenen Risikosituationen auftreten, werden als technische Katastrophen bezeichnet. Dazu zählen zum Beispiel Reaktorunfälle oder Bergbaukatastrophen, es werden jedoch keine politischen Krisen betrachtet (Guha-Sapir u. a., 2012, S. 7-9). Die Naturkatastrophen werden weiterhin in fünf Unterkategorien gegliedert: Geophysikalische, meteorologische, hydrologische, klimatologische und biologische Katastrophen. In die letzte Kategorie zählen zum Beispiel auch Epidemien, die von van Wassenhove (2006) nicht berücksichtigt werden. In der Abbildung 2.1 sind die Dimensionen einer Katastrophe nach van Wassenhove (2006) und die Klassifizierung der Katastrophen nach EM-DAT zusammen dargestellt. Dabei sind die vier Hauptkategorien von van Wassenhove (2006) definiert und die Unterkategorien stammen von EM-DAT. Katastrophen, die von EM-DAT nicht aufgeführt werden, sind entsprechend gekennzeichnet. Ob Hunger und Armut natürlich auftretende Katastrophen sind, wird kontrovers diskutiert. Auch Dürren und Fluten treten durch menschliches Zutun vermehrt auf (Webster u. a., 2009; Kovács und Spens, 2009). Darüber hinaus werden in der Datenbank EM-DAT auch komplexe Katastrophen als zusätzliche Dimension eingeführt. Damit sind zum Beispiel Situationen gemeint, in denen während eines Konfliktes im Land eine Naturkatastrophe eintritt (Webster u. a., 2009).

2.2. Phasen des Katastrophenmanagements

Zahlreiche Autoren haben das Katastrophenmanagement in Phasen gegliedert, um eine strukturierte Betrachtung zu ermöglichen. Die meisten Autoren definieren drei oder vier Phasen in der Katastrophenhilfe (Kovács und Spens, 2007), die sich vor allem in der Namensgebung und teilweise nach ihren zugrunde liegenden Aufgaben unterscheiden. In Anhang A.1 ist eine Übersicht über die verschiedenen Ansätze zur Strukturierung der Katastrophenhilfe in Phasen gegeben.

In der vorliegenden Arbeit werden vier Phasen des Katastrophenmanagements unterschieden. Dazu werden die Begriffe des Österreichischen Normungsinstituts verwendet, nach dem die Phasen mit Katastrophenvermeidung (*Mitigation-Phase*), Katastrophenvorsorge (*Preparedness-Phase*), Katastrophenbewältigung (*Response-Phase*) und Wiederherstellung (*Recovery-Phase*) benannt werden (Whittaker, 1979). Die Phasen

werden üblicherweise in einem Zyklus angeordnet, was bedeutet, dass nach der Wiederherstellungsphase erneut die Katastrophenvermeidung beginnt. Zudem sind die Phasen nicht klar trennbar. Vielmehr gehen die Aufgaben fließend ineinander über, wie in Abbildung 2.2 dargestellt.

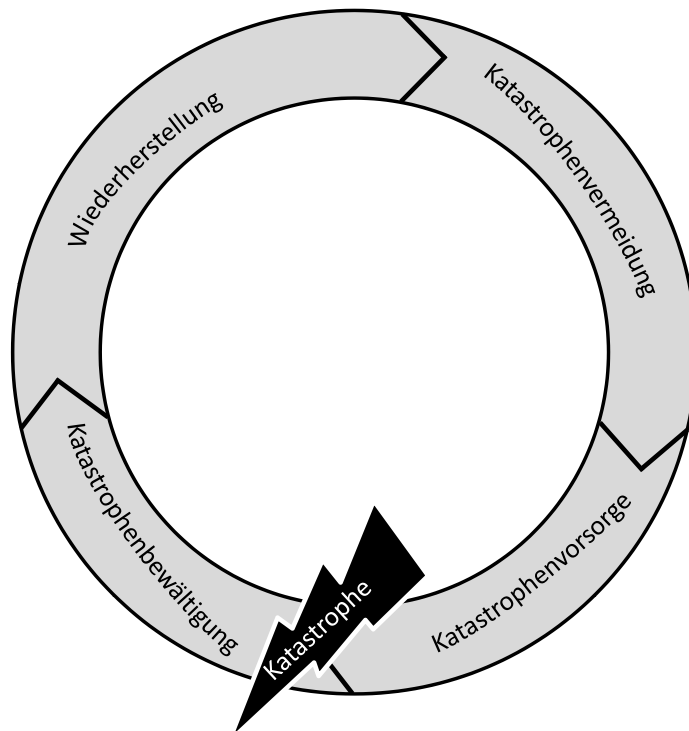


Abbildung 2.2.: Die Phasen des Katastrophenmanagements

Katastrophenvermeidung

Während dieser Phase können soziale, politische und rechtliche Strukturen geschaffen werden, die das Ausmaß im Falle einer Katastrophe begrenzen. Dazu gehören zum Beispiel Gesetze, die verhindern, dass Häuser in katastrophengefährdeten Gebieten gebaut werden (van Wassenhove, 2006), Deichbau, die Installation von Katastrophenfrühwarnsystemen, aber auch die Vermeidung von Operationen, die Menschen in Gefahr bringen könnten, wie zum Beispiel die Verwendung von risikobehafteter Chemikalien (Tufinkgi, 2006).

Katastrophenvorsorge

In besonders gefährdeten Regionen, wie zum Beispiel nahe eines aktiven Vulkans oder in Erdbeben gefährdeten Gebieten, bereiten sich sowohl regionale als auch internationale Akteure auf eventuell (wieder) auftretende Katastrophen vor (Kovács und Spens, 2007). Eine Aufgabe regionaler Akteure in dieser Phase ist es, Trainings zum Verhalten während einer Katastrophe durchzuführen (van Wassenhove, 2006; Tufinkgi, 2006). Eine weitere Aufgabe während der Katastrophenvorsorge ist die Erstellung von Evakuierungsplänen für die Bevölkerung, wie es zum Beispiel für jede Sturmflut geschehen sollte (De Silva, 2001).

Internationale Akteure sorgen in dieser Phase dafür, dass ihre globalen Lager gefüllt sind (Dignan, 2005; Tomasini und van Wassenhove, 2009). Darüber hinaus werden eventuelle regionale Lager in den gefährdeten Regionen errichtet und Hilfsgüter in diesen vorpositioniert (van Wassenhove, 2006). Regionale Lager werden allerdings nur eingerichtet, wenn das Eintreten einer Katastrophe in dieser Region sehr wahrscheinlich ist. Kleinere Organisationen, die sich keine umfangreiche Lagerhaltung leisten können, schließen Lieferverträge mit Herstellern oder Großhändlern, die im Katastrophenfall die voraussichtlich benötigten Waren liefern (Murray, 2005). Chaikin (2003) stellt fest, dass die Investition in lokale Lager oft deutlich höher als der Nutzen ist und dass im Notfall mithilfe von Warnsystemen innerhalb von 24 Stunden Ressourcen aus globalen Lagern bereit gestellt werden können. Deswegen sollte die Errichtung eines Lagers nahe eines potentiellen Katastrophengebiets sorgfältig evaluiert werden. Die Regierungen der betroffenen Region können ebenfalls vorsorgen, scheitern jedoch oft an mangelndem logistischem Wissen. Nach Long (1997) und Chaikin (2003) ist zudem der Aufbau einer funktionierenden Informationstechnologie entscheidend für den Erfolg einer humanitären Aktion. Diese kann im Ernstfall dabei helfen, die Koordination der Akteure untereinander zu verbessern (Sawyer u. a., 2005). Auch dafür kann die erste Phase im Katastrophenhilfe - Lebenszyklus genutzt werden (Kaatrud u. a., 2003). Die Entwicklung geeigneter Software zur Unterstützung der Katastrophenhilfe wird ebenfalls dieser Phase zugeordnet (Tomasini und van Wassenhove, 2004; Murray, 2005).

Eine große Herausforderung in der Phase der Vorbereitung auf eine Katastrophe ist die Unsicherheit, mit der die Akteure konfrontiert sind. Es ist unbekannt, wann, wo, wie viel, von welchem Hilfsgut benötigt wird und von wo es beschafft werden kann

(van Wassenhove, 2006). Damit im Falle einer Katastrophe schnell reagiert werden kann, ist eine Vorbereitung auf mögliche Katastrophen jedoch notwendig.

Die Aufgaben vor dem Eintreten der Katastrophe können von den Hilfsorganisationen oft nicht in ausreichendem Maße wahrgenommen werden, da die Akquirierung der Spendengelder vor dem Eintreten einer Katastrophe schwierig ist (Murray, 2005). Oftmals fehlt das Bewusstsein der Menschen für die Notwendigkeit zu handeln, da ja noch keine konkrete Katastrophe eingetreten ist. In Regionen, die von wiederkehrenden Katastrophen betroffen sind, geht die Entwicklung aber immer weiter von reaktivem Handeln über zu proaktiven Investitionen (Kovács und Spens, 2007).

Die zwei Phasen vor dem Eintreten einer Katastrophe sind strategischer Natur (Tomasini und van Wassenhove, 2009; Long, 1997). Dabei werden diese Phasen selbst zu einem kleinen Lebenszyklus, da die Organisationen stetig ihre Möglichkeiten der Reaktion auf eine Katastrophe verbessern, denn es wird aus vergangenen Katastrophen gelernt. Fünf Bereiche sind zur erfolgreichen Vorbereitung auf eine Katastrophe besonders wichtig: Das Personalmanagement, das Wissensmanagement, die Logistik, die Verbesserung der finanziellen Ressourcen und die Kommunikation (Tomasini und van Wassenhove, 2009; van Wassenhove, 2006).

Katastrophenbewältigung

In dieser Phase wird die erste Hilfe nach dem Eintreten einer Katastrophe durchgeführt, zum Beispiel Evakuierungsmaßnahmen, eine erste medizinische Versorgung und das Bereitstellen von Notunterkünften sowie eine erste Versorgung mit dem Lebensnotwendigen (Tufinkgi, 2006; Kovács und Spens, 2007). Die Supply Chain für diese Güter muss im Fall von plötzlich auftretenden Katastrophen etabliert werden, ohne dass genaue Informationen über die Situation vor Ort vorliegen (Beamon, 2004; Tomasini und van Wassenhove, 2004). Es gibt keine genauen Daten darüber, wie viele Menschen, wo und in welchem Ausmaß betroffen sind. Demnach sind auch die Bedarfe räumlich, zeitlich und quantitativ unbekannt (van Wassenhove, 2006). Folglich müssen die Bedarfsdaten geschätzt werden (Long und Wood, 1995), zum Beispiel aus ähnlichen vergangenen Fällen kombiniert mit dem Wissen über die betroffene Region, die Gebräuche und Gewohnheiten. Daraus werden Daten bezüglich der Art und der Menge an benötigten Hilfsgütern, der Zeit und des Ortes der Bereitstellung abgeleitet (Jahre und Navangul, 2011).

Nach Balçık und Beamon (2008) sind vor allem die ersten Tage, in denen die Ressourcen mobilisiert werden, maßgebend für den Erfolg einer Hilfsaktion. Diese Ansicht teilen viele Wissenschaftler und Praktiker: Die ersten 72 Stunden werden als entscheidend für den Erfolg einer Hilfsaktion eingestuft, denn danach sind Engpässe, wie Flughäfen und teilweise auch Transportwege, im Falle von Misskoordination überfüllt und somit nicht weiter passierbar und die Hilfeleistungen erreichen die betroffene Bevölkerung oftmals nicht mehr (The Sphere Projekt, 2004, S. 286; Gustavsson, 2003; Russell, 2005; van Wassenhove, 2006; Salmerón und Apte, 2010).

Eine besondere Herausforderung neben der Unvorhersehbarkeit der Nachfrage ist der Transport auf der letzten Meile (Beamon, 2004; Long und Wood, 1995; Özdamar u. a., 2004). Es werden in der ersten Phase nach einer Katastrophe alle vorhandenen Transporteinheiten in der betroffenen Region angefordert. Oft führt dies zu einem ziellosen Zirkulieren der Fahrzeuge, wenn typische Ziele (wie zum Beispiel Krankenhäuser) zerstört sind und somit nicht mehr als Anlaufpunkt dienen können (Özdamar u. a., 2004; Greiling Keane, 2005). Darüber hinaus fehlen in der betroffenen Region oft die personellen und technischen Ressourcen, um die Distribution durchzuführen. Deswegen ist es zum Beispiel wichtig, dass Sendungen so verpackt werden, dass eine Person sie alleine umladen kann (Long und Wood, 1995; Trunick, 2005). Auch an anderen Ressourcen fehlt es oftmals, wie zum Beispiel Kraftstoff (Long und Wood, 1995). Zudem muss die Sicherheit auf der letzten Meile im betroffenen Gebiet gewährleistet werden, denn häufig kommt es nach Naturkatastrophen zu Unruhen, aufgrund der großen Not in der Bevölkerung. So ist es in Krisengebieten oftmals notwendig im Konvoi zu fahren, Lager zu bewachen etc. (Long und Wood, 1995; Cassidy, 2003; van Wassenhove, 2006).

Die Spender konzentrieren sich sehr stark auf diese Phase des Katastrophenlebenszyklus, ausgelöst durch die hohe Medienaufmerksamkeit. Es herrscht also in der Regel kein Mangel an finanziellen Mitteln zur Katastrophenbewältigung (Kovács und Spens, 2007; van Wassenhove, 2006). Vielmehr können große Mengen an Sachspenden, die nicht benötigt werden, da sie für die Region oder den Katastrophentyp unangemessen sind, sogar zum Problem werden. Beispiele für solche Hilfsgüter sind warme Kleidung in tropischen Gebieten oder abgelaufene Lebensmittel (Murray, 2005). Diese Güter in großen Mengen blockieren die Distributionsstränge, die oftmals sowieso schon ungenügende Kapazitäten aufweisen (Dignan, 2005; van Wassenhove, 2006). Selbst wenn die Güter eigentlich benötigt würden, wissen die Hilfsorganisationen oft nicht, wie sie die

Sachspenden nutzen können, weil zum Beispiel die Beipackzettel in Sprachen verfasst sind, die keiner der Helfer versteht oder weil nicht klar ist, was sich in den Lieferungen befindet. Um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, wurden Standardmarkierungen für Hilfsgüter entwickelt, die mit Farben für verschiedene Kategorien wie Nahrung und Kleidung arbeiten (Murray, 2005).

Nach Tufinkgi (2006) kann die Katastrophenbewältigung von einigen Tagen bis zu wenigen Wochen dauern. Im Anschluss daran sollte die betroffene Region zumindest in Ansätzen wieder eine funktionierende Infrastruktur haben. Die international tätige Hilfsorganisation World Vision setzt den Zeitraum für die Katastrophenbewältigung auf 30 Tage fest (Kovács und Spens, 2007), Jahre und Navangul (2011) dagegen sogar auf drei Monate.

Wiederherstellung

In der Wiederherstellungsphase entwickelt sich die Hilfe weg von einem reinen Versorgen der betroffenen Bevölkerung an einem zentralen Ort hin zu einem Wiederaufbau der Häuser der obdachlos gewordenen Menschen (Lamont, 2005; Tufinkgi, 2006). Zudem ist die Stärkung der Infrastruktur ein wichtiger Faktor, um zu verhindern, dass zukünftige Katastrophen vergleichbare Auswirkungen haben, wie die gerade erlebte (Kovács und Spens, 2007; van Wassenhove, 2006; Tufinkgi, 2006). Vor allem regionale Akteure können in dieser Phase des Katastrophen-Lebenshilfezyklus aktiv werden und vermehrt Leistungen übernehmen, damit die internationalen Organisationen sich zurückziehen können (Thomas, 2002). Eine Schwierigkeit in der Durchführung der Aufgaben in der Wiederherstellungsphase sind die, aufgrund schwindender Medienaufmerksamkeit, zurückgehenden Spendengelder. Oftmals ist die Aufmerksamkeit der Medien und Spender bereits bei der nächsten Katastrophe, während die Wiederherstellung noch längst nicht abgeschlossen ist (Gustavsson, 2003; van Wassenhove, 2006). Nach Abschluss der Wiederherstellungsphase soll die betroffene Region in der Lage sein, sich wieder selbstständig zu versorgen (Tufinkgi, 2006).

Angaben über die Dauer der Wiederherstellungsphase differieren sehr stark. Die international tätige Hilfsorganisation World Vision nennt diese Phase des Katastrophenlebenszyklus *Reconstruction-Phase* und schreiben ihr eine Dauer von 90 Tagen zu (Kovács und Spens, 2007). Viele definieren diese Phase jedoch um einiges länger, da in den meisten Fällen nach 90 Tagen noch keine Normalität herrscht. In Haiti zum

Beispiel lebten auch drei Jahre nach dem Erbeben in 2010 noch viele Menschen in Zeltlagern (Human Rights Watch, 2013). Jahre und Navangul (2011) gliedern die Phase weiter in die *Initial Recovery*, die drei bis sechs Monate dauert, und die *Recovery-Phase*, die nochmals sieben bis zwölf Monate in Anspruch nimmt. Van Wassenhove (2006) erwähnt sogar, dass die Rehabilitation nach einer Katastrophe Jahre dauern kann. Katastrophen haben langfristige Auswirkungen auf die Infrastruktur der betroffenen Region. Nicht nur in Entwicklungsländern, auch in Industrieländern kann es lange dauern, bis sich die Gesellschaft wieder vollkommen von einer Katastrophe erholt hat. Das wird zum Beispiel in Japan deutlich, wo auch Jahre nach dem Erdbeben im März 2011 Wiederaufbaumaßnahmen durchgeführt wurden. Der Minister der eigens zur Behebung der Erdbebenfolgen gegründeten *Reconstruction Agency* gab in seinem Lagebericht im März 2013 bekannt: „*Having restored essential infrastructure and services, progress is now also being made on longer-term infrastructure redevelopment initiatives including coastal facilities, following extensive planning and consultation with local stakeholders.*“ (Reconstruction Agency, 2013).

Charles u. a. (2009) definieren die Phasen humanitärer Operationen abhängig von ihrem Auslöser. Bei Katastrophen, die sich ankündigen und die langsam verlaufen (langsam auftretende Katastrophen), ist die Hilfsaktion oftmals deutlich langwieriger, weil die Auswirkungen dieser Katastrophen einen größeren Teil der Bevölkerung betreffen. Hier kann sich die akute Hilfsaktion über Jahre hinziehen. Hingegen dauert sie bei kurzfristigen Katastrophen (plötzlich auftretende Katastrophen) meist nicht länger als ein Jahr.

Overlapping Disasters

Häufig kommt es bei Projekten der humanitären Hilfe zu unvorhergesehenen Ereignissen, die die gesamte Projektplanung und -durchführung gefährden. Auf der Angebotsseite kann zum Beispiel ein Feuer oder Diebstahl zu Lieferengpässen führen, während auf der anderen Seite Nachfrageerhöhungen, zum Beispiel durch Flüchtlingsbewegungen oder durch den Ausbruch von Krankheiten, auftreten können (Ben-Tal u. a., 2011). Zwar sind humanitäre Organisationen in der Lage, das Risiko für das Auftreten solcher Zwischenfälle in bestimmten Regionen einzuschätzen, dennoch bleibt eine Restunsicherheit, die dazu führt, dass parallel zur bereits laufenden Hilfsaktion schnell reagiert werden muss. Die Situationen, die dabei entstehen, werden „*Overlapping Disasters*“

genannt und zeichnen sich dadurch aus, dass während eines längerfristigen Projektes kurzfristige Hilfe durchgeführt werden muss. Eine schematische Darstellung dieser Situation ist in Abbildung 2.3 gegeben (Rottkemper u. a., 2011).

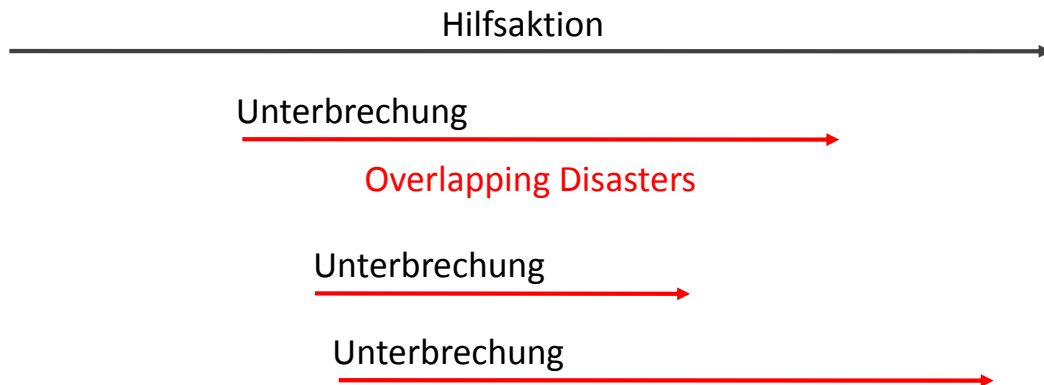


Abbildung 2.3.: *Overlapping Disasters*

Ein prominentes Beispiel für *Overlapping Disasters* ist die Situation in Haiti nach dem schweren Erdbeben in 2010. Noch während der ersten Katastrophenbewältigung traf Hurrikan Tomas die Region und kurz danach brach Cholera aus, wodurch die Hilfsaktion abermals unterbrochen und neu koordiniert werden musste. Aufgrund dieser komplexen Situation kann sich die Katastrophenbewältigung über die definierten Zeitspannen hinaus in die Länge ziehen, da sich die Helfer immer wieder auf neue Herausforderungen einstellen müssen (Balaisyte u. a., 2011). Buchanan-Smith und Maxwell (1994) sprechen in solchen Situationen, in denen immer wieder Verlängerungen und Neuausrichtungen der Hilfsaktion auftreten, von „permanenten Notfallsituationen“. Sie stellen fest, dass diese Situationen besonders in afrikanischen Ländern häufig auftreten und die Entwicklung neuer Konzepte, um ihnen angemessen zu begegnen, ein wichtiger Forschungsgegenstand ist. In dieser Arbeit werden solche *Overlapping Disasters* untersucht; dabei wird der Fokus auf die Verteilung von Hilfsgütern in diesen sehr unsicheren und finanziell knappen Situationen gelegt. Die Forschungsfrage wird in Abschnitt 2.6 detaillierter erläutert.

2.3. Charakteristika der humanitären Logistik und Abgrenzung zur kommerziellen Logistik

Die Ziele der kommerziellen Logistik sind weithin bekannt: Es sollen die richtigen Güter, zur richtigen Zeit, in der richtigen Menge und Art am richtigen Ort zu den richtigen Kosten bereit gestellt werden (Plowman, 1964, S. 3ff). Ernst (2003) definiert die kommerzielle Logistik als einen Prozess, der sowohl den Güter- als auch den Informations- und Kapitalfluss vom Anbieter zum Kunden steuert. Humanitäre Logistik kann ähnlich definiert werden, denn auch hier findet ein Güter-, Informations- und Kapitalfluss vom Spender, Lieferanten oder Anbieter zu den betroffenen Menschen statt (Thomas und Kopczak, 2005). Die Kernaufgaben sind ebenfalls vergleichbar: In beiden Fällen sind Vorbereitung, Planung, Transport, Lagerhaltung, Beschaffung, Auftragsabwicklung und Kundenservice wichtige Bestandteile der Logistik (Thomas und Kopczak, 2005). Ein entscheidender Unterschied ist jedoch die Motivation, die hinter den logistischen Prozessen steht: In der humanitären Logistik geht es darum, die notleidende Bevölkerung zu unterstützen (Thomas und Kopczak, 2005).

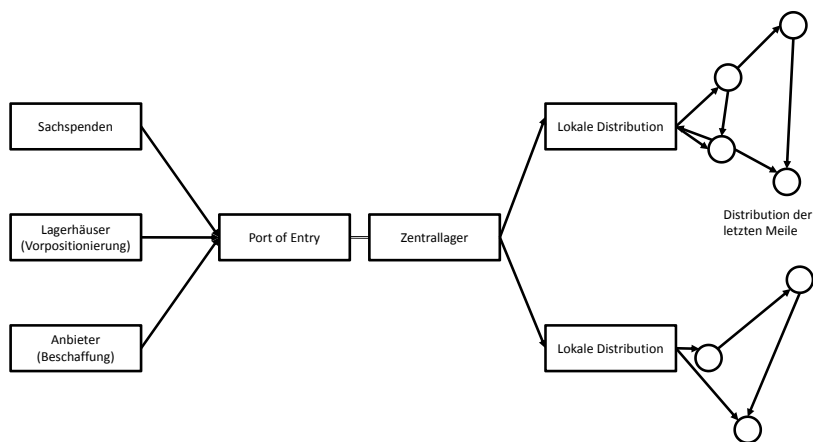


Abbildung 2.4.: Die Struktur einer humanitären Supply Chain nach Balçık und Beamon (2008)

In Abbildung 2.4 ist die typische Supply Chain einer humanitären Operation abgebildet. Der *Port of Entry* und das zentrale Lager liegen oft unmittelbar beieinander, von dort werden die Hilfsgüter in das betroffene Gebiet transportiert. Der Prozess der Herstellung wird in humanitären Lieferketten meist nicht berücksichtigt. Die Organisationen kaufen die Produkte von den Anbietern oder bekommen Spenden. Ein weiterer

Beschaffungsweg ist der Bezug über interorganisationale Lagerhäuser (WFP - World Food Programme, 2013). Ebenso wie in kommerziellen Lieferketten gibt es mehrere Stufen in der Supply Chain. Die Anbieter von Rohstoffen oder Bauteilen beliefern in der kommerziellen Supply Chain den Hersteller, der wiederum über ein Distributionszentrum die Kunden erreicht. In Abbildung 2.5 ist eine typische kommerzielle Supply Chain abgebildet. Dabei können weitere Distributionsstufen hinzu kommen, wie zum Beispiel Einzelhändler oder weitere Zwischenlager.

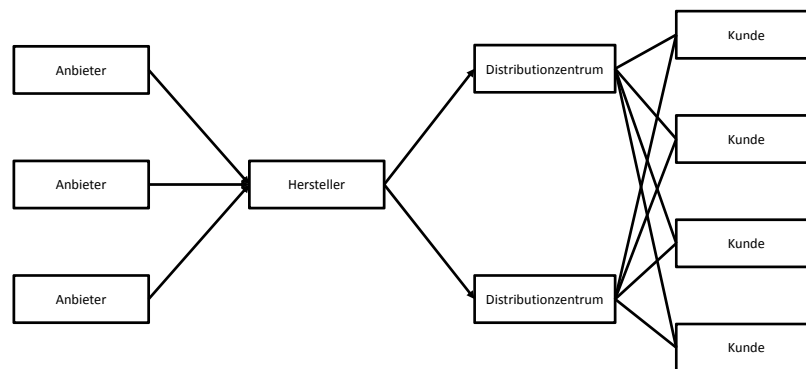


Abbildung 2.5.: Die Struktur einer kommerziellen Supply Chain nach Simchi-Levi u. a. (2003)

In kommerziellen Lieferketten gibt es drei Standardprozesse: Das Nachfragemanagement, das Angebotsmanagement und das Abwicklungsmanagement (Ernst, 2003). Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Befriedigung der Nachfrage. Sowohl die Kunden als auch die Anbieter haben hier gleichgerichtete Interessen. Als zusätzlicher Akteur tritt, auch in der humanitären Logistik, eventuell noch ein Logistikdienstleister auf, der die Schnittstelle zwischen Anbietern und Kunden abdeckt (Kovács und Spens, 2007). In humanitären Lieferketten sind hingegen viele unterschiedliche Akteure beteiligt, die unter normalen Umständen wenig miteinander zu tun haben. Zwei Gruppen von Akteuren können unterschieden werden, da sie unterschiedliche Blickwinkel auf die Katastrophe haben und somit auch unterschiedliche Strategien, um ihr zu begegnen: Zum einen gibt es die regionalen Akteure, wie Regierungen, das Militär, lokale Unternehmen und regionale Hilfsorganisationen. Auf der anderen Seite stehen die internationalen und somit externen Akteure, wie große Hilfsorganisationen, Nichtregierungsorganisationen und Logistikdienstleister (Kovács und Spens, 2007). Ausländisches Militär greift nur ein, wenn es vorher dazu aufgerufen wurde. Der Vorteil des Militärs ist es, dass es über ein Kommunikationssystem verfügt, das auch im Not-

fall funktioniert. Darüber hinaus sind beim Militär die Kapazitäten zur Planung und Durchführung der Logistik größer, als in Hilfsorganisationen. Außerdem ist das Wissen in Bezug auf logistische Problemstellungen wesentlich umfangreicher, als in den meisten humanitären Organisationen (Pettit und Beresford, 2005).

Nach Kovács und Spens (2007) sind vor allem die Regierung im eigenen Land, sowie die Logistikdienstleister und Einzelhändler wichtig für den Erfolg einer Hilfsaktion. Ein Beispiel dafür ist die Hilfsaktion nach dem Hurrikan Katrina in den USA, bei dem die lokalen Einzelhändler die ersten waren, die Hilfe geleistet haben (Leonard, 2005). Allerdings sind die Kapazitäten dieser Einzelhändler beschränkt und im schlechtesten Fall sind auch sie von der Katastrophe betroffen (Rowell, 2005; Garry, 2005). An diesem Punkt wird die Hilfe von international agierenden Logistikdienstleistern (wie zum Beispiel DHL) benötigt.

Das Fehlen einer zentralen Organisation erschwert oftmals die Hilfseinsätze und mangelnde Koordination zwischen den einzelnen Akteuren verschärft diese Schwierigkeiten (Long und Wood, 1995; Balçık u. a., 2010). Um diesem Missstand zu begegnen, hat die UN ein System zur Logistikkoordination in Katastrophengebieten entwickelt. Das Logistics Support System (LSS) soll die Kapazitäten der beteiligten Organisationen zusammenfassen, so dass die Auslastung des gesamten Hilfsnetzwerkes optimiert werden kann (Logistics Cluster, 2006). Auf der anderen Seite hat der dezentrale Einsatz der Hilfskräfte den Vorteil, dass räumlich verstreute, betroffene Personen besser erreicht werden (Long, 1997).

Ein entscheidender Unterschied zwischen humanitären und kommerziellen Lieferketten ist zudem, dass die „Kunden“ in humanitären Lieferketten keine Wahl haben, was sie für Güter erhalten. Damit liegt keine echte Nachfrage vor, wie es in kommerziellen Lieferketten der Fall ist (Long und Wood, 1995). Am Anfang einer Hilfsaktion werden vor allem Güter in das Land geschleust, ohne dass etwas konkret nachgefragt wird (*Push*-Mechanismus). Erst im Laufe der Hilfsaktion, wenn die Situation sich etwas stabilisiert hat, geht die Versorgung über in einen *Pull*-Mechanismus. Das bedeutet, dass Güter, die fehlen, direkt nachgefragt werden (Long und Wood, 1995; Jahre und Navangul, 2011).

Nach Cassidy (2003) ist die Unsicherheit der primäre Unterschied zwischen humanitärer und kommerzieller Logistik: In der kommerziellen Logistik gibt es eine fest definierte Anzahl an Herstellern, Anbietern und Kunden, die einen stabilen oder zumindest gut vorhersagbaren Bedarf an Gütern haben. All diese Faktoren sind in der

humanitären Logistik unbekannt: Das gilt für die Nachfrage sowohl in Bezug auf die Zeit, als auch die Menge und den Ort (Murray, 2005; Long und Wood, 1995; Sheu, 2007). Die weitreichenden Operationen müssen in einer unsicheren Umgebung ausgeführt werden (Beamon und Kotleba, 2006); so herrscht auf Seiten der Entscheidungsträger zum Beispiel oftmals keine Klarheit über die verfügbaren Logistikressourcen. Das ist ein Problem, dem in der kommerziellen Logistik eher selten begegnet werden muss (Sheu, 2007). Arminas (2005) drückt die Probleme humanitärer Logistiker folgendermaßen aus: „*Purchasing and logistics for major disaster relief is like having the client from hell - you never know beforehand what they want, when they want it, how much they want and even where they want it sent.*“ (Arminas, 2005). Alle genannten Aspekte führen dazu, dass humanitäre Lieferketten zu den agilsten Lieferketten der Welt zählen (Long und Wood, 1995). Erst in der Wiederherstellungsphase werden die Unsicherheiten in den Gegebenheiten geringer und die humanitären und kommerziellen Logistikprozesse nähern sich in ihrer Durchführung an (Kovács und Spens, 2007).

Eine besondere Schwierigkeit ist, dass einige Katastrophentypen vor allem in Entwicklungsländern mit ohnehin schon geschwächter Infrastruktur auftreten (Long und Wood, 1995; Sheu, 2007). Durch die Katastrophe wird die instabile Infrastruktur zusätzlich angegriffen und die Logistik muss dann unter sehr schlechten Bedingungen ausgeführt werden (Kovács und Spens, 2007). So haben bestimmte Katastrophen, wie zum Beispiel Fluten und Erdbeben, hier stärkere Auswirkungen als in stabilen Umgebungen (Kovács und Spens, 2007). Der in Krisengebieten oft vorherrschende Mangel an Elektrizität stellt eine zusätzliche Herausforderung dar (Kovács und Spens, 2007).

In Krisengebieten können politische Gründe für die Blockade von Hilfsleistungen verantwortlich sein, zum Beispiel indem Rebellen die Verteilung von Hilfsgütern an notleidende Teile der Bevölkerung verhindern. Aus diesem Grund nennen Tomasini und van Wassenhove (2004) die Entpolitisierung der Hilfsorganisationen als ein erstrebenswertes Ziel. Auch religiöse Motive können Hilfsoperationen behindern. Zudem erschweren Sprachbarrieren und kulturelle Unterschiede einen reibungslosen Ablauf vieler Operationen oder sollten zumindest als ein erschwerender Faktor berücksichtigt werden (Beamon, 2004; Long und Wood, 1995; van Wassenhove, 2006).

Auch wenn die Unterschiede zwischen kommerzieller und humanitärer Logistik nicht zu leugnen sind, kann ein wechselseitiges Lernen stattfinden (van Wassenhove, 2006). Nach Sowinski (2003) können traditionelle Logistiker von der humanitären Logistik, ihren flexiblen Strukturen und der Reaktion auf unvorhersehbare Ereignisse lernen.

Auch Charles u. a. (2010) betonen die Chancen, die sich für Unternehmen auftun, wenn sie bereit sind, in Bezug auf Agilität und Flexibilität von humanitären Logistikern zu lernen. Aufgrund der vergleichsweise rückständigen Logistik in humanitären Organisationen passiert das aktuell nur selten (Thomas und Kopczak, 2007). Humanitäre Organisationen setzen dagegen häufiger erprobte Prozesse aus der kommerziellen Logistik um (van Wassenhove und Pedraza Martinez, 2012). In der Katastrophenbewältigung können zum Beispiel Mechanismen aus dem Krisenmanagement oder aus dem Umgang mit Unterbrechungen von Lieferketten aus der kommerziellen Logistik als Vorbild dienen (Kovács und Spens, 2007). Nach Ernst (2003) können humanitäre Akteure auch in Bezug auf ihre Einstellung zu der Logistik von kommerziellen Logistikern lernen. Demnach sollten sie aufhören, die Logistik als ein notwendiges Übel, das Kosten verursacht, anzusehen und dazu übergehen, die Bedeutung der Logistik für den Erfolg einer Hilfsaktion anzuerkennen. Außerdem fehle es vielen Organisationen an praktischem und wissenschaftlichem Wissen, zum Beispiel im Bereich der mathematischen Optimierung (Gustavsson, 2003; Beamon und Kotleba, 2006). Bis heute werden die Supply Chain Prozesse überwiegend manuell abgewickelt und die Planung ist ungenügend, um im Katastrophenfall wirklich schnell agieren zu können (Kovács und Spens, 2007; Thomas, 2003). Obwohl viele Parallelen zu Risikomanagement, Krisenmanagement, Kontinuitätsplanung und Projektmanagement bereits aufgezeigt wurden, ist weitere Forschung notwendig, um die Möglichkeiten für die humanitäre Logistik nutzen zu können (van Wassenhove, 2006). Diese Arbeit soll hier einen Beitrag leisten.

2.4. Literaturüberblick und Motivation

Humanitäre Logistik ist ein relativ junges Forschungsfeld, dessen Popularität jedoch stetig zunimmt. In den letzten Jahren gab es zahlreiche Special Issues (Optimization in Disaster Relief (OR Spectrum, 2011), Doing Good with Good OR (Interfaces, 2011), Disaster Planning and Logistics (Socio-Economic Planning Sciences, 2012), Humanitarian Operations and Crisis Management (Production and Operations Management, 2012), Humanitarian Operations Management (International Journal of Operations and Quantitative Management, 2014)) und Konferenz-Sessions (Humanitarian Logistics and Development (International Conference for Markets and Development, 2012), Humanitarian Operations and Disaster Management (Annual Conference of the Production and Operations Management Society, 2012), Humanitarian Logistics

(TRANSLOG Conference, 2012), Humanitarian Logistics – Case Studies from Developing Regions (Annual Conference Production and Operations Management Society, 2014)) zu humanitärer Logistik. Auch die Anzahl an Dissertationen im Bereich der humanitären Logistik hat beachtlich zugenommen und eine Fachzeitschrift (Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management) sowie zahlreiche Konferenzen (zum Beispiel: Conference on Health and Humanitarian Logistics, Emergency Preparedness Conference, The World Conference on Disaster Management - Global Threats, Local Consequences, Information Systems for Crisis Response and Management Meetings) wurden initiiert.

In der Praxis der humanitären Logistik haben OR-Methoden noch keine weite Verbreitung. Dabei haben Entscheidungsträger es hier mit komplexen Netzwerken zu tun und Optimierung sowie insbesondere robuste Planung, also eine Planung, die auch bei Änderungen der Situation gültig bleibt, ist dringend erforderlich (Charles, 2010, S. 97ff; van Wassenhove, 2006). Die Bestimmung der Güterverteilung im Netzwerk, so dass diese effizient eingesetzt werden können und das System auch gegenüber Zwischenfällen robust ist, erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflussfaktoren und Zusammenhängen. Somit ist es dem Entscheidungsträger kaum möglich, anhand von Erfahrungswerten fundierte Entscheidungen zu treffen, die zukünftige Eventualitäten, Unsicherheiten und konkurrierende Zielsetzungen berücksichtigen. Darüber hinaus sind die Zielsetzungen in Projekten der humanitären Hilfe oft widersprüchlich: Zum Beispiel soll die Menge an bereit gestellten Hilfsgütern maximiert werden, die Antwortzeit ist zu minimieren und die Hilfsaktion soll kosten-optimal durchgeführt werden.

Gerade in komplexen Systemen benötigen Entscheidungsträger systematische und formalisierte Methoden zur Entscheidungsunterstützung (Comes, 2011, S. 29). Auch in der Praxis wird inzwischen ein vermehrter Einsatz von OR-Methoden in der humanitären Hilfe gefordert (Kengeya-Kayondo u. a., 2008). Optimierungsmethoden, die mehrfache Zielsetzungen berücksichtigen, können den Entscheidungsträger beim Ermitteln und Abwägen von Kompromisslösungen unterstützen (Wright u. a., 2009).

Die Anzahl der Artikel, die Entscheidungsunterstützung in humanitärem Kontext behandeln, ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. In einem Literaturüberblick über die Jahre 1980 bis 2005 haben Altay und Green III (2006) 109 Artikel identifiziert, die humanitäre Fragestellungen mit Methoden des Operations Research adressieren. Diese Arbeiten konzentrieren sich jedoch zum großen Teil auf Strategien zur Katastro-

phenvermeidung und zu geringeren Teilen auf vorbereitende Maßnahmen (also zum Beispiel auf Vorpositionierung und Standortplanung für die humanitäre Hilfe) sowie auf Maßnahmen zur Katastrophenbewältigung (Altay und Green III, 2006). Galindo und Batta (2013) haben aufbauend auf diesem Artikel einen Überblick über die Jahre 2005 bis 2010 zusammengestellt, der insgesamt 155 Artikel umfasst. Mit Berücksichtigung des deutlich kürzeren Zeitraums von fünf Jahren ist der Anstieg der Anzahl an Artikeln beträchtlich. Galindo und Batta (2013) haben eine Verschiebung der untersuchten Problemstellungen feststellen können. So wurden deutlich mehr Artikel zur Katastrophenvorsorge und -bewältigung veröffentlicht. Nachgelagerte Problemstellungen in der Wiederaufbauphase sind bis heute noch nicht ausgiebig erforscht worden (Kovács und Spens, 2007; Galindo und Batta, 2013). Komplexe Krisen, in denen während der langfristigen Wiederaufbauphase weitere Krisen eintreten, wurden in der Literatur bis heute kaum untersucht (de la Torre u. a., 2012). Gründe für den starken Fokus auf die Versorgung direkt nach einer Katastrophe sind die enormen Unsicherheiten und der sehr große Ressourcenfluss, die zu besonders interessanten Planungsproblemen führen und zahlreiche Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung bieten. Allerdings ist gerade im weiteren Verlauf einer Hilfsaktion das Budget knapp und die Notwendigkeit für eine optimale Verteilung der Ressourcen entsprechend groß (Holguín-Veras u. a., 2012).

Dasaklis u. a. (2012) haben in ihrem Artikel Literatur zusammengetragen, die Fragestellungen zur Kontrolle von Epidemien adressiert. Der Fokus des Literaturüberblicks liegt dabei auf Methoden zur Logistik-Planung für die resultierenden Problemstellungen. Sie heben dabei auch hervor, dass die Ausbreitung von Epidemien im Nachgang einer Katastrophe bis heute kaum untersucht wurde. Lediglich fünf Artikel wurden gefunden, von denen drei u.a. von der Autorin der vorliegenden Arbeit publiziert wurden. Die beiden anderen Artikel konzentrieren sich auf das Monitoring und die Kontrolle zur Vermeidung einer Epidemie in Flüchtlingslagern (Moore u. a., 1990) und die Wirksamkeit von oralen Impfungen zur Bekämpfung von Cholera nach Naturkatastrophen (Date u. a., 2011). Dasaklis u. a. (2012) stellen die Relevanz logistischer Fragestellungen, die im Zuge einer Epidemieausbreitung während einer laufenden Hilfsaktion auftreten, explizit heraus. Darüber hinaus stellen die Autoren konkret sowohl die Lieferstrategien während einer Epidemie, als auch die Untersuchung von zentralen, im Gegensatz zu dezentralen Strukturen, als relevante Forschungsschwerpunkte heraus.

Nach Jahre u. a. (2009) und Holguín-Veras u. a. (2012) ist das Zusammenspiel zwischen langfristigen Infrastrukturen in Entwicklungsprojekten und temporären Netzwerken, zum Beispiel als Reaktion auf eine Naturkatastrophe, ein wichtiges Forschungsfeld. Wenn das Netzwerk als Kombination aus Ressourcen aufgefasst wird, geht es bei der Verbindung von temporären Strukturen und längerfristigen Supply Chains um die Neuordnung oder Allokation dieser Ressourcen (Jahre u. a., 2009). Die Wechselwirkungen von Entwicklungshilfe und Katastrophenhilfe werden zum Beispiel von Besiou u. a. (2010) untersucht. Bei der Gestaltung von Hilfsnetzwerken wird immer nach einem Kompromiss zwischen der Fähigkeit, auf Zwischenfälle und Katastrophen schnell zu reagieren und dem effizienten Einsatz von Budget gesucht (Besiou u. a., 2010). Die Lagerung in dezentralen Strukturen nahe den Endverbrauchern minimiert die Antwortzeiten auf eine Katastrophe und die Beschaffung kann zu einem Zeitpunkt durchgeführt werden, zu dem die Kapazitäten ausreichend sind. In der humanitären Logistik wird diese Positionierung der Hilfsgüter möglichst nahe der Bedarfsorte als Vorpositionierung bezeichnet (Rawls und Turnquist, 2010). Durch diese Strategie werden jedoch die Menge an Hilfsgütern in den Lagern und dadurch die Kosten für die Lagerhaltung sowie Kosten für eventuelle Umverteilungen erhöht (Holguín-Veras u. a., 2012). Letztere fallen an, wenn die Vorpositionierung nicht dem tatsächlichen Bedarf entspricht und aus diesem Grund im Laufe der Hilfsaktion Güter umverteilt werden müssen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass in einer gefährdeten Region wider Erwarten keine Katastrophe eintritt und die Hilfsgüter somit nicht benötigt werden. Vor allem die Vorpositionierung verderblicher Güter ist somit nur nach gründlicher Evaluierung vertretbar. Alternativ gibt es die Möglichkeit, Entscheidungen, die die Logistik betreffen, zeitlich möglichst weit nach hinten zu verlagern. Dadurch wird das Risiko, dass umdisponiert werden muss, minimiert und es werden Lagerhaltungskosten gespart. Allerdings muss der Transport ad hoc durchgeführt werden, was zu Kapazitätsengpässen und erhöhten Transport- und Beschaffungskosten führen kann (Jahre u. a., 2009).

Holguín-Veras u. a. (2012) nennen speziell die Allokation von Ressourcen unter Berücksichtigung von Kosten für Nachfrage, die nicht befriedigt werden kann, als einen wichtigen Forschungsschwerpunkt. Dabei heben sie hervor, dass die Vorpositionierung ein adäquates Mittel zur Beschleunigung der Reaktionszeit ist, auch wenn die Unsicherheit in der betrachteten Fragestellung groß ist. Dasaklis u. a. (2012) bezeichnen vor allem die Abwägung der Lagerstrategie zwischen einer zentralen und einer de-

zentralen Struktur als wichtigen Untersuchungsgegenstand. Pläne, die auf Grundlage falscher oder nicht exakter Daten erstellt werden, helfen dabei nach Holguín-Veras u. a. (2012) immer noch mehr als rein reaktives Handeln. Allerdings stellen sie auch deutlich heraus, dass dynamische Lösungen erforderlich sind, damit auf Änderungen in der Planungssituation reagiert werden kann. Wichtig ist dabei, dass die Entscheidungen schnell getroffen werden, also ohne die Situation vor Ort detailliert analysieren zu müssen, da diese Zeit zur Verteilung der Hilfsgüter anstatt zur Datenaufbereitung genutzt werden sollte (de la Torre u. a., 2012).

Aufgrund der geringen Qualität der verfügbaren Daten und der Zeitrestriktionen kann Optimalität der Lösung nicht das Ziel sein. Diese würde aufgrund der Unsicherheiten, mit denen der Entscheidungsträger in der vorliegenden Situation konfrontiert ist, ohnehin lediglich zur Vortäuschung falscher Sicherheit führen (World Health Organization, 2005). Es kann nicht exakt prognostiziert werden, wo und wann weitere Hilfsgüter benötigt werden, denn die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines konkreten Zwischenfalls sind dafür zu gering. Dass ein weiterer Zwischenfall in einer der Regionen und Perioden auftreten wird, ist auf der anderen Seite recht wahrscheinlich und dieses Risiko von *Overlapping Disaster* sollte demnach berücksichtigt werden (Makridakis u. a., 2009). Die Distributionsplanung bezieht also im besten Fall das Risiko zukünftiger Unterbrechungen der Hilfsaktion mit ein (Makridakis u. a., 2009). Dafür sollen in dieser Arbeit Handlungsvorschläge erarbeitet werden, die der Entscheidungsträger anschließend mit seinem Wissen über die betroffene Region und seinen Erfahrungswerten evaluieren kann, um so zu einer gut begründeten Entscheidung zu kommen. Den Entscheidungsträger allein auf seinen Erfahrungswerten basierend planen zu lassen, ist keine geeignete Alternative, da die Fehleranfälligkeit aufgrund von Zeitdruck und Emotionen sowie der Unsicherheiten und zahlreichen Restriktionen, die erfasst werden müssen, zu groß ist (Besiou u. a., 2010; Comfort u. a., 2013).

2.5. Abgrenzung zu anderen Forschungsgebieten

Planungsprobleme aus der kommerziellen Logistik, die Ähnlichkeiten mit der hier betrachteten Forschungsfrage haben, sind zum Beispiel die Distribution im Einzelhandel und das Ersatzteilmanagement. Lagerhaltungsprobleme bei sporadischer Nachfrage weisen ebenfalls ähnliche Charakteristika auf. Darüber hinaus kann auch die Lokation und Allokation von Notfallressourcen, wie zum Beispiel Krankenwagen, als ver-

wandtes Themengebiet betrachtet werden. Eine Übersicht der Planungsprobleme mit ähnlichen Charakteristiken ist in Abbildung 2.6 gegeben. Im Folgenden werden die Planungsprobleme und einige Modellierungs- und Lösungsansätze genauer vorgestellt. Anschließend wird beschrieben, welche Methoden (nach eventuell notwendigen Anpassungen) auf das hier untersuchte Problem angewendet werden können und an welchen Punkten die Unterschiede in den Planungsproblemen oder getroffenen Annahmen zu groß sind, um eine Übertragbarkeit herzustellen.

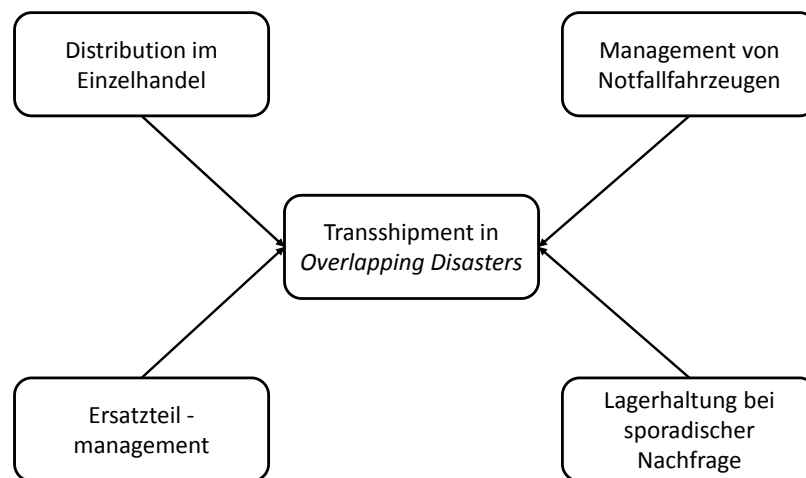


Abbildung 2.6.: Verwandte Planungsprobleme

Archibald (2007) und Archibald u. a. (2010) untersuchen die Distribution zwischen Einzelhändlern. Die Einzelhändler bekommen in regelmäßigen Abständen Lieferungen und in der Zwischenzeit müssen sie zufällig auftretende Nachfragen befriedigen. Hierbei können nachgefragte Mengen, die über den Lagerbestand hinaus gehen, auch von anderen Einzelhändlern oder aus einem zentralen Lager befriedigt werden. Ersteres ist deutlich günstiger, allerdings muss dabei die Gefahr von Bestandsengpässen an den jeweiligen Standorten berücksichtigt werden. Herer u. a. (2006) betrachten ebenfalls ein Distributionsproblem von Einzelhändlern. Sie bestimmen eine Lagerhaltungspolitik unter unsicherer Nachfrage. Auch hier kann Nachfrage von umliegenden Einzelhändlern befriedigt werden oder durch Nachbestellung, was jedoch Strafkosten verursacht. Auch in diesen Modellen soll ein Kompromiss zwischen Kundenservice und Kosten gefunden werden. Allerdings führt der andere Hintergrund in der kommerziellen Logistik zu Annahmen bezüglich des Nachfrageaufkommens, die auf die in dieser Arbeit betrachteten Fragestellungen nicht anwendbar sind (Besiou u. a., 2010; Holguín-Veras

u. a., 2012). So nehmen Bertrand und Bookbinder (1998) eine normalverteilte Nachfrage an, die bei Engpässen durch Umverteilung zwischen den Einzelhändlern gedeckt werden kann. Hat die verspätete oder nicht erfolgte Nachfragedeckung in der kommerziellen Logistik Umsatzausfälle zur Folge, führt sie in der humanitären Logistik im schlimmsten Fall zu Toten in der betroffenen Region (Overstreet u. a., 2011). Die Prioritäten unterscheiden sich also stark. Das macht eine sorgfältige Prüfung der Anwendbarkeit von Methoden aus dem kommerziellen Bereich notwendig und erfordert darüber hinaus die Modifikation und Anpassung dieser Methoden. Nichtsdestotrotz wird das Modell von Herer u. a. (2006) als Grundlage für das hier entwickelte mathematische Optimierungsmodell genutzt. Dafür wird es in Abschnitt 4.1.2 ausführlich vorgestellt.

Hua u. a. (2009) nutzen rollierende Planung zum Ersatzteilmanagement mit stochastisch auftretender Nachfrage. Der Fokus liegt in ihrer Arbeit auf der kostenoptimalen Bereitstellung von Ersatzteilen und somit beschränken sie sich auf ein Lagerhaltungsmodell, berücksichtigen Lieferzeiten und minimieren sowohl Lagerhaltungskosten als auch fixe Bestellkosten. Nicht befriedigte Nachfrage bleibt in dem Modell von Hua u. a. (2009) bestehen und kann in zukünftigen Perioden befriedigt werden, allerdings werden dafür Strafkosten in der Zielfunktion berücksichtigt. Sie entwickeln ein stochastisches Modell, mit Zufallsvariablen für die Nachfrage, die normalverteilte Werte annehmen. Stochastische Optimierung kann jedoch in humanitären Fragestellungen oftmals nicht angewendet werden, da Variablenausprägungen nicht durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen ausgedrückt werden können (Ben-Tal u. a., 2011). Das liegt an der Seltenheit der Ereignisse, die aber auf der anderen Seite sehr große Auswirkungen haben (Lodree Jr. und Taskin, 2008). Darüber hinaus treten Bedarfe in benachbarten Regionen nicht unabhängig voneinander auf, was dazu führt, dass Verteilungen für unabhängige Ereignisse nicht anwendbar sind.

Die Variabilität in der Nachfrage in humanitären Fragestellungen ist am ehesten vergleichbar mit den Anforderungen beim Management von Ersatzteilen. Auch entstehen im Fall von fehlenden Ersatzteilen teure Standzeiten von Maschinen, die unbedingt zu vermeiden sind (Dada, 1992). Auf der anderen Seite sind Ersatzteile in der Regel nicht verderblich, so dass sie beliebig lange gelagert werden können. Von zu hohen Beständen ist trotzdem abzusehen, aufgrund der Kapitalbindung und da die Maschinen im Laufe der Zeit durch technischen Fortschritt vollständig ersetzt werden müssen. Statt dessen werden auch im Ersatzteilmanagement laterale Transportbeziehungen mit kür-

zieren Distanzen ausgenutzt, um eine schnelle Bereitstellung der Teile zu gewährleisten (Lee, 1987; Axsäter, 1990). Dabei muss eine weitere Differenzierung vorgenommen werden, nämlich die der Nachfragemengen. Üblicherweise fehlen nur einzelne Teile zur Reparatur einer Maschine, die dann bestellt werden. In dem hier betrachteten Planungsproblem werden dagegen tiefgreifende Störungen in der Versorgung ohnehin unterversorgter Bevölkerungsteile betrachtet, es stellt sich demnach nicht die Frage, ob ein Gut benötigt wird oder nicht, sondern ob hunderte Hilfsgüter fehlen. Zudem tritt in dem in dieser Arbeit betrachteten Planungsproblem eine deterministische Nachfrage zur Weiterführung der bereits laufenden Hilfsaktion auf. Lediglich die darüber hinaus durch zusätzliche Ereignisse auftretende Nachfrage ist nicht kalkulierbar. Dementsprechend gibt es auch einen konstanten Bestand in den Lagern, der zum Ausgleich der Nachfrageschwankungen genutzt werden kann, der jedoch in der Regel nicht ausreicht die gesamte Nachfrage zu decken.

Wird die deterministisch gegebene Nachfrage und der Bestand zur Befriedigung dieser außer Acht gelassen, weist das Problem Ähnlichkeiten zu einem Lagerbestandsproblem für sporadische Nachfrage auf. In der Lagerhaltung wird bei schwankender Nachfrage oftmals nach jeder Transaktion eine Nachbestellung angesetzt, um das Lager wieder aufzufüllen (Schultz, 1987). Dieses Vorgehen wird von Schultz (1987) jedoch kritisiert, da es zu erhöhten Lagerbeständen und somit Kosten führt. Er schlägt daher vor, die Entscheidung weiter hinauszuzögern. In der hier betrachteten Fragestellung können laufend neue Informationen verfügbar werden. Aus diesem Grund wird nicht auf das Auftreten erneuter Zwischenfälle gewartet, sondern es wird ein proaktives Vorgehen angestrebt. Die von Schultz (1987) vorgeschlagene Methode, die Bestellung soweit wie möglich nach hinten zu verlegen, um Lagerhaltungskosten zu sparen, ist nur in Planungsproblemen anwendbar, bei denen die Lieferzeiten im Verhältnis zu den Zeiträumen zwischen den Nachbestellungen gering und die Kosten für Bestellungen in Relation zu den Lagerhaltungskosten niedrig sind (Schultz, 1987). Beides ist in dem hier betrachteten Planungsproblem nicht gegeben, da gerade nach dem Auftreten eines Zwischenfalls das Risiko weiterer Unterbrechungen der Hilfsaktion nicht unberücksichtigt bleiben darf.

Ein weiteres Problem bzgl. der Lagerhaltungsmodelle aus der kommerziellen Logistik sind die verbreiteten Forecastingmethoden, die nur Vergangenheitswerte zur Voraussage von zukünftigen Ereignissen berücksichtigen. Diese Vereinfachung lässt viele mögliche Entwicklungen unberücksichtigt (Garvin und Levesque, 2006, S. 1). Aus diesem Grund

wird in der vorliegenden Arbeit die Fragestellung mit Methoden der Szenariotechnik adressiert. Auch zur Anwendung von Methoden zur Szenariogenerierung werden Daten benötigt, die im humanitären Kontext nur selten in verwendbarer Form vorliegen. Oft sind nur Daten verfügbar, deren Richtigkeit nicht oder nur unter hohem Aufwand verifiziert werden kann. Widersprüchliche Daten und Informationen erschweren eine Planung zusätzlich (Nissen, 2012).

Federgruen und Zipkin (1984) präsentieren ein Modell zur Allokation von knappen Ressourcen unter Berücksichtigung von Strafkosten bei unbefriedigter Nachfrage. Die Nachfrage ist zufallsverteilt und soll durch Belieferung der Standorte vorab möglichst exakt gedeckt werden, um sowohl unbefriedigte Nachfrage als auch Lagerhaltungskosten zu minimieren. Auch Taskin und Lodree (2010) berücksichtigen in ihrem stochastischen Modell Unsicherheiten in der Nachfrage. Es sollen Vorpositionierungsentscheidungen getroffen werden, um die Nachfrage nach lebensnotwendigen Gütern während der Hurrikan-Saison möglichst gut abdecken zu können. Die Autoren modellieren einen stochastischen regulären Bedarf und darüber hinaus die Möglichkeit plötzlicher Nachfragespitzen. Das Modell adressiert allerdings nur Lagerhaltungsentscheidungen von kommerziellen Anbietern in der Hurrikan-Saison. Es werden also monetäre Zielsetzungen betrachtet und in der Regel geht es auch nicht um Menschenleben, wenn die Nachfrage nicht erfüllt werden kann.

Die Betrachtung knapper Ressourcen bei unsicherer Nachfrage ist auch aus der Einsatzplanung von Notfallfahrzeugen bekannt. Es entsteht eine vergleichbare Planungssituation: Feuerwehreinsätze müssen so geplant werden, dass weitere Ressourcen für eventuell folgende Brände zur Verfügung stehen oder es müssen zumindest Pläne vorhanden sein, von welchen Notfallstationen Fahrzeuge angefordert werden können (Andersson Granberg und Värbrand, 2007). Das Abwägen, wie viele Ressourcen im aktuellen Notfall zum Einsatz kommen dürfen und wie viele in der Station verbleiben, ist ein etabliertes Forschungsfeld (Batta und Mannur, 1990; Andersson Granberg und Värbrand, 2007). Dabei muss jedoch nach dem jeweiligen Umfeld differenziert werden. In urbanen Umgebungen tritt selten ein Engpass an Einsatzfahrzeugen auf, denn es wird für eine mehrfache Abdeckung der möglichen Nachfragepunkte gesorgt. Das bedeutet, dass potenzielle Einsatzorte immer von mehreren Standorten aus bedient werden können, bzw. mehrere Fahrzeuge an einer Station positioniert sind, die die Nachfrageorte bedienen können. Anders sieht es in ländlichen Gebieten aus, wo eine mehrfache Abdeckung möglicher Einsatzorte nicht sichergestellt werden kann. In die-

sen Gegenden müssen gegebenenfalls weiter entfernte Ressourcen angefragt werden, die dann an anderer Stelle fehlen (Batta und Mannur, 1990).

Auch etablierte Strukturen der Entscheidungsfindung können in der humanitären Logistik oftmals nicht angewendet werden. Im kommerziellen Supply Chain Management können Entscheidungen zentralisiert getroffen und anschließend auf allen Ebenen umgesetzt werden. In der humanitären Hilfe fehlen dazu die Kommunikationsmechanismen. Potentiellen Entscheidungsträgern höherer Hierarchieebenen fehlt das Wissen um die Lage vor Ort und die Kommunikation dieser ist oftmals kompliziert, vor allem in Situationen unter großen Unsicherheiten und hoher Komplexität (Thévenaz und Resodihardjo, 2010). Aufgrund dessen müssen Entscheidungen oft dezentral vor Ort getroffen werden (Hiltz u. a., 2013). Die entsprechenden Entscheidungsträgern haben oftmals weder eine logistische Ausbildung, noch Fachwissen über theoretische Entscheidungsfindung (Overstreet u. a., 2011). Es besteht daher die Notwendigkeit, neue Methoden zur Entscheidungsunterstützung zu entwickeln, die sowohl die geforderte Einfachheit der Anwendung als auch die Komplexität und Unsicherheit der vorliegenden Situation berücksichtigen (Comfort u. a., 2013).

Aufgrund der strukturellen Analogien zu nicht humanitären Planungsproblemen in der Logistik, können bewährte Methoden angepasst und eingesetzt werden, um das vorliegende Planungsproblem anzugehen. Aspekte zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Nachfrageentwicklung sowie Methoden zur Allokation von Ressourcen können also übernommen und auf humanitäre Fragestellungen angepasst werden, eine direkte Anwendbarkeit der Modelle aus der kommerziellen Logistik auf diese Fragestellungen ist jedoch nicht gegeben. So werden Methoden aus dem Einzelhandel angewandt und auf die Charakteristika in *Overlapping Disaster* Situationen so angepasst, dass die starke Unsicherheit und die Ressourcenknappheit berücksichtigt wird. Die mithilfe dieser Methoden zu analysierende Forschungsfrage wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

2.6. Forschungsfrage und Zielsetzung

Bei der Betrachtung von *Overlapping Disasters* müssen mehrere Planungsprobleme gleichzeitig gelöst werden. Während die laufende Hilfsaktion weitergeführt wird, muss auf die akute Störung reagiert werden und gleichzeitig müssen mögliche zukünftige Entwicklungen mit einbezogen werden. Das hohe Maß an Unsicherheit über zukünftige

ge Entwicklungen und die Knappheit der Ressourcen führt zu wissenschaftlich interessanten und praktisch relevanten Problemstellungen.

In dieser Arbeit wird untersucht, wie viel insgesamt von einem bestimmten Hilfsgut, bei eingeschränktem Budget, beschafft werden soll, wo Güter positioniert werden sollen und wie Ressourcen in der Situation von *Overlapping Disasters* umverteilt werden sollen, um eine möglichst gute Versorgung der akut betroffenen Bevölkerung zu gewährleisten und gleichzeitig zukünftige Unsicherheiten abzufedern. Dafür wird ein Kompromiss zwischen der maximalen Absicherung vor zukünftiger unbefriedigter Nachfrage und minimalen Logistikkosten gesucht. Die Priorität liegt dabei auf der Minimierung der unbefriedigten Nachfrage.

Die zu untersuchende Problemstellung kann in folgende Teilaspekte (TA) gegliedert werden:

- TA1** Berücksichtigung von Unsicherheiten in Bezug auf zukünftige Entwicklungen der aktuellen Situation in der Entscheidungsfindung.
- TA2** Abwägung zwischen der Minimierung unbefriedigter Nachfrage, die eventuell in zukünftigen Perioden auftritt, und der Minimierung von Logistikkosten.
- TA3** Bestimmung der insgesamt benötigten Menge an Hilfsgütern und die Bestimmung der Positionierung der Hilfsgüter in einem gegebenen Distributionsnetzwerk.
- TA4** Bereitstellen einer einfachen Entscheidungsunterstützung für den Entscheidungsträger, um die benötigte Zeit sowie den Aufwand zur Datensammlung und -analyse zu minimieren.

Die Forschungsfrage wird anhand einer Fragestellung aus Ostafrika untersucht. Konkret geht es um das Auftreten einer Epidemie in dem vom Bürgerkrieg betroffenen Land Burundi. Die ärztliche Versorgung der Bevölkerung ist grundsätzlich schon mangelhaft. Den Epidemien, die immer wieder ausbrechen, kann das Land aus eigener Kraft nicht begegnen. Internationale Hilfe ist also notwendig. Für Hilfsprojekte dieser Art ist das Budget in der Regel jedoch so knapp, dass die ärztliche Versorgung der Bevölkerung mit minimalen Mitteln ermöglicht werden muss. Es geht also um einen effizienten Einsatz der Ressourcen, so dass möglichst viele Menschen versorgt werden und gleichzeitig weiteren Ausbreitungen der Epidemie besser begegnet werden

kann. Entscheidungen über die Menge an benötigten Medikamenten zur Versorgung der Bevölkerung sowie die Positionierung dieser im Land müssen schnell und in der Regel von einem Entscheidungsträger vor Ort, der über keinen Zugang zu umfangreichen Informationen und Daten verfügt, getroffen werden. Die Entscheidungsfindung soll dafür möglichst gut vorbereitet werden. Diese Situation wird beispielhaft im Detail untersucht, um anhand der Erkenntnisse allgemeine Entscheidungsgrundlagen für *Overlapping Disasters* zu definieren.

Die Untersuchung der Distribution zur Reaktion auf Epidemien, vor allem im Nachgang von Katastrophen, bedarf nach Meinung von Dasaklis u. a. (2012) eingehender Forschung. Die Autoren kommen nach einer ausführlichen Literaturrecherche darüber hinaus zu dem Ergebnis, dass die Reaktion auf Epidemien in einem Krisenumfeld bis heute kaum untersucht wurde. Mithilfe der Erfüllung der vier Teilaspekte sollen also Handlungsempfehlungen an den Entscheidungsträger vor Ort vorbereitet werden, die er in einer *Overlapping Disaster* Situation nutzen kann, um fundierte Entscheidungen zu treffen. Im folgenden Abschnitt 2.7 werden die Methoden eingeführt, die zur Erfüllung der Teilaspekte angewandt werden.

2.7. Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit

Zur Untersuchung der in Abschnitt 2.6 definierten Forschungsfrage werden Methoden des Operations Research (OR) eingesetzt. Auf der Webseite der Gesellschaft für Operations Research heißt es: „*Unter Operations Research (OR) wird allgemein die Entwicklung und der Einsatz quantitativer Modelle und Methoden zur Entscheidungsunterstützung verstanden*“ (GOR, 2012). Müller-Merbach (1973, S. 1) definiert OR als die „... *Anwendung von mathematischen Methoden zur Vorbereitung optimaler Entscheidungen...*“. Eben diese Vorbereitung optimaler (oder im Fall der humanitären Logistik, aufgrund der Komplexität und Unsicherheit, guter) Entscheidungen soll hier durchgeführt werden. Die Operations Research Society of America fügt hinzu, dass zu treffende Entscheidungen sich meistens, wie auch in dieser Arbeit, auf die Allokation von knappen Ressourcen beziehen (Eiselt und Sandblom, 2010, S. 1).

Sechs Phasen werden zur Lösung der im vorherigen Kapitel aufgestellten Fragestellung durchlaufen (Ackoff, 1956):

1. In diesem Kapitel wurde bereits die Problemstellung definiert und abgegrenzt.

2. Anschließend wird ein mathematisches Modell aufgestellt, welches alle relevanten Aspekte der Problemstellung umfasst.
3. Das Modell wird für verschiedene Szenarien gelöst.
4. Die Lösungen der Szenarien werden auf Korrektheit und Anwendbarkeit geprüft.
5. Durch Variation der veränderbaren Parameter werden verschiedene Lösungen erzeugt.
6. Die Anwendbarkeit in praktischen Problemstellungen wird durch Vereinfachung der Lösungen, die mit dem Optimierungsmodell ermittelt wurden, vorbereitet.

Nach Ackoff (1956) sollte dabei stets berücksichtigt werden, dass ein Modell immer nur ein Ausschnitt aus der Realität sein kann. Ein gutes Modell ermöglicht trotzdem die Untersuchung der Auswirkungen von Entscheidungen auf zukünftige Entwicklungen. Das ist nur möglich, wenn alle relevanten Zusammenhänge abgebildet werden. Es muss also zwischen wichtigen und unwichtigen Variablen sowie Relationen unterschieden werden, damit ein Modell anwendbar wird. Das Modell ist dann der Realität strukturähnlich (homomorph) oder sogar -gleich (isomorph) (Werners, 2008, S. 5f). Dabei kann es durchaus passieren, dass die Ressourcen zu knapp sind, um exakte Lösungen zu generieren und stattdessen schnelle und dafür nicht optimale Lösungen bevorzugt werden (Ackoff, 1956).

Die Situation, mit der sich der Entscheidungsträger in der vorliegenden Problemstellung konfrontiert sieht, ist diskreter Natur, weil es nur eine endliche Anzahl an Möglichkeiten gibt, die Hilfsgüter zu positionieren und zu transportieren. Dennoch ist die Menge an Möglichkeiten, die der Entscheidungsträger hat, zu groß um sie vollständig aufzuführen. Das liegt an der Unsicherheit in Bezug auf zukünftige Entwicklungen der Umweltzustände; denn es sind prinzipiell beliebig viele Entwicklungen denkbar. Um diese abzubilden, werden Szenarien generiert, die für die Alternativen verschiedene Konsequenzen aufweisen. Für jedes dieser Szenarien gibt es einen eigenen Distributionsplan. Aufgrund der großen Anzahl möglicher Handlungsalternativen ist das Mittel der Wahl zur Lösung des Problems mathematische Optimierung. Eine Besonderheit der hier betrachteten Fragestellung ist zudem die Dynamik, mit der neue Informationen verfügbar werden. Um diese in die Entscheidungsfindung mit einzubeziehen, wird die in der Produktionsplanung etablierte rollierende Planung eingesetzt und es

werden Lösungen für die sich laufend ändernde Planungssituation gesucht (Hua u. a., 2009). Wie im Abschnitt 2.6 bereits aufgeführt, müssen in dieser Arbeit mehrere Zielsetzungen (Kriterien) berücksichtigt werden, so dass verschiedene Methoden der multikriteriellen Optimierung angewendet werden. Multikriterielle Entscheidungsfindung und Szenariotechnik ergänzen sich nach Wright u. a. (2009) sehr gut, um in komplexen Situationen unter großer Unsicherheit begründete Entscheidungen zu treffen.

In dieser Arbeit wird wie folgt vorgegangen: Das Planungsproblem muss zur Anwendung dieser Methoden zunächst soweit vereinfacht werden, dass es mathematisch darstellbar ist. Dafür wird, wie bei Herer u. a. (2006), ein Netzwerk mit allen relevanten Transport- und Lagerbeziehungen formuliert. Anschließend werden die Zielsetzungen formuliert und es wird das multikriterielle Optimierungsmodell *mHumLog* entwickelt, mit dem *Overlapping Disaster* Situationen untersucht werden können. Zur Lösung des Modells mit geeigneter Software werden dann Methoden der multikriteriellen Optimierung implementiert. Das Netzwerkflussmodell wird mit zwei Methoden zur multikriteriellen Optimierung gelöst, zum einen mit der Methode der gewichteten Summe und zum anderen mit der *Constraint* Methode. Zur Lösung des Problems mit der gewichteten Summe werden, wie zum Beispiel bei Hua u. a. (2009), Strafkosten zur Vermeidung unbefriedigter Nachfrage eingesetzt. Dabei werden die Lösungen für verschiedene Parametereinstellungen generiert und miteinander verglichen. Eine ausführliche Erläuterung der Methoden zur Lösung multikriterieller Probleme und ihrer Anwendung in dieser Arbeit erfolgt in den Kapiteln 3 und 4.

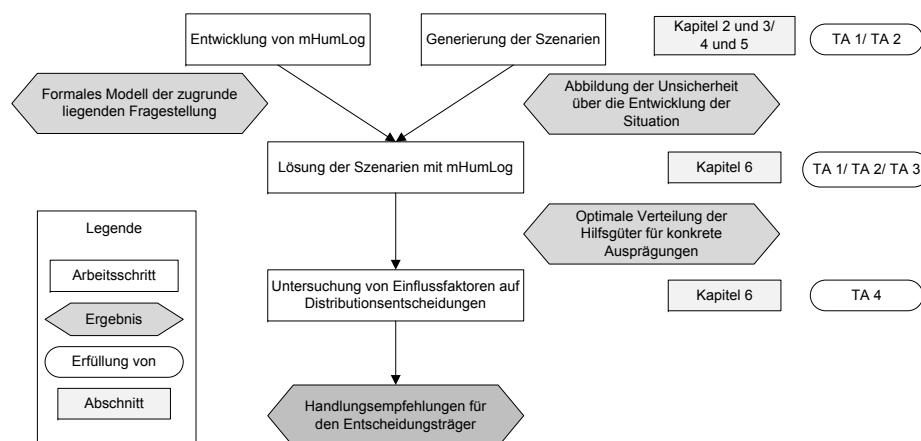


Abbildung 2.7.: Einzelne Arbeitsschritte zur Erfüllung der Teilaspekte

In Abbildung 2.7 ist eine Übersicht der angewendeten Methoden gegeben. Darüber hinaus sind die mit den Methoden erfüllten Teilaspekte angegeben sowie die Kapitel, in denen der entsprechende Arbeitsschritt durchgeführt wird. Die Anwendung von Szenarien ermöglicht es, Unsicherheiten in der Planung zu berücksichtigen, die nicht quantifiziert werden können (Bunn und Salo, 1993). Gerade in sehr unsicheren Entscheidungssituationen können Szenarien helfen, robuste Lösungen zu finden (Wright u. a., 2009). Das Modell *mHumLog* ermittelt für jedes dieser Szenarien einen Distributionsplan, wodurch eine sehr große Anzahl verschiedener Pläne erzeugt wird (Erfüllung von TA 1 und 3). Dabei wird für jedes Szenario ein Kompromiss zwischen den konkurrierenden Zielen ermittelt und somit der TA 2 berücksichtigt. Um für den Entscheidungsträger diese große Anzahl an Alternativen handhabbar zu machen, werden Gruppen ähnlicher Situationen gebildet, die zu gleichen Handlungsempfehlungen führen. Der Entscheidungsträger wählt dann, aufgrund seiner Erfahrungswerte, eine der vorgeschlagenen Handlungsalternativen aus. Dabei muss er nicht mehr unter einer unübersichtlichen Anzahl von Handlungsalternativen wählen, sondern bekommt eine komprimierte Auswahl präsentiert. Damit wird der TA 4 erfüllt, welcher fordert, dass durch die Bereitstellung von Regeln eine vereinfachte Entscheidungsfindung ermöglicht wird.

Die Arbeit gliedert sich daher wie folgt: Das Kapitel 3 widmet sich der multikriteriellen Entscheidungsfindung und stellt Methoden zur Lösung multikriterieller Probleme vor. Darüber hinaus werden Zielsetzungen aus der humanitären Logistik eingeführt und Methoden betrachtet, die zur Lösung humanitärer Fragestellungen Anwendung finden. Darauf aufbauend wird in Kapitel 4 das Modell zur Distributionsplanung in *Overlapping Disasters* präsentiert und Methoden zur Lösung des multikriteriellen Modells werden vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 5 die Szenariotechnik eingeführt. In Kapitel 6 wird die Anwendung von Szenarien in der humanitären Logistik diskutiert, bevor ein konkreter Anwendungsfall und die für diesen generierten Szenarien vorgestellt werden. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse für die gelösten Szenarien mit den zwei Methoden zur Lösung des multikriteriellen Modells präsentiert und miteinander verglichen. Die Ergebnisse werden anschließend analysiert und darauf aufbauend werden Handlungsalternativen für *Overlapping Disaster* Situationen definiert und bewertet. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weiterführende Fragestellungen.

2. Multikriterielle Entscheidungsfindung

3. Grundlagen multikriterieller Entscheidungsfindung und Anwendung in der humanitären Logistik

Viele Entscheidungsprobleme haben verschiedene Kriterien bzw. Zielsetzungen, die bei ihrer Lösung berücksichtigt werden sollen. Widersprechen sich die Lösungen, die bei Verfolgung der einzelnen Ziele generiert werden, müssen Methoden multikriterieller Entscheidungsfindung angewandt werden, um einen Kompromiss zwischen den Kriterien zu ermitteln. In der humanitären Logistik ist es vor allem der Widerspruch zwischen einer möglichst flächendeckenden Versorgung der Bevölkerung mit lebensnotwendigen Hilfsgütern und der Einhaltung von Budgetrestriktionen aufgrund knapper Ressourcen, der zur Anwendung multikriterieller Entscheidungstheorie führt. Mittels multikriterieller Entscheidungsunterstützung können verschiedene Alternativen im Kontext mehrerer Zielsetzungen einander gegenüber gestellt werden. Dem Entscheidungsträger wird somit eine fundierte Entscheidungsfindung ermöglicht (Belton und Stewart, 2002, S. 1f).

In diesem Kapitel werden vorerst typische Zielsetzungen aus der humanitären Logistik betrachtet. Anschließend werden Methoden zur Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme vorgestellt und abschließend werden diese auf ihre Anwendbarkeit in humanitären Fragestellungen untersucht.

3.1. Zielsetzungen in der humanitären Logistik

Zentrales Anliegen der humanitären Hilfe ist es, Menschen in Notlagen zu helfen. Dies ist auch das übergeordnete Ziel in der Umsetzung von humanitären Operationen. Um die Realisierbarkeit quantitativ generierter Lösungen sicherzustellen, sollte die Versorgung der Menschen vor Ort in der Planung oberste Priorität haben. In akuten Katastrophenfällen ist auch oft die Zeit ein kritischer Faktor und die minimale Reaktionszeit wird als Ziel formuliert.

Im Folgenden werden unterschiedliche Zielsetzungen aus der humanitären Logistik aufgeführt. In Anhang A.2 befindet sich zudem eine Übersicht der Zielsetzungen, die

in der humanitären Logistik am häufigsten formuliert werden. Auffällig ist die große Anzahl an Modellen, die trotz der humanitären Grundlage die Kostenminimierung als Ziel beinhalten. Dies geschieht, um mit den begrenzten finanziellen Mitteln, die zur Verfügung stehen, möglichst vielen Menschen helfen zu können. Durch die Kostenminimierung wird also die Effizienz der Hilfsaktion als Zielsetzung verfolgt (Tzeng u. a., 2007). Dabei werden entweder reine Transportkosten minimiert (Ortuño u. a., 2011) oder Kombinationen aus verschiedenen operationalen Kosten (Haghani und Oh, 1996; Barbarosoğlu und Arda, 2004; Rawls und Turnquist, 2010, u.a.). Alternativ zur Kostenminimierung wird die Minimierung der Antwortzeit als Effizienzkriterium eingesetzt (Tzeng u. a., 2007). Dabei können verschiedene Maßstäbe verwendet werden, zum Beispiel die Zeit, die die gesamte Operation benötigt (Vitoriano u. a., 2011) oder die benötigte Transportzeit, um Hilfsgüter zu liefern (Mete und Zabinsky, 2010; Ortuño u. a., 2011; Tzeng u. a., 2007). Nolz u. a. (2007) haben ein Modell aufgestellt, welches Touren zur Verteilung von Trinkwasser in Katastrophengebieten bestimmt. Minimierungskriterium ist u.a. die Zeit, die für eine Tour benötigt wird, inklusive der Rückfahrtzeit zum Depot. Yi und Özdamar (2007) minimieren in ihrem Modell die Wartezeit von Verletzten auf Erste Hilfe.

Neben der Effizienz einer Hilfsaktion im ökonomischen Sinn steht vor allem die Umsetzung der humanitären Grundsätze im Vordergrund. Somit ist die Minimierung unbefriedigt bleibender Nachfrage bzw. die Maximierung der Menge bereitgestellter Hilfsgüter ein dominierendes Kriterium in den quantitativen Modellen der humanitären Logistik (Haghani und Oh, 1996; Barbarosoğlu und Arda, 2004; Mete und Zabinsky, 2010, u.a.). Darüber hinaus werden Kriterien für die Fairness einer Hilfsaktion formuliert (Ortuño u. a., 2011; Vitoriano u. a., 2011; Drezner u. a., 2006), indem z.B. die Bevölkerung minimiert wird, die keine Versorgung innerhalb einer definierten maximalen Entfernung erhält (Nolz u. a., 2007) oder indem die Mindest-Nachfragedeckung über alle Bedarfsorte maximiert wird (Tzeng u. a., 2007). Diese Zielsetzung findet sich auch in der kommerziellen Logistik wieder, indem die minimale Kundenzufriedenheit maximiert oder die unbefriedigte Nachfrage minimiert wird (Herer u. a., 2006; Tiemesen u. a., 2013).

In Standortplanungsproblemen werden häufig kürzeste Distanzen gesucht (Nolz u. a., 2007), um eine möglichst schnelle Versorgung zu ermöglichen, oder die maximale Versorgung der Bevölkerung gefordert (Doerner u. a., 2009; Drezner u. a., 2006). Zudem werden Kriterien wie die Zuverlässigkeit von Transportverbindungen definiert (Or-

tuño u. a., 2011; Vitoriano u. a., 2011) und zuweilen werden Prioritäten formuliert, die dazu führen, dass bestimmte Nachfrageorte zuerst versorgt werden (Ortuño u. a., 2011; Vitoriano u. a., 2011). Auch diese Kriterien sind der kommerziellen Logistik nicht fremd (Tiemessen u. a., 2013). Trotz der Unterschiede in den Charakteristika werden also ähnliche Ziele verfolgt. Lediglich die Wichtigkeit der Kriterien unterscheidet sich stark zwischen der humanitären und der kommerziellen Logistik. Das wird durch die Priorisierung der Zielsetzungen deutlich. Während in der kommerziellen Logistik die Kostenminimierung oder Gewinnmaximierung an oberster Stelle steht, fokussiert sich die humanitäre Logistik auf die Versorgung der betroffenen Bevölkerung (Thomas und Kopczak, 2005; Kovács und Spens, 2007).

Viele dieser Zielsetzungen haben nicht die gleichen optimalen Lösungen. Sie konkurrieren also miteinander. So ist es zum Beispiel nicht möglich eine kostenminimale Lagerhaltungspolitik zu finden und gleichzeitig die Versorgungssicherheit zu maximieren. Würde es sich um komplementäre Ziele handeln, die also zur gleichen Lösung führen, könnten die Modelle mit Standardsoftware gelöst werden. So müssen jedoch Methoden der multikriteriellen Entscheidungsfindung angewandt werden, um möglichst gute Kompromisslösungen zwischen den verschiedenen Zielsetzungen zu finden. Im Folgenden wird daher eine kurze Einführung in die Entscheidungstheorie gegeben und anschließend werden verschiedene Methoden zur Lösung multikriterieller Probleme vorgestellt.

3.2. Einführung in die Entscheidungstheorie

Sehr viele Entscheidungsprobleme erfordern die Berücksichtigung von mehreren Kriterien. Die Subjektivität, die Entscheidungen unter mehreren Kriterien zugrunde liegt, kann durch Methoden und Formalisierung nicht behoben werden, aber sie kann explizit erfasst und transparent gemacht werden. Allein die Strukturierung des Entscheidungsproblems zur Vorbereitung der Methoden Anwendung schafft in vielen Fällen neue Einsichten bezüglich möglicher Alternativen und unterstützt somit die Entscheidungsfindung (Belton und Stewart, 2002, S. 3). Dabei haben die Entscheidungssituationen verschiedene Charakteristika, die es zur Methodenauswahl zu analysieren gilt:

- **Die Häufigkeit der Entscheidungsfindung.** Handelt es sich um ein Entscheidungsproblem, das mit ähnlichen Charakteristika öfter auftritt, sollte der Fokus

mehr auf die Entwicklung einer Prozedur gelegt werden, die die Entscheidungsfindung vereinfacht, als darauf, eine Lösung in diesem speziellen Fall zu finden. Wichtig dabei ist die Berücksichtigung von Alternativen, die in zukünftigen Fragestellungen auftreten können (Belton und Stewart, 2002, S. 31).

- **Die Möglichkeit Präferenzen zu formulieren.** Können die gewünschten Zielerreichungsgrade a priori vom Entscheidungsträger definiert werden, fließen diese in den Lösungsprozess mit ein. Das führt dazu, dass im besten Fall direkt eine, nach den Präferenzen des Entscheidungsträgers optimale, Lösung gefunden werden kann. Ist dem Entscheidungsträger die Formulierung der Präferenzen nicht von vornherein möglich, werden mehrere Alternativen generiert, die dann a posteriori evaluiert werden (Chankong und Haimes, 1983, S. 15ff).
- **Die Verfügbarkeit von Unterstützung.** Abhängig von dem Wissen der Entscheidungsträger wird die Notwendigkeit zur Entscheidungsunterstützung definiert. Die Bandbreite geht von der Ermittlung und Präsentation einer konkreten Lösung bis hin zu einer komplett eigenständigen Entscheidung des Entscheidungsträgers. Natürlich müssen die Methoden in ihrer Komplexität auf das Wissen des Analysten oder des Entscheidungsträgers angepasst sein (Belton und Hodgkin, 1999; Belton und Stewart, 2002, S. 33).
- **Die Unsicherheit im Datenbestand.** Hier werden die Unsicherheiten bezüglich der Konsequenzen einer bestimmten Alternative bewertet. Dabei spielen Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Entwicklungen der Umweltbedingungen eine entscheidende Rolle (French, 1995).
- **Die Art des Entscheidungsproblems.** In den meisten Entscheidungsproblemen geht es darum, eine Alternative aus einer Menge an möglichen Alternativen zu wählen. Es kann aber auch notwendig sein, alle Alternativen in eine Reihenfolge zu bringen oder sie einer Bewertung zu unterziehen (Belton und Stewart, 2002, S. 15).
- **Die Art der Alternativenmenge.** Eine Menge an Alternativen kann diskret oder kontinuierlich sein und zudem endlich oder unbeschränkt. Sind die Alternativen diskret und somit aufzählbar, kann multikriterielle Entscheidungsunterstützung angewendet werden (Korhonen u. a., 1992). Im Fall von konti-

nuierlichen, nicht endlichen Mengen an Alternativen (die also nicht alle explizit aufgezählt werden können) ist multikriterielle Optimierung die geeignete Methode (Korhonen u. a., 1992). Bei einer sehr großen Anzahl an Alternativen muss eventuell eine Vorauswahl näher zu betrachtender Alternativen getroffen werden. Die Entscheidung darüber ist ein multikriterielles Entscheidungsproblem für sich (Belton und Stewart, 2002, S. 33). Die Lösung des Problems wird somit in zwei Teile dekomponiert: Zuerst wird eine Teilmenge aller Alternativen generiert, die dann genauer betrachtet wird, um zu einer Lösung oder Handlungsempfehlung bezüglich des ursprünglichen multikriteriellen Entscheidungsproblems zu gelangen (Belton und Stewart, 2002, S. 33).

Eine Übersicht von Methoden zur Lösung multikriterieller Probleme ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Unterscheidung wird hier zuerst über die Art der Alternativenmenge vorgenommen (diskret oder kontinuierlich) und anschließend über die Art der Entscheidungsunterstützung. Im Fall von diskreten Alternativenmengen finden Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung Anwendung. Hier wird unterschieden zwischen Methoden, bei denen der Entscheider in der Definition seiner Präferenzen unterstützt wird und solchen, in denen er diese Definition eigenständig durchführen muss. Zu ersteren Methoden gehören die PROMETHEE Methoden und die ELECTRE Methoden¹. Methoden zur Entscheidungsunterstützung, bei denen eine Wertfunktion zur Aggregation der Kriterien ermittelt werden soll, sind zum Beispiel die Nutzwertanalyse² und der *Analytical Hierarchy Process*³. Ist die Menge der Alternativen stetig, muss multikriterielle Optimierung angewendet werden, um konkrete Alternativen zu ermitteln. Die Lösungen, die durch die Optimierung ermittelt wurden, können anschließend mit Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung bewertet werden, um eine Auswahl zu erleichtern. Es kann auch direkt eine konkrete Lösung mittels multikriterieller Optimierung erzeugt werden. Ohne eine Vergleichbarkeit zu anderen möglichen Kompromisslösungen ist die Bewertung dieser Alternative jedoch schwer durchführbar.

¹Eine englischsprachige Einführung zu ELECTRE gibt Roy (1991). Entscheidungsunterstützung mit PROMETHEE wird von Brans und Vincke (1985) erläutert.

²Dieses Verfahren wurde von Zangemeister (1976) geprägt.

³Diese Methode, meistens mit AHP abgekürzt, wurde von T. Saaty entwickelt. In Saaty und Vargas (2001) ist eine ausführliche Einführung zu Variationen und Anwendungen der Methode gegeben.

3. Grundlagen multikriterieller Entscheidungsfindung

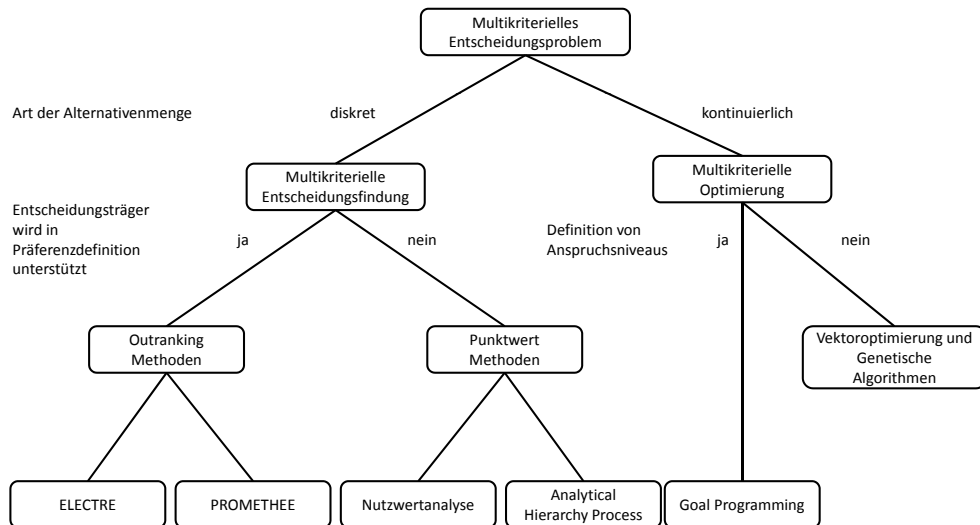


Abbildung 3.1.: Übersicht ausgewählter Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung

Bei der in dieser Arbeit betrachteten Problemstellung muss die Entscheidungsfindung einfach gestaltet sein, da sie oft und unter zeitkritischen Bedingungen wiederholt werden muss. Darüber hinaus sind die Mittel in humanitären Operationen sehr knapp, was das Budget angeht wie auch in Bezug auf personelle Ressourcen. Zur sorgfältigen Entscheidungsvorbereitung sind jedoch komplexe Methoden notwendig, die es daher im Folgenden zu erläutern gilt. Aufgrund der nicht abzählbaren Anzahl an Alternativen wird das Problem mit multikriterieller Optimierung gelöst, um eine handhabbare Anzahl an Alternativen zu erhalten. Aus dieser übersichtlichen Anzahl an Alternativen kann der Entscheidungsträger dann eine auswählen. Die Präferenzen sind dabei klar definierbar, da der Fokus immer auf der Versorgung der betroffenen Bevölkerung liegt. Bei der Auswahl einer Lösung soll der Entscheidungsträger durch formale Methoden unterstützt werden, die einfach anzuwenden sind, da der Entscheidungsträger in der Regel nicht über Fachwissen aus der Entscheidungstheorie verfügt. Die Entscheidung muss unter einem hohen Grad an Unsicherheit über die Entwicklung der Situation getroffen werden. Jede der Situationen weist andere Charakteristika auf, so dass es nicht möglich ist eine Entscheidung vorzugeben ohne das Wissen und die Erfahrung des Entscheidungsträgers vor Ort. Nichtsdestotrotz gibt es Ähnlichkeiten im Ablauf einer Hilfsaktion, die eine Unterstützung durch systematische Analysen ermöglichen.

3.3. Lineare multikriterielle Optimierung

In Entscheidungsproblemen, in denen die Alternativenmenge kontinuierlich ist, bzw. die Anzahl der Alternativen zu groß ist, um diese einzeln zu betrachten, wird die multikriterielle Optimierung angewendet. Dadurch wird eine Auswahl an möglichen Alternativen aus der Gesamtmenge, unter Berücksichtigung der Kriterien des Entscheidungsträgers, generiert. Die Bewertung dieser Alternativen ist subjektiv und hängt von den Präferenzen des Entscheidungsträgers ab.

Ein lineares multikriterielles Optimierungsproblem mit *krit* Kriterien ist definiert durch die linearen Funktionen f_q , wobei q der Index für die Kriterien ist (mit $q = 1, \dots, \textit{krit}$), und den Raum der zulässigen Lösungen L sowie die Entscheidungsvariablen x (mit $x = (x_1, \dots, x_n)^T$). Daraus ergibt sich die Formulierung (Miettinen, 1999, S. 5):

$$\begin{aligned} \min \{ & f_1(x), f_2(x), \dots, f_{\textit{krit}}(x) \} \\ \textit{s.t.} \quad & x \in L \end{aligned}$$

wobei alle Bedingungen, die L definieren, linear sind und alle Zielfunktionen minimiert werden sollen. Ist eine der Zielfunktionen f_q eine Maximierungsfunktion, kann diese in $-f_q$ umgeformt und ebenfalls minimiert werden. Die Menge der Zielfunktionen $f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_{\textit{krit}}(x)\}$ enthält $\textit{krit} \geq 2$ Zielfunktionen, von denen mindestens zwei im Konflikt zueinander stehen, das heißt nicht im selben Lösungspunkt ihr Minimum erreichen. Anderenfalls wäre das Problem mit Standardverfahren zur Lösung linearer Probleme zu lösen (Miettinen, 1999, S. 5f).

In der multikriteriellen Optimierung verschiebt sich der Fokus vom Lösungsraum auf den Zielraum, in dem möglichst gute Kompromisslösungen zwischen den zu betrachtenden Zielen gesucht werden. Der Zielraum enthält die Zielwerte für die verschiedenen Kriterien für jede der möglichen Lösungen des Entscheidungsproblems. Für die meisten Probleme hat der Zielraum eine kleinere Dimension als der Lösungsraum, da Entscheidungsprobleme in der Regel mehr Entscheidungsvariablen als Kriterien aufweisen (Cohon, 1978, S. 70f).

Innerhalb des Zielraums können die verschiedenen Lösungspunkte, im Fall von konkurrierenden Zielen, nicht in eine natürliche Reihenfolge gebracht werden. Sollen zum Beispiel die Liefergeschwindigkeit und die Transportkosten minimiert werden, kann objektiv nicht beurteilt werden, ob eine Lösung besser ist, bei der die Lieferung drei

Tage benötigt und die Kosten ein mittleres Ausmaß annehmen oder eine Lösung, bei der die Lieferung nur einen Tag dauert und die Kosten dafür sehr hoch sind. Multikriterielle Probleme, bei denen alle Ziele Entscheidungsziele sind, es also nicht möglich ist, a priori Zielwerte zu definieren, die mindestens erreicht werden sollen, um den Entscheider zufrieden zu stellen, heißen Vektoroptimierungsprobleme (Chankong und Haimes, 1983, S. 113). Für diese Problemklasse ist das Konzept der Pareto Optimalität relevant, das im nächsten Abschnitt formal eingeführt wird.

3.3.1. Pareto Optimalität

Das Ziel in der multikriteriellen Optimierung ist es, im Zielraum eine Menge an guten Alternativen zu definieren, die dem Entscheidungsträger dann zur Auswahl präsentiert werden können. Die Bewertung der Alternativen ist dabei subjektiv und hängt von den Präferenzen des Entscheidungsträgers ab. Es ist aber möglich, Lösungen auszuschließen, da sie, objektiv betrachtet, schlechter als andere sind. Lösungen, bei denen es möglich ist, durch Auswahl einer anderen Lösung mindestens einen Zielwert zu verbessern, ohne einen anderen zu verschlechtern, heißen dominiert (Cohon, 1978, S. 69f). Lösungen, die durch keine andere Lösung dominiert werden, heißen nicht dominiert oder effizient (Yu, 1974). Diese Lösungen heißen, seit V. Pareto sie 1896 generalisiert hat, auch Pareto optimal (Pareto, 1896). Pareto optimale Lösungen werden wie folgt definiert:

Der Entscheidungsvektor x_* ist Pareto optimal, wenn kein $x \in L$ existiert, so dass $f_q(x) \leq f_q(x_*)$ für $q = 1, \dots, \textit{krit}$ und $f_o(x) < f_o(x_*)$ für mindestens ein $o = 1, \dots, \textit{krit}$ (Cohon, 1978, S. 76f).

Global Pareto optimale Lösungen gelten für den ganzen Zielraum, lokal Pareto optimale Lösungen sind nur in Bezug auf die direkte Umgebung im Zielraum definiert. Jede global Pareto optimale Lösung ist gleichzeitig lokal Pareto optimal. Der Umkehrschluss gilt nur in konvexen multikriteriellen Optimierungsproblemen (Censor, 1977). In diesen werden alle Restriktionen und Zielfunktionen von linearen Funktionen beschrieben und die Menge aller Pareto optimalen Lösungen ist somit verbunden (Boyd und Vandenberghe, 2004, S. 1f). Eine Lösung heißt schwach Pareto optimal oder schwach effizient, wenn es keine andere Lösung gibt, die für jedes der Ziele $q = 1, \dots, \textit{krit}$ bessere Werte aufweist (Miettinen, 1999, S. 19f):

Ein Entscheidungsvektor $x_* \in L$ ist genau dann schwach Pareto optimal, wenn es keinen anderen Entscheidungsvektor gibt, für den gilt $f_q(x) < f_q(x_*) \quad \forall q = 1, \dots, \text{krit}$ (Miettinen, 1999, S. 19f).

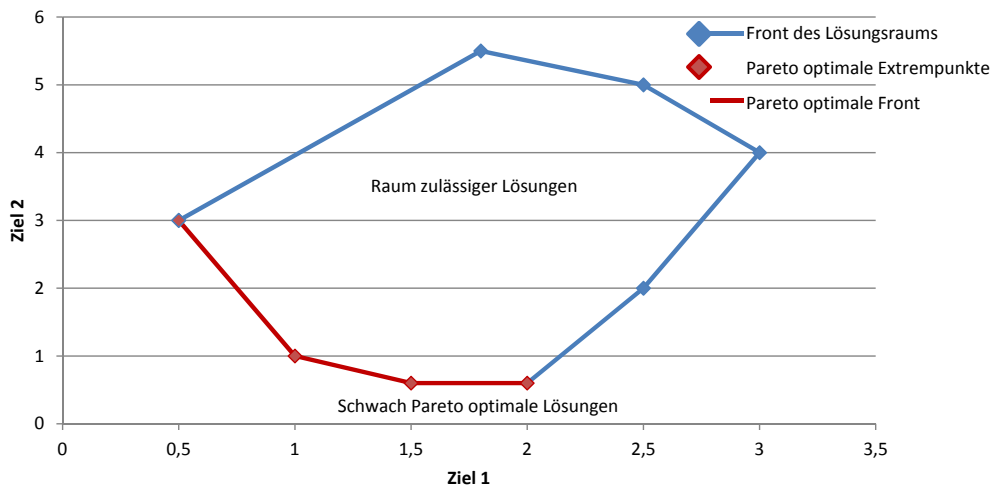


Abbildung 3.2.: Schematische Darstellung der zulässigen Lösungen im Zielraum und der Pareto-Front

Die gesamte Menge der Pareto optimalen Lösung heißt Pareto-Front. Diese befindet sich bei linearen Problemen auf der Oberfläche des Raums, der durch die zulässigen Lösungen im Zielraum aufgespannt wird (wenn nicht alle gültigen Lösungen im Zielraum Pareto optimal sind), was die Bestimmung der Pareto optimalen Lösungen bei linearen Problemen vereinfacht (Chankong und Haimes, 1983, S. 153ff). In Abbildung 3.2 ist der Raum der zulässigen Lösungen im Zielraum und die Pareto-Front für zwei Ziele beispielhaft dargestellt. Ziel eins wird auf der Horizontalen abgetragen und Ziel zwei auf der Vertikalen. Beide Ziele sind zu minimieren. Die dargestellten Punkte sind die Extrempunkte, die den Ecken des zulässigen Bereichs entsprechen. Die Verbindungslinien dieser Extrempunkte bilden die konvexe Hülle der zulässigen Lösungen. Die roten Punkte $(0, 5; 3)$, $(1; 1)$ und $(1, 5; 0, 6)$ sind Pareto optimale Extrempunkte, alle Punkte auf den roten Verbindungslinien zwischen diesen Punkten sind ebenso Pareto optimale Punkte. Der Extrempunkt $(2; 0, 6)$ und alle Punkte auf der Verbindungslinie zum Punkt $(1, 5; 0, 6)$ sind schwach Pareto optimale Punkte.

Der Idealzielpunkt z^* ist der Vektor der Kombination aus allen individuellen Minima (Sawaragi u. a., 1977). Zur Bestimmung dieses Vektors wird das Optimierungsproblem mit jeder Zielfunktion einzeln optimiert. Dieser Vektor kann bei konkurrierenden Zie-

len nicht erreicht werden, wird aber als Referenzvektor genutzt. Das Gegenteil ist der Punkt, an dem jede Zielfunktion ihren schlechtesten Wert annimmt. Zur Bestimmung dieses Vektors werden alle Zielfunktionen einmal separat minimiert und die Ergebnisse für alle Zielfunktionen an jedem individuellen Optimum werden in einer Tabelle notiert. Anschließend wird für jede Zielsetzung der schlechteste Wert aus der Tabelle ausgelesen (Schelling, 1958). Auch dieser Punkt muss keine zulässige Lösung für das Problem sein. Viele Heuristiken nutzen eine solche erste Abschätzung des Bereichs, in dem die effizienten Lösungen liegen müssen, zur Bestimmung von Lösungen auf der Pareto-Front. Bei der Bestimmung der Pareto-Front kann das Wissen helfen, dass in einem konvexen, zusammenhängenden zulässigen Bereich alle Punkte zwischen zwei benachbarten effizienten Extrempunkten im gültigen Bereich auch effizient sind (Eiselt und Sandblom, 2010, S. 116ff).

3.3.2. Bewertung Pareto optimaler Lösungen

Aus der Menge der Pareto optimalen Lösungen muss der Entscheidungsträger eine auswählen. Für jedes Kriterium $q = 1, \dots, krit$ hat ein Entscheidungsträger einen Level \bar{z}_q , der im Lösungspunkt mindestens erreicht werden soll. Diese Level heißen Aspirationslevel. Zufriedenstellende Lösungen erfüllen bestimmte Aspirationslevel. Das können sogar Vektoren sein, die nicht Pareto optimal sind (Miettinen, 1999, S. 21ff). Problematisch ist dabei die Definition der Aspirationslevel, da der Entscheidungsträger sie oftmals nicht formulieren kann oder sich ihrer nicht bewusst ist. Da es in einigen multikriteriellen Optimierungsproblemen schwierig ist, eine effiziente Lösung zu finden, kann das Ziel des Entscheidungsträgers auch sein, nur eine möglichst gute Lösung zu ermitteln (Wierzbicki, 1982). In Modellen, die noch schwerer zu lösen sind, besteht das Ziel dann darin, überhaupt eine zulässige Lösung zu finden.

Jeder Entscheidungsträger hat eine eigene Wertfunktion, die in der Regel nicht mathematisch formuliert werden kann, aber implizit in seine Entscheidungsfindung eingeht. Wenn die Wertfunktion in mathematische Ausdrücke gefasst werden könnte, könnte mithilfe dieser eine Ordnung unter den Lösungsvektoren hergestellt werden und die für den Entscheidungsträger optimale Lösung bestimmt werden (Eisenführ und Weber, 2003, S. 115f). Eine Lösung wird als final bezeichnet, wenn sie die Wertfunktion des Entscheidungsträgers minimiert. Aufgrund der Schwierigkeit, die Wertfunktion des Entscheidungsträgers zu formulieren, kann eine finale Lösung auch die sein, die

die Aspirationslevel des Entscheidungsträger erfüllt (Miettinen, 2008). In vielen Entscheidungsproblemen ist es jedoch gar nicht zielführend, lediglich eine der möglichen Kompromisslösungen zu generieren, weil zusätzliche Informationen über die Verteilung der effizienten Lösungen dabei verloren gehen.

Zur Bewertung einer Lösung vergleichen die meisten Lösungsmethoden die Alternativen untereinander (Eiselt und Sandblom, 2004, S. 23). Dabei wird jeweils der *Tradeoff* zwischen zwei Lösungen bestimmt. Dieser drückt die Relation der Zielwertänderungen aus, wenn eine Zielfunktion um eine Einheit verbessert wird: $\text{Tradeoff}_{qo} = \frac{f_q(x_1) - f_q(x_2)}{f_o(x_1) - f_o(x_2)}$. Wenn beide Vektoren, x_1 und x_2 , Pareto optimal sind, existiert immer ein Paar q, o , für das der *Tradeoff* negativ ist (sonst wäre eine der Lösungen nicht Pareto optimal).

Ein *Tradeoff* ohne die Berücksichtigung der Präferenzen des Entscheidungsträger ist eine rein mathematische Definition. Mithilfe des *Tradeoffs* können dem Entscheidungsträger dennoch Unterschiede zwischen den Lösungen verdeutlicht werden. Zur Berücksichtigung der Präferenzen des Entscheidungsträger schon während der Lösungsermittlung können zum Beispiel Indifferenzkurven des Entscheidungsträger abgebildet werden und Lösungspunkte gesucht werden, an denen sich diese Indifferenzkurven tangieren (Edgeworth, 1881, S. 21). Alternativ kann ein subjektiver *Tradeoff* definiert werden. Dafür legt der Entscheidungsträger fest, um welchen Wert sich der Wert einer Zielfunktion verschlechtern darf, damit sich ein anderes Ziel um einen bestimmten Wert verbessert, unter der Annahme, dass alle anderen Zielerreichungsgrade unverändert bleiben (Eskelinen und Miettinen, 2012).

Da in den meisten Fällen nicht alle Bereiche der Pareto-Front von Interesse sind, werden oft vorerst nur einige Lösungen erzeugt, um eine erste Idee von der Form der Pareto-Front zu erhalten, bevor dann interessante Intervalle genauer untersucht werden (Fonseca und Fleming, 1995). Somit wird nicht die gesamte Pareto-Front erzeugt, sondern lediglich für den Entscheidungsträger interessanten Bereiche. Je nach Form der Pareto-Front können Lösungen gefunden werden, bei denen zur geringen Verbesserung des einen Ziels das andere Ziel deutlich verschlechtert würde. Diese Lösungen sind für den Entscheidungsträger in der Regel weniger interessant als solche mit einem ausgeglichenen *Tradeoff*. Somit verringert sich die Anzahl an Lösungen, die dem Entscheidungsträger aufgezeigt werden (Cohon, 1978, S. 98f; Chankong und Haimes, 1983, S. 225ff). Zur Eingrenzung der Pareto-Front und somit zur leichteren Lösungsbestimmung, wird die Definition der angemessenen Pareto Optimalität eingeführt.

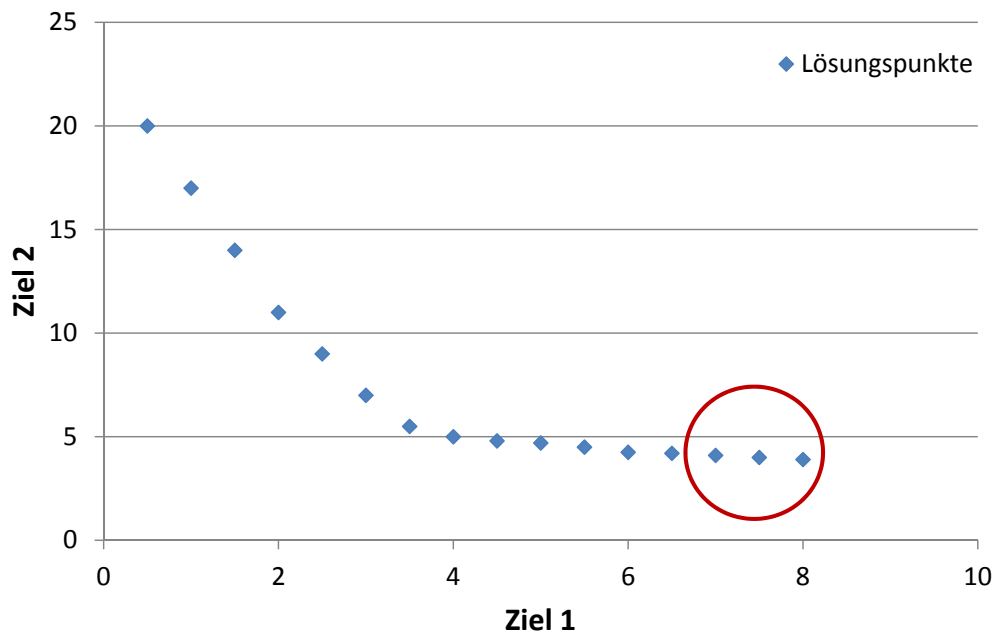


Abbildung 3.3.: Schematische Darstellung schwach Pareto optimaler Punkte

Die Grundlage der angemessenen Pareto Optimalität stammt von Kuhn und Tucker (1951), die erstmals feststellten, dass einige Pareto optimale Lösungen unerwünschte Eigenschaften aufweisen. Die Idee dahinter ist, dass Pareto optimale Lösungen, bei denen der *Tradeoff* zu mindestens einem anderen Punkt einen sehr großen Wert annimmt, sich nicht deutlich von schwach Pareto optimalen Punkten unterscheiden. In Abbildung 3.3 sind solche Lösungspunkte beispielhaft dargestellt. Die markierten Lösungspunkte weisen kaum eine Verbesserung in Bezug auf Ziel 2 auf. Das Ziel 1 erreicht in diesen Punkten aber trotzdem deutlich schlechtere Werte. Zur Ermittlung angemessener Pareto optimaler Lösungen wird eine Grenze *Maxi* für den *Tradeoff* festgelegt, so dass gilt:

Ein Entscheidungsvektor $x_* \in L$ ist angemessen Pareto optimal (in Bezug auf die Grenze *Maxi*), wenn es eine reelle Zahl $Maxi > 0$ gibt, für die gilt: Für jedes f_q und für jedes $x \in L$, welches $f_q(x) < f_q(x_*)$ erfüllt, gibt es mindestens ein f_o , für das gilt: $f_o(x_*) < f_o(x)$ und $\frac{f_q(x_*) - f_q(x)}{f_o(x) - f_o(x_*)} \leq Maxi$ (Miettinen, 1999, S. 29ff).

Diese Definition identifiziert Pareto optimale Lösungen, bei denen sich im Gegenzug zur Verschlechterung des Wertes eines Ziels (q), eine angemessene Verbesserung in Bezug auf ein anderes Ziel (o) einstellt. Mit dem Definieren eines festen Wertes *Maxi*

können Lösungen mit zu großen *Tradeoffs* ausgeschlossen werden. Dieses Prinzip wird in Abschnitt 3.4.1 zur Bewertung von Lösungspunkten wieder aufgegriffen.

3.4. Methoden zur Lösung linearer multikriterieller Optimierungsprobleme

Methoden, die sich zur Optimierung multikriterieller Probleme eignen, lassen sich in zwei Gruppen klassifizieren. Zum einen wird Vektoroptimierung angewandt, um ohne die Festlegung von Präferenzen a priori die gesamte Pareto-Front oder einen Teil dieser exakt oder heuristisch zu ermitteln. Zum anderen findet *Goal Programming* Anwendung zur Lösung multikriterieller Optimierungsprobleme, wenn es möglich ist, a priori Zielerreichungsgrade, die für die verschiedenen Kriterien erreicht werden sollen, zu definieren. Des Weiteren wurden von verschiedenen Autoren Heuristiken entwickelt, die das Lösen von Optimierungsproblemen mit mehreren Zielsetzungen beschleunigen (Hajela und Lin, 1992; Horn u. a., 1994; Srinivas und Deb, 1994). Vor allem evolutionäre Algorithmen eignen sich zur Bestimmung verschiedener effizienter Lösungen (Fonseca und Fleming, 1995).

Oft wird mithilfe von Methoden zur multikriteriellen Optimierung eine erste Menge an zu betrachtenden Alternativen aus einer sehr großen Menge an möglichen Alternativen ermittelt. Es ist zum Beispiel möglich, anhand der quantifizierbaren Kriterien eine erste Auswahl an Alternativen zu generieren, die dann anhand der nicht quantifizierbaren Kriterien genauer untersucht wird. Umgekehrt können auch vorerst die qualitativen Kriterien untersucht werden, um dann mit einer eingeschränkten Alternativenmenge in den quantitativen Entscheidungsfindungsprozess zu gehen. Der Entscheidungsträger kann außerdem in den Lösungsfindungsprozess eingreifen, indem er Parameter der Lösungsmethode anpasst, nachdem er ein Ergebnis bzw. eine Menge von Ergebnissen erhalten hat, und anschließend mit diesen angepassten Parametern neue Lösungen ermittelt (Belton und Stewart, 2002, S. 220f).

3.4.1. Vektoroptimierung

In der Vektoroptimierung bleiben alle Zielfunktionen als solche erhalten. Es können dennoch Prioritäten zwischen den Zielen genutzt werden, zum Beispiel in Form von Zielgewichtungen. Intensiv evaluiert werden die Lösungen dagegen meist erst im Nach-

3. Grundlagen multikriterieller Entscheidungsfindung

hinein (Eiselt und Sandblom, 2010, S. 115f). Nur einige wenige Methoden erlauben die direkte Evaluierung der Lösungen während ihrer Generierung (Chankong und Haimes, 1983, S. 223). Zur Abschätzung der Pareto-Front müssen mehrere Kompromisslösungen auf dieser generiert werden. Es wird dabei mit einer übersichtlichen Anzahl an Lösungen begonnen, die dann vom Entscheidungsträger zu evaluieren ist, bevor weitere Lösungen generiert werden (Eiselt und Sandblom, 2010, S. 116). Zeleny (1974) gibt einen ausführlichen Überblick über die ersten Ansätze zur multikriteriellen Programmierung. Cohon (1978) führt einige Methoden zur Lösung solcher Probleme an und erläutert diese ausführlich. Darunter sind die Methode der gewichteten Summe, die *Constraint* Methode, die *Noninferior Set Estimation* Methode und das multikriterielle Simplexverfahren. Die Abschätzung der Pareto-Front setzt oftmals ein wiederholtes Lösen von Optimierungsprogrammen voraus. Dies erhöht den Rechenaufwand im Vergleich zu klassischen Optimierungsproblemen deutlich. Darüber hinaus muss anschließend eine Entscheidung für eine oder mehrere der Alternativen getroffen werden. Hier muss der Entscheidungsträger mit einbezogen werden, was nur möglich ist, wenn die Anzahl an generierten Lösungen überschaubar bleibt (Eiselt und Sandblom, 2004, S. 29; Chankong und Haimes, 1983, S. 117ff). Im Folgenden wird auf die verschiedenen Methoden zur Vektoroptimierung eingegangen. Damit soll ein Überblick über die möglichen Methoden zur Lösung von multikriteriellen Problemen mit verschiedenen Charakteristika gegeben werden. Im Anschluss daran werden zwei Methoden ausgewählt und zur Lösung des hier entwickelten Modells angepasst. Eine Übersicht der hier betrachteten Methoden ist in Abbildung 3.4 gegeben.

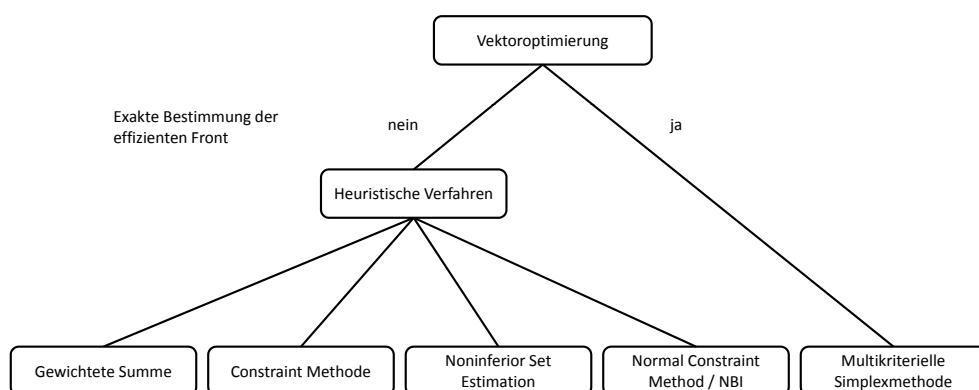


Abbildung 3.4.: Übersicht über die verschiedenen Methoden der Vektoroptimierung

Methode der gewichteten Summe

Die Methode der gewichteten Summe ist die älteste Methode, um lineare Probleme mit mehreren Zielsetzungen zu lösen. Die Methode geht auf die Bedingungen für effiziente Lösungen von Kuhn und Tucker (1951) zurück und wurde von Zadeh (1963) verallgemeinert. Es werden dabei nicht mehr die einzelnen Ziele optimiert, sondern eine lineare, konvexe Kombination dieser (Eiselt und Sandblom, 2004, S. 28). Alle Lösungen, die mit der Methode der gewichteten Summe generiert werden, sind effizient oder zumindest schwach effizient. In einem konvexen Lösungsraum können mit dieser Methode alle (schwach) effizienten Punkte gefunden werden (Chankong und Haimes, 1983, S. 153ff; Ehrgott, 2005, S. 68ff). Um keine dominierten Punkte zu erzeugen, darf keines der Gewichte den Wert Null annehmen, sonst muss die Lösung im Nachhinein auf Effizienz geprüft werden. Die Gewichte der Ziele bestimmen die Steigung der Zielfunktion und somit die gefundenen Lösungen. Die Extrempunkte, die mit der gewichteten Summe gefunden werden, sind optimal in Bezug auf die gesetzten Gewichte. Entscheidend für die mit einer bestimmten Kombination an Gewichten ermittelte Lösung, ist immer die Relation zwischen den Gewichten und nicht die absoluten Werte. Aus diesem Grund kann die Summe der Gewichte immer auf eins normiert werden. Mithilfe der Gewichte können auch Einheiten normiert werden, wodurch Ziele, die in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden, vergleichbar gemacht werden können. Nicht jede Änderung der Gewichte erzeugt eine neue optimale Lösung, da geringfügige Änderungen der Steigung oft zu den gleichen Extrempunkten als Lösungen führen (Chankong und Haimes, 1983, S. 224). Erst wenn die Steigung sich über ein bestimmtes Intervall hinaus ändert, wird ein neuer Extrempunkt gefunden. Die Grenzpunkte dieser Intervalle heißen *Switching Values* (Cohon, 1978, S. 103ff). Eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse ist notwendig, um die Pareto-Front mittels der Methode der gewichteten Summe zu ermitteln. Mittels dieser Analyse wird das Verhalten des Modells in Bezug auf veränderte Parameter untersucht und die Sensitivität der Lösung bei veränderter Ausgangslage ermittelt (Rarig und Haimes, 1983).

Einfache Probleme können mittels analytischer Variation der Gewichtungsvektoren exakt gelöst werden. Für lineare Probleme mit zwei Zielsetzungen haben unter anderem Gass und Saaty (1955) einen Algorithmus zur systematischen Bestimmung aller Pareto optimalen Lösungen basierend auf der Methode der gewichteten Summe entwickelt. Für komplexere Probleme, wie sie in realen Anwendungen meistens vorkommen,

muss die Bestimmung guter Kompromisslösungen numerisch durch Generieren verschiedener Lösungen mit unterschiedlichen Gewichtungsvektoren erfolgen (Chankong und Haimes, 1983, S. 225ff).

Zu Beginn der Methode werden alle Ziele einzeln optimiert. Dafür werden die jeweils anderen Gewichte auf den Wert Null gesetzt. So werden erste gültige Extrempunkte gefunden. Anschließend wird jeweils ein Gewicht variiert und die anderen werden auf feste Werte gesetzt. So soll eine möglichst gute Abschätzung der Pareto-Front ermöglicht werden. Werden die Gewichte nicht kontinuierlich variiert, kann es passieren, dass effiziente Extrempunkte übersprungen werden, weil bei der Variation der Gewichte nicht determinierbar ist, um welchen Wert sich die Lösung im Zielraum verschiebt (Cohon, 1978, S. 107).

Die Methode der gewichteten Summe birgt die Gefahr, in einem Extrempunkt hängen zu bleiben oder große Regionen zu überspringen. Werden die Gewichte zwischen zwei *Switching Values* variiert, wird keine neue Lösung bestimmt. Bei zu großen Änderungen der Gewichte, können andererseits Lösungen übersprungen werden. Es ist somit kaum möglich sicherzustellen, dass die gesamte Pareto-Front untersucht wird (Das und Dennis, 1997). Dabei ist vor allem die mangelnde Kontrolle ein Problem: Es ist für den Anwender nicht zu beurteilen, in welcher Region der Pareto-Front er durch Variation der Gewichte landet (Das und Dennis, 1997). Auch die benötigte Anzahl an Lösungsdurchläufen und der damit verbundene Rechenaufwand wird von Chankong und Haimes (1983) als Nachteil dieser Methode genannt. Auf der anderen Seite sind die Lösungen relativ einfach zu bestimmen, da das Modell als lineares Programm formuliert wird (Cohon, 1978, S. 100ff).

Miettinen (1999, S. 83f) erwähnt die Möglichkeit, die Methode der gewichteten Summe als a priori Methode anzuwenden, also als Methode, bei der der Entscheidungsträger seine Präferenzen vor dem Lösungsprozess definiert, so dass diese direkt einfließen (Cohon, 1978, S. 100ff). In diesem Fall repräsentieren die Gewichte der Ziele dann die Präferenzen des Entscheidungsträgers. Darüber hinaus kann die gewichtete Summe auch als interaktive Methode umgesetzt werden, bei der der Entscheidungsträger immer wieder in den Lösungsprozess eingreift und die Gewichte nach seinen Präferenzen anpasst (Miettinen, 1999, S. 83).

Kim und de Weck (2005) erweitern die Methode der gewichteten Summe, um eine genauere Abschätzung der Pareto-Front zu erhalten und konvexe Regionen untersuchen zu können. Dafür identifizieren sie basierend auf den ersten gefundenen Lösungen

Regionen, die bisher nicht detailliert genug abgebildet sind. Zur näheren Betrachtung dieser Regionen werden Restriktionen eingeführt, die den Lösungsraum auf die zu untersuchenden Regionen beschränken. Mit dieser Methode ist es möglich, relativ gleichmäßig verteilte Lösungen auf der gesamten Pareto-Front zu erzeugen (Kim und de Weck, 2005).

Constraint Methode

Oft gibt es in einem multikriteriellen Optimierungsproblem ein Hauptziel und mehrere untergeordnete Ziele. Diesen Umstand nutzt die *Constraint* Methode. Alle Ziele, abgesehen vom Hauptziel, werden als Restriktionen formuliert. Dabei werden Minimierungszielfunktionen in kleiner-gleich Restriktionen umgewandelt und Maximierungszielfunktionen in größer-gleich Restriktionen (Eiselt und Sandblom, 2010, S. 121ff). In Abbildung 3.5 wird deutlich, wie sich der Raum zulässiger Lösungen durch das Hinzufügen der Restriktion für das Ziel 2 verkleinert: Soll das Ziel 2 maximal einen Wert von 2,5 annehmen, liegen alle zulässigen Lösungen unterhalb der roten Linie. Die rechten Seiten der Restriktionen, die aus den Zielfunktionen formuliert werden, werden so variiert, dass verschiedene Lösungen für das Problem generiert werden (Haimes, 1973). Die Auswahl der rechten Seiten, auch *Grid Points* genannt, bestimmt dabei die Lösung, die durch die Optimierung des Problems gefunden wird. Bei willkürlicher Auswahl der rechten Seite kann es zu Unlösbarkeiten kommen, wenn diese nicht eingehalten werden können (Cohon, 1978, S. 117). Die Lösungen, die mit dieser Methode generiert werden, sind nicht zwangsläufig Extrempunkte auf der Pareto-Front, liegen aber auf dieser (Cohon, 1978, S. 125). Ist der Raum der zulässigen Lösungen konvex, kann jede Lösung, die mit der *Constraint* Methode generiert wird, auch mit der gewichteten Summe gefunden werden. Andersherum gilt diese Aussage auch ohne die Bedingung der Konvexität (Chankong und Haimes, 1983, S. 121ff).

Cohon (1978, S. 118ff) stellt einen Algorithmus zum Lösen von multikriteriellen Probleme mit der *Constraint* Methode vor. Dafür wird im ersten Schritt die *Payoff*-Tabelle erstellt (Benayoun u. a., 1971). Jedes der zu optimierenden Ziele wird zu diesem Zweck separat optimiert. Anschließend werden, unter Einhaltung der jeweiligen individuellen Optima, alle anderen Ziele optimiert, um dominierte Lösungen auszuschließen. Dann wird für jedes Ziel der größtmögliche und der kleinstmögliche Wert gesucht und in die *Payoff*-Tabelle geschrieben. Nachdem alle Ziele außer dem Hauptziel in Restriktionen

3. Grundlagen multikriterieller Entscheidungsfindung

umgewandelt wurden, werden nun die rechten Seiten für diese bestimmt. Grenzen für die Werte sind die Einträge in der *Payoff*-Tabelle. Zwischen diesen Grenzen werden die rechten Seiten variiert. Das Modell wird für g rechte Seiten für jedes Ziel gelöst, also insgesamt g^{krit-1} , wenn $krit$ die Anzahl der Ziele ist und g die Anzahl der *Grid Points* (Cohon, 1978, S. 118ff). Durch die Variation der rechten Seiten zwischen den minimal und maximal möglichen Werten kommt es nicht mehr zu Unlösbarkeiten, da diese Grenzen unter Berücksichtigung des anderen Ziels bestimmt wurden (Cohon, 1978, S. 119).

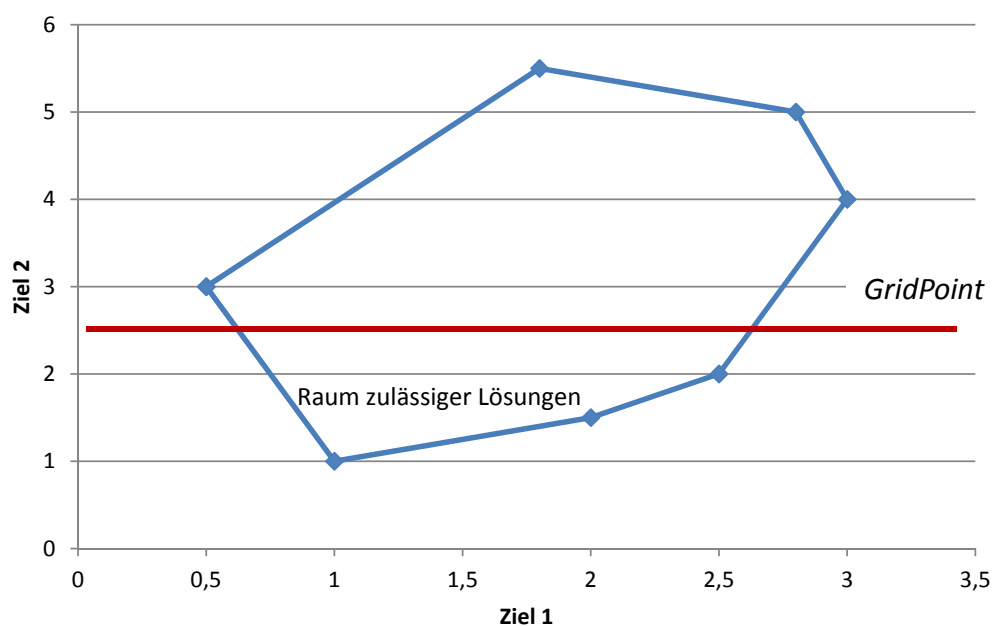


Abbildung 3.5.: Schematische Darstellung der *Constraint* Methode

Laumanns u. a. (2006) kritisieren die Notwendigkeit die *Grid Points* im Vorhinein zu bestimmen und haben eine Methode entwickelt, bei der während des Lösungslaufs bestimmt wird, welche *Grid Points* als nächstes gelöst werden. Das geschieht, indem durch jede gefundene Lösung eine Vertikale und eine Horizontale gezogen werden, die dann als zusätzliche Restriktionen (Maxima und Minima für die entsprechenden Zielwerte) im nächsten Lösungsdurchlauf berücksichtigt werden (Laumanns u. a., 2006). Diese Methode sorgt dafür, dass Regionen, in denen mehrere Lösungen gefunden werden, genauer untersucht und andere Regionen nicht weiter betrachtet werden.

Die Formulierung des mathematischen Modells als lineares Problem mit einer Zielsetzung ermöglicht die Lösung mit Standardsoftware zur Optimierung von linearen

Programmen. Die Einführung einer zusätzlichen Restriktion, die in der Regel bindend ist, also komplett ausgeschöpft werden soll (um eine Minimierung der zugehörigen Zielfunktion zu ermöglichen), führt zu einem erhöhten Rechenaufwand. Es muss jedoch nicht, wie bei der Lösung eines Modells mit der Methode der gewichteten Summe, eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Die Lösungen, die bei Variation der *Grid Points* zwischen dem minimal und maximal möglichem Wert ermittelt werden, repräsentieren die gesamte Breite der Pareto-Front.

Noninferior Set Estimation Methode

Diese Methode ist nur anwendbar, wenn der Lösungsraum des multikriteriellen Problems konvex ist und wenn zudem die Zielfunktionen linear verlaufen. Mit der Methode werden Extrempunkte auf der Pareto-Front generiert und die Verbindungslinien zwischen diesen Extrempunkten werden untersucht. Gehört die Verbindungslinie zu den effizienten Punkten, führt eine Verschiebung ihrer Position zur Generierung von ungültigen Lösungspunkten. Das ist dann ein Zeichen dafür, dass die beiden Extrempunkte nebeneinander liegen. Gehört sie nicht zu den effizienten Lösungen, kann sie noch verschoben werden und die Lösungen verbessern sich, das heißt es gibt noch weitere Extrempunkte zwischen den beiden gefundenen (Cohon, 1978, S. 127ff). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3.6 graphisch dargestellt: Die Optimierung von Ziel eins führt zum Lösungspunkt A und die Optimierung von Ziel zwei zur Lösung B. Diese beiden Lösungen liegen nicht nebeneinander, eine Verschiebung ihrer Verbindungslinie führt nicht zu ungültigen Lösungen. Die effizienten Punkte werden hier mit der Methode der gewichteten Summe bestimmt. Dabei werden die Gewichte immer so gewählt, dass der Punkt mit der größten senkrechten Distanz zum vorherigen gefunden wird. Auch bei dieser Methode werden zuerst alle Ziele unabhängig voneinander optimiert und danach werden die Gewichte (w_1 und w_2 für das Ziel eins bzw. zwei) jeweils so gesetzt, dass w_1/w_2 der Steigung der Verbindungslinie zwischen den beiden Lösungen entspricht. In der Abbildung 3.6 werden zuerst die Lösungen A und B gefunden und anschließend, durch „Verschiebung“ der Geraden, die durch die Punkte A und B definiert wird, die Lösung C. Die Methode nutzt die Kenntnis aus, dass alle Punkte oberhalb der Verbindungslinie von zwei benachbarten effizienten Extrempunkten dominiert werden, da die Linie selber ja im konvexen Lösungsraum gültige und effiziente Punkte enthält (Cohon, 1978, S. 127ff). Bei realen Problemen ermöglicht

diese Methode oft eine schnellere Abschätzung der Pareto-Front als die beiden zuvor vorgestellten, da nicht von einem Pareto optimalen Punkt zum nächsten gegangen wird, sondern auch weiter entfernte Extrempunkte im Lösungsraum schnell gefunden werden. Mit weiteren Iterationen kann anschließend ein höherer Detaillierungsgrad erreicht werden (Cohon, 1978, S. 139f).

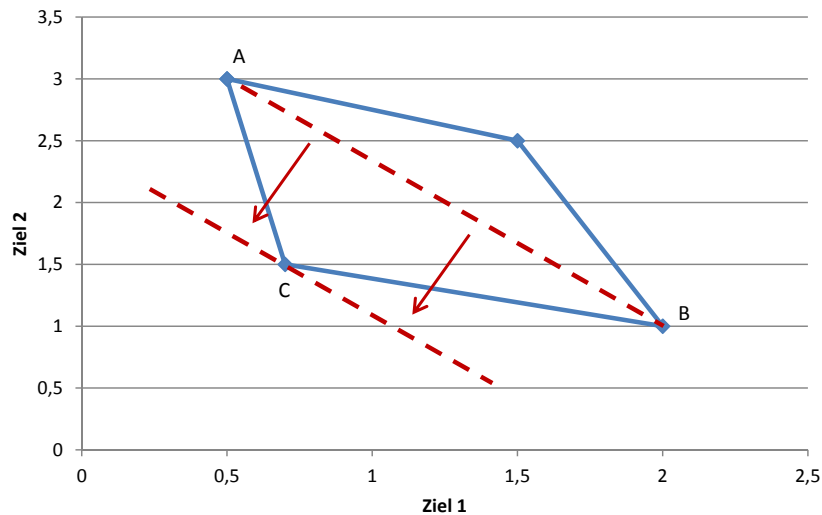


Abbildung 3.6.: Visualisierung der *Noninferior Set Estimation* Methode

***Normal Boundary Intersection* und *Normal Constraint* Methode**

Mit dem Ziel, gleichmäßig verteilte Lösungen auf der Pareto-Front zu generieren, wurden die Methoden der *Normal Boundary Intersection* und die *Normal Constraint* Methode entwickelt. Zur Erläuterung der Methoden wird im Folgenden von einem biobjektiven Optimierungsproblem ausgegangen. Die Methoden können aber ebenso Lösungen für Probleme mit mehr als zwei Zielsetzungen generieren. Die *Normal Boundary Intersection* nutzt das Wissen aus, dass in einem konvexen Raum zulässiger Lösungen die Verbindungslinie von einem beliebigen Punkt aus diesem Raum mit dem Ursprung durch die Pareto-Front geht und somit einen Lösungspunkt auf der Front des Lösungsraums enthält (Das und Dennis, 1998). Zur Erzeugung Pareto optimaler Punkte werden zuerst die individuellen Minima der einzelnen Zielsetzungen bestimmt. Die Verbindung dieser beiden Punkte wird konvexe Hülle der individuellen Minima genannt. Es wird nun eine Gerade von dem Mittelpunkt dieser Verbindungslinie Richtung Idealzielpunkt gezogen. Diese Gerade führt in konvexen Lösungsräumen durch

einen Pareto optimalen Punkt. Durch Lösen eines Maximierungsproblems zur Bestimmung des zulässigen Punktes mit der maximalen Distanz zum Referenzpunkt auf der konvexen Hülle der individuellen Minima, wird die entsprechende Pareto optimale Lösung ermittelt. Der erste Referenzpunkt ist der Mittelpunkt zwischen den individuellen Minima. Durch Verschieben des Referenzpunktes auf der Verbindungslinie der individuellen Minima wird ein Teil der Pareto-Front bestimmt. In der Abbildung 3.7 ist das Vorgehen zur Bestimmung eines Punktes auf der effizienten Front dargestellt. Die Punkte A und B sind die individuellen Minima der Ziele eins und zwei. C ist der Idealzielpunkt und D ist der Punkt auf der effizienten Front, der durch die Lösung des Maximierungsproblems bestimmt wird. Dafür wird die Distanz vom Ausgangspunkt zwischen den individuellen Minima und dem Idealzielpunkt C unter der Bedingung maximiert, dass die Lösung zulässig bleibt. So wird der Punkt D auf der effizienten Front gefunden. Ist der Lösungsraum nicht konvex, werden mit der Methode lokal Pareto optimale Punkte und auch Punkte, die nicht Pareto optimal sind, bestimmt (Shukla, 2007).

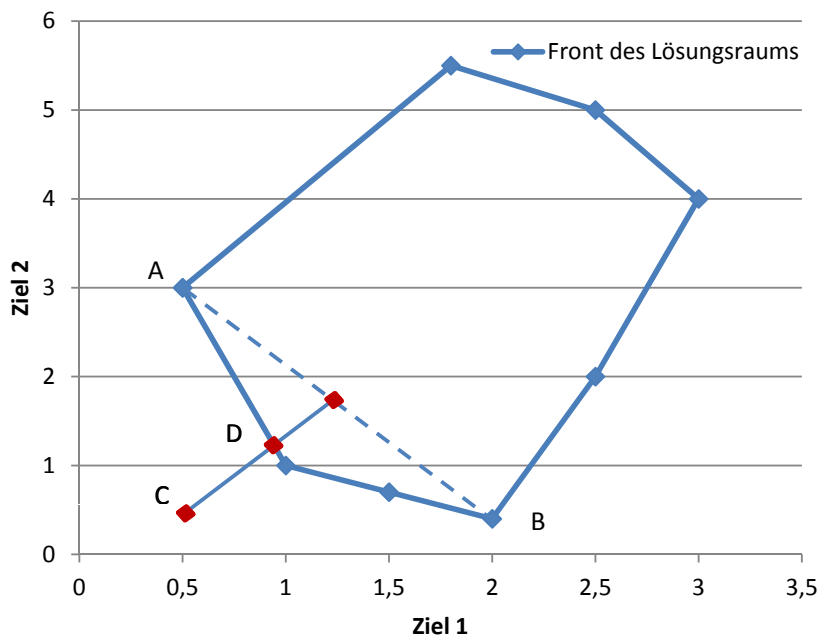


Abbildung 3.7.: Visualisierung der *Normal Boundary Intersection* Methode

Die *Normal Constraint* Methode von Messac u. a. (2003) wendet ein ähnliches Prinzip an: Zuerst werden die individuellen Optima der Ziele bestimmt. Diese werden, wie bei der *Normal Boundary Intersection*, durch eine Gerade verbunden. Von dieser Li-

nie aus werden anschließend in gleichmäßigen Abständen Normalen gebildet, die die Pareto-Front kreuzen. Daraufhin wird auch bei dieser Methode ein Optimierungsproblem gelöst, welches das gerade noch gültige Minimum auf der Normalen bestimmt. In Abbildung 3.8 ist dieses Vorgehen beispielhaft für die Bestimmung eines Punktes abgebildet. Die Punkte A und B sind die individuellen Minima und der Punkt C ist in diesem Beispiel als Referenzpunkt gewählt. Durch Minimierung des Punktes auf der Normalen im zulässigen Bereich, wird im Beispiel in Abbildung 3.8 der Punkt D bestimmt. Durch wiederholtes Lösen des Problems, für verschiedene Punkte auf der Verbindungslinie der individuellen Minima, wird eine Menge von Pareto optimalen Lösungen ermittelt.

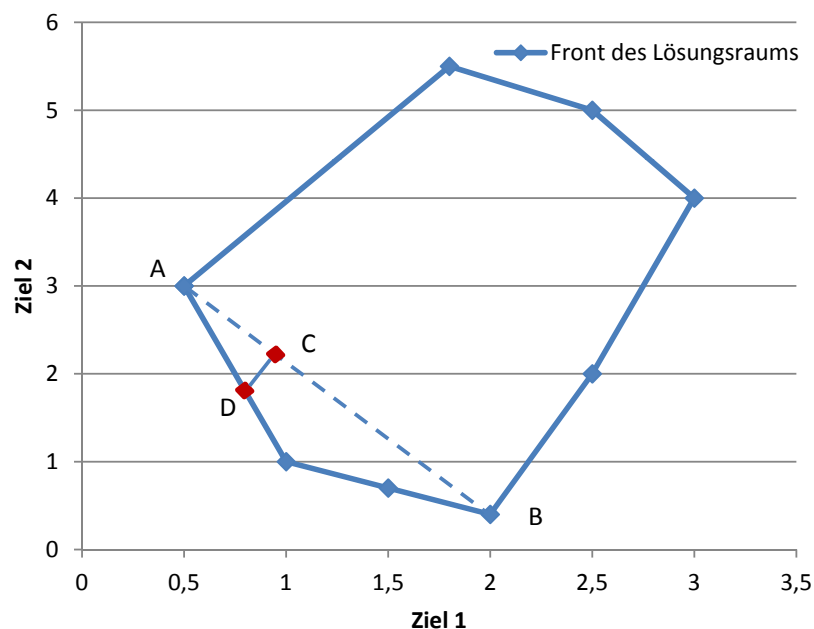


Abbildung 3.8.: Visualisierung der *Normal Constraint* Methode

Beiden Methoden ist gemein, dass sie eine gleichmäßigere Verteilung der Lösungen auf der Pareto-Front versprechen, wobei die Verteilung der Lösungen bei Anwendung der *Normal Constraint* Methode aufgrund der Bestimmung der Normalen von der konvexen Hülle der individuellen Minima gleichmäßiger ist. Darüber hinaus kann es bei Anwendung beider Methoden dazu kommen, dass Teile der effizienten Front unberücksichtigt bleiben (Messac und Mattson, 2004). Ist der Lösungsraum konvex, erzeugen beide Methoden nur effiziente Punkte auf der Pareto-Front. In nicht konvexen Lösungsräumen werden mit den Lösungsmethoden auch nicht effiziente Punkte

generiert. Zur Lösung solcher Probleme mit der *Normal Constraint* Methode oder der *Normal Boundary Intersection* haben Messac u. a. (2003) eine Methode entwickelt, mit der die gefundenen Lösungen im Nachhinein gefiltert werden können, so dass auch bei nicht konvexen Lösungsräumen nur noch die Pareto optimalen Lösungen in der Alternativenmenge enthalten sind.

Multikriterielle Simplexmethode

Mit der multikriteriellen Simplexmethode kann eine exakte Darstellung der Pareto-Front für lineare Probleme erreicht werden und zwar, indem das Verfahren von einem effizienten Extrempunkt zum nächsten fortschreitet (ebenso wie das Simplexverfahren für ein Kriterium von einer optimalen Ecke zur nächsten iteriert). Für das Verfahren werden die Charakteristika der reduzierten Kosten ausgenutzt. Sind diese für eine bestimmte Nichtbasisvariable für alle Ziele negativ oder sind Null, dominiert die Lösung, die durch Basistausch zugunsten dieser Variable erzeugt wird, die aktuelle Lösung. Die Effizienz dieser Lösung muss dann erneut geprüft werden: Gibt es noch negative reduzierte Kosten, ist die Lösung noch nicht effizient. Sind noch einige der Einträge in der Zeile der reduzierten Kosten für ein Ziel gleich Null, deutet dies auf alternative optimale Lösungen bezüglich dieses Ziels hin. Es kann also sein, dass die aktuelle Lösung dominiert wird. Es wird mit der Optimierung nur eines Ziels begonnen und so eine erste gültige Startlösung generiert. Am Ende des Verfahrens sind alle effizienten Extrempunkte für das Problem gefunden, und mithilfe der Kenntnis, dass alle Punkte zwischen zwei Extrempunkten in einem konvexen Raum zulässiger Lösungen auch zur Pareto-Front gehören, kann für lineare Probleme anschließend die Pareto-Front bestimmt werden (Yu und Zeleny, 1975). Aufgrund des hohen Rechenaufwands ist diese Methode für viele reale Probleme nicht anwendbar. Deswegen empfiehlt es sich auf eine exakte Darstellung der Pareto-Front zu verzichten, wenn diese nicht unbedingt notwendig ist (Cohon, 1978, S.130ff).

3.4.2. Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen untersuchen eine Menge möglicher Lösungspunkte auf der Suche nach einer Anzahl möglichst guter Lösungen. Die Identifizierung möglichst guter Lösungen geschieht über den Vergleich von zufällig ausgewählten Individuen aus der Alternativenmenge. Individuen sind dabei einzelne Lösungen aus der Population,

also der Menge der betrachteten Alternativen. Durch Kombination der Charakteristika von jeweils zwei Individuen werden neue Individuen erzeugt (Fogel u. a., 1966). Die Population hat dabei eine feste Größe, werden also neue Lösungspunkte in die Population mit aufgenommen, werden andere dafür eliminiert (Spears u. a., 1993). Für die Bewertung der Lösungen und somit die Entscheidung, welche Lösungen weiterhin betrachtet werden, also überleben, wird ihre Effizienz verglichen. Durch den direkten Vergleich der Individuen miteinander, können dominierte Lösungen schnell erkannt und eliminiert werden. Da sich dieses Prinzip gut zur Generierung der effizienten Front eignet, wurden evolutionäre Algorithmen schon früh bei der Lösung multikriterieller Probleme eingesetzt (Deb, 2003). Darüber hinaus ist eine Konzentration auf Regionen im Lösungsraum, die besonders interessant sind, möglich (Hajela und Lin, 1992). Evolutionäre Algorithmen generieren in einem Lösungsdurchlauf simultan mehrere Lösungen (die gesamte Population wird als Alternativenmenge ausgegeben), die dann vom Entscheidungsträger evaluiert werden können (Hajela und Lin, 1992)⁴.

Der Vorteil genetischer Algorithmen liegt in der Geschwindigkeit der Lösungsgenerierung und in der Möglichkeit, in einem Lösungsdurchlauf mehrere Lösungen zu erzeugen. Dabei ist jedoch die Qualität der Lösungen nicht sichergestellt. Es werden auch dominierte Lösungen generiert, da die gesamte Alternativenmenge unbekannt ist und somit nur ein Vergleich mit den aktuell bekannten Alternativen stattfinden kann. Effizienz kann also nur in Bezug auf die bereits bekannte Lösungsmenge definiert werden. Darüber hinaus ist es mit einigen Algorithmen schwierig Lösungen auf der gesamten Pareto-Front zu ermitteln. Nicht selten werden Regionen ausgespart oder es liegt ein Fokus auf bestimmten Regionen (Das und Dennis, 1997).

3.4.3. Goal Programming

Im Gegensatz zu den Methoden der Vektoroptimierung werden beim *Goal Programming* die Präferenzen des Entscheidungsträgers a priori berücksichtigt (Eiselt und Sandblom, 2010, S. 124ff). Es werden vom Entscheidungsträger Mindest- oder Zielwerte bestimmt, die als rechte Seiten für die formulierten Restriktionen eingesetzt werden. Die Zielsetzungen werden als weiche Restriktionen formuliert, die in der Lösung verletzt werden können. Die Abweichungen von den Zielwerten werden anschließend

⁴Evolutionäre Algorithmen zur Lösung multikriterieller Probleme werden u.a. in Hajela und Lin (1992); Horn u. a. (1994); Srinivas und Deb (1994); Fonseca und Fleming (1995) vorgestellt.

minimiert (Belton und Stewart, 2002, S. 9). Bei kleiner-gleich Restriktionen wird nur die Abweichung nach oben minimiert, bei größer-gleich Restriktionen die Abweichung nach unten und bei Gleichheitsrestriktionen werden beide Abweichungen betrachtet. Die Abweichungen werden in Variablen erfasst und in der Zielfunktion berücksichtigt, zum Beispiel mittels einer gewichteten Summe. Durch Minimierung der somit entstandenen Zielfunktion wird eine Kompromisslösung ermittelt, die den vom Entscheidungsträger definierten Zielwerten möglichst nahe kommt (Charnes und Cooper, 1961, S. 215ff). Die Abweichungen müssen vorab normiert werden und die Gewichte müssen die Wichtigkeit der Ziele untereinander widerspiegeln. An dieser Stelle kann der Entscheidungsträger seine Präferenzen einbringen, um zum Beispiel die Relation zwischen Kosten und ungenutzter Arbeitskraft auszudrücken (Eiselt und Sandblom, 2010, S. 124ff).

3.5. Gemischt-ganzzahlige multikriterielle Optimierung

In gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodellen ist der Lösungsraum nicht konvex (Zionts, 1979). Die Annahme eines konvexen Lösungsraums ist jedoch die Voraussetzung für die Anwendbarkeit vieler Methoden zur Lösung multikriterieller Optimierungsprobleme. Einige der Methoden zur Lösung linearer multikriterieller Probleme können trotzdem zur Lösung gemischt-ganzzahliger Probleme mit mehreren Zielsetzungen angewendet werden (Caramia und Dell’Olmo, 2008, S. 25f). Jedoch können, abhängig von der Struktur des Problems, eventuell nicht alle effizienten Lösungen gefunden werden. Zur Anwendbarkeit der Methode der gewichteten Summe und der *Constraint* Methode muss auch für gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme gelten, dass sowohl die Restriktionen als auch die Zielsetzungen linear formuliert werden können (Caramia und Dell’Olmo, 2008, S. 26). Im Fall von gemischt-ganzzahligen Problemen liegen jedoch nicht alle Optima auf der Front des Raums zulässiger Lösungen⁵. Darüber hinaus sind nicht alle Punkte auf der Front des Raums zulässiger Lösungen im Zielraum gültige Lösungspunkte für das Optimierungsmodell, wie das in linearen

⁵Obwohl in gemischt-ganzzahligen Problemen keine Front zur Begrenzung des Raums zulässiger Lösungen existiert, wird dieser Begriff zur Vereinfachung weiterhin verwendet. Gemeint sind die Lösungspunkte, die sich am äußeren Rand des Bereichs befinden, in dem die zulässigen Lösungen liegen. Im Fall von gemischt-ganzzahligen Problemen sind nicht alle Punkte auf der Front des Lösungsraums zulässige Lösungen, sondern nur die Lösungen, für die die ganzzahligen Variablen ebensolche Werte annehmen.

3. Grundlagen multikriterieller Entscheidungsfindung

Problemen der Fall ist (Zionts, 1979). Dieser Umstand führt dazu, dass die *Normal Boundary Intersection* und die *Normal Constraint* Methode nicht angewendet werden können (Jia und Ierapetritou, 2007); denn diese Methoden nutzen die Tatsache aus, dass in linearen Problemen alle Punkte im konvexen Lösungsraum gültige Lösungen sind. Für den gemischt-ganzzahligen Fall würden mit den Methoden nicht unbedingt zulässige Lösungspunkte gefunden, wenn die Normalen nicht zufällig durch einen solchen verlaufen.

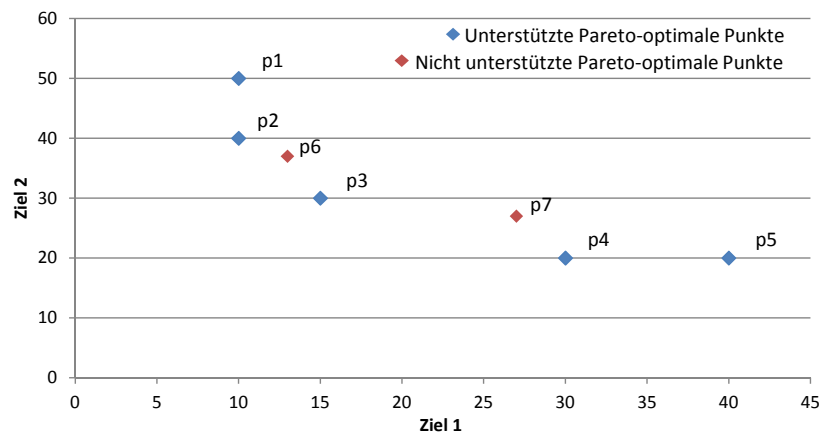


Abbildung 3.9.: Schematische Darstellung Pareto optimaler Lösungen im Zielraum gemischt-ganzzahliger Probleme

Die Definition sogenannter unterstützter Pareto optimaler Lösungen erfolgt über die Anwendbarkeit der Methode der gewichteten Summe zu ihrer Generierung (Ehrgott, 2006). Solche Lösungspunkte, für die es einen Gewichtungsvektor w gibt, mit dem sie ermittelt werden können, sind unterstützte Lösungspunkte auf der Pareto-Front. Für nicht unterstützte Lösungspunkte gibt es keinen solchen Gewichtungsvektor. Diese Punkte liegen im Inneren der konvexen Hülle (Ehrgott, 2006). Jedes multi-kriterielle Optimierungsproblem weist unterstützte Lösungen auf, schließlich erzeugt jede Gewichtung eine Lösung für das multi-kriterielle Optimierungsproblem (Ehrgott, 2006). In Abbildung 3.9 sind beispielhaft Pareto optimale Lösungen eines gemischt-ganzzahligen Problems mit zwei Zielsetzungen dargestellt. Punkte $p1$ bis $p5$ sind unterstützte Lösungen und gehören zur Front des Lösungsraums, wohingegen $p6$ und $p7$ nicht mit der Methode der gewichteten Summe generiert werden können. Einige der Lösungen sind lediglich schwach Pareto optimal ($p1$ und $p5$). Mit der *Constraint* Methode können auch nicht unterstützte Lösungspunkte ermittelt werden (Klamroth

u. a., 2004; Ehrgott, 2006). Aufgrund des erhöhten Rechenaufwands nutzen viele Autoren trotzdem die Methode der gewichteten Summe (Cohon, 1978, S. 289ff). Cohon (1978) argumentiert, dass zur Ermittlung einer Abschätzung der Menge der Pareto optimalen Lösungen die Methode der gewichteten Summe durchaus geeignet ist.

3.6. Multikriterielle Optimierung - Untersuchung der Pareto-Front

Die meisten Methoden zur Lösung von multikriteriellen Problemen zielen darauf ab, die Pareto-Front mehr oder weniger vollständig zu erzeugen, um dann eine Auswahl aus den effizienten Lösungen zu treffen. Die Auswahl einer umzusetzenden Lösung kann vom Entscheidungsträger aufgrund der großen Menge an Lösungen oftmals nicht ohne Unterstützung erfolgen. Verschiedene Ansätze wurden entwickelt, um die Auswahl für den Entscheidungsträger zu erleichtern (Cohon, 1978, S. 98f; Chankong und Haimes, 1983, S. 225ff; Das, 1999; Mattson u. a., 2004). Andere Autoren heben die Wichtigkeit einer gleichmäßigen Verteilung der ermittelten Lösungen hervor, damit vorerst alle Regionen die gleiche Relevanz erhalten (Das und Dennis, 1998). Andernfalls neigt der Entscheidungsträger nach Mattson u. a. (2004) dazu, seine Lösung aus einem Bereich zu wählen, in dem eine größere Anzahl an Lösungen erzeugt wurde.

Mattson u. a. (2004) haben eine Methode entwickelt, mit der die Lösungsmenge gefiltert werden kann, nachdem eine gleichmäßig verteilte Anzahl an Lösungen auf der Pareto-Front erzeugt wurde. So werden nur noch Lösungen dargestellt, die einen angemessenen Kompromiss der *krit* Ziele (im Vergleich zu benachbarten Lösungen) repräsentieren: Zu ähnliche Lösungen werden aus der Menge der präsentierten Lösungen gelöscht, um dem Entscheidungsträger die Auswahl zu erleichtern. Darüber hinaus werden Lösungen, die einen sehr großen *Tradeoff* haben, bei denen sich ein Ziel also deutlich verschlechtert für eine geringe Verbesserung eines anderen Ziels, nicht näher betrachtet. Diese Methode führt dazu, dass nur Regionen, in denen sich der Verlauf der Pareto-Front signifikant ändert, genauer untersucht werden. Kritisch ist bei dieser Methode der Aufwand bei der Erzeugung gleichverteilter Lösungspunkte auf der Pareto-Front zu sehen, wenn im Nachhinein ohnehin einige dieser Lösungen wieder gelöscht werden. Ähnlich funktioniert die Methode von Das (1999), bei der ein „Knie“ auf der Pareto-Front identifiziert und genauer untersucht wird. „Knie“ wird die Region genannt, in der die Pareto-Front eine Wölbung aufweist. Hier befinden sich Lösungen mit einem angemessenen Kompromiss zwischen den Zielen (Das, 1999).

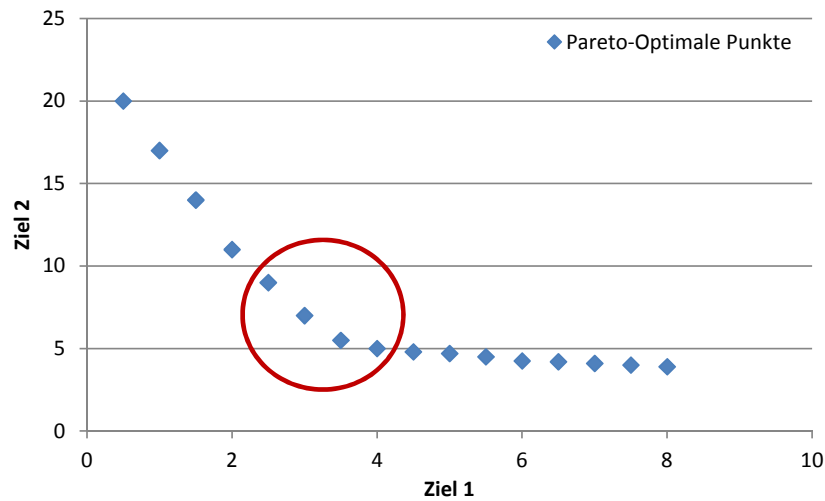


Abbildung 3.10.: Beispiel für Lösungen auf einer Pareto-Front mit markierter Knie-Region

In Abbildung 3.10 ist ein solches Knie einer effizienten Front beispielhaft dargestellt. Diese Region kann durch die Bestimmung der Steigung zwischen je zwei Punkten identifiziert werden. Dort, wo sich die Steigung über einen bestimmten Wert hinaus ändert, von einer steilen negativen Steigung zu einer flachen, ist der zu untersuchende Bereich⁶. Die Punkte in dieser Region versprechen besonders interessante Kompromisslösungen zwischen den betrachteten Zielsetzungen, da sich hier angemessen Pareto optimale Lösungen befinden. Auch die Identifizierung von mehreren Knie-Regionen ist so möglich.

Durch den Fokus auf Regionen, die besonders vielversprechend sind, geht jedoch die Gleichverteilung der Lösungen auf der effizienten Front verloren, was wiederum dazu führen kann, dass der Entscheidungsträger geneigt ist, eine Lösung aus diesem genauer untersuchten Teil der effizienten Front zu wählen. In Abbildung 3.10 sind die Punkte auf der „Ziel 1“-Achse gleichverteilt. Zur genaueren Untersuchung der Knie-Region könnten anschließend noch weitere Lösungen in dieser Region bestimmt werden. In den meisten Anwendungen ist dies durchaus erwünscht, da die Zielwerte in dieser Region

⁶Der Grad, um den sich die Steigung der Front ändern muss, um eine interessante Region zu identifizieren, wird vorab definiert. Er beeinflusst die Effizienz des Lösungsprozesses und kann auch dazu führen, dass Lösungen nicht gefunden werden, weil sie in einem Bereich der Front liegen, die nicht genauer untersucht wird. Es kann also notwendig sein, das Modell mit mehreren Paramtereinstellungen zu lösen, um den Punkt zu ermitteln, an dem das Knie der Pareto-Front beginnt.

ein gutes Gleichgewicht repräsentieren, wohingegen in den sehr flachen und sehr steilen Regionen ein Zielwert deutlich verschlechtert wird, bei geringfügiger Verbesserung eines anderen Zielwertes. Die *Normal Constraint* Methode und die *Normal Boundary Intersection* streben eine Gleichverteilung der generierten Lösungspunkte an. Dafür müssten die Lösungen vor dem Knie in Abbildung 3.10 auf der „Ziel 2“-Achse den gleichen Abstand voneinander haben, wie die Lösungen rechts vom Knie auf der „Ziel 1“-Achse (Das und Dennis, 1998; Messac u. a., 2003). In praktischen Problemstellungen sind Regionen, in denen ein Ziel einen deutlich schlechteren Wert annimmt, zur geringfügigen Verbesserung von einem anderen Ziel, in der Regel nicht von Interesse.

Im Folgenden werden wissenschaftliche Arbeiten aus der humanitären Logistik auf die angewendeten Methoden zur Lösung multikriterieller Probleme untersucht. Anschließend werden diese Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der in dieser Arbeit betrachteten Situation evaluiert.

3.7. Lösungsmethoden für multikriterielle Probleme in der humanitären Logistik

Die Methoden zur Lösung multikriterieller Probleme in der humanitären Logistik wurden auf Basis von Standardmethoden, die weiter oben bereits erläutert wurden, entwickelt. Aufgrund der einfachen Anwendbarkeit und der Flexibilität nutzen viele Autoren die Methode der gewichteten Summe zur Lösung von Fragestellungen der humanitären Logistik mit mehreren Zielsetzungen (Haghani und Oh, 1996; Barbarosoğlu und Arda, 2004; Clark und Culkin, 2013; Chang u. a., 2007; Sheu, 2007; Yi und Özdamar, 2007; Mete und Zabinsky, 2010; Rawls und Turnquist, 2010). Diese Methode ermöglicht den Einsatz von Standardsoftware zur Lösungsfindung. Einige Autoren erwähnen nicht einmal die Betrachtung mehrerer Zielsetzungen bei der Anwendung der Methode, sondern nutzen eine gewichtete Summe in der Zielfunktion, ohne die Ergebnisse auf Sensitivität zu testen (Mete und Zabinsky, 2010; Rawls und Turnquist, 2010). Vorwiegend wird die gewichtete Summe eingesetzt, um einen Kompromiss zwischen operationalen Kosten und Bedarfsbefriedigung zu erzielen. Viele der genannten Autoren nutzen Strafkosten zur Minimierung von unbefriedigter Nachfrage oder der Zeit, die Betroffene auf Hilfe warten müssen (Haghani und Oh, 1996; Barbarosoğlu und Arda, 2004; Chang u. a., 2007; Mete und Zabinsky, 2010; Rawls und Turnquist, 2010).

Dies ermöglicht eine direkte Kombination mit Kostenminimierungszielen, wobei die Strafkostensätze als Gewichte fungieren. Ein Problem dieser Methode ist die Wahl der Gewichte bzw. der Strafkosten, die einen entscheidenden Einfluss auf die Lösung hat. Der Entscheidungsträger kann hier seine Präferenzen bezüglich der Bedeutung der Ziele einbringen, die Auswirkungen sind allerdings nur begrenzt absehbar. Die in der Literatur u.a. von Cohon (1978) geforderte Analyse der Gewichte durch deren Variation und wiederholtes Lösen des Optimierungsproblems mit verschiedenen Gewichten, findet in der humanitären Literatur nur selten Anwendung. Dies ist nach Meinung vieler Autoren dadurch begründet, dass die Priorität deutlich auf der Befriedigung der Nachfrage liegt: Die Strafkosten für unbefriedigte Bedarfe müssen im Vergleich zu den operationalen Kosten nur hoch genug angesetzt werden, um dem humanitären Zweck des Modells gerecht zu werden (Barbarosoğlu und Arda, 2004; Rawls und Turnquist, 2010). Das funktioniert jedoch nur für Strafkosten, die für eine vorab bekannte oder eine sehr wahrscheinlich auftretende Nachfragemenge anfallen. In diesem Fall liefert das Modell eine Lösung zur kostenminimalen Deckung der vorhandenen Nachfrage. Ist das Auftreten der Nachfrage eher unwahrscheinlich, wie es in der Wiederherstellungsphase der Fall ist, führt ein unlimitiertes Erhöhen der Strafkosten zur Beschaffung viel zu hoher Sicherheitsbestände. Diese müssten im Fall von verderblichen Gütern im schlimmsten Fall entsorgt werden. Zumindest aber wäre das Ergebnis des Modells in der betrachteten Wiederherstellungsphase einer Hilfsaktion nicht durchführbar, da die knappen Ressourcen in dieser Phase nicht berücksichtigt würden. Deswegen ist bei der Betrachtung sehr unsicherer Nachfragemengen eine ausführliche Analyse der Strafkosten unabdingbar, um realistische Ergebnisse zu erzielen, die dann auch umgesetzt werden können.

Salmerón und Apte (2010) und Nolz u. a. (2010) formulieren einige Zielsetzungen als Restriktionen und nur jeweils ein Ziel bleibt in der Zielfunktion bestehen. Es bestehen jedoch Unterschiede in der Umsetzung der Methoden. Salmerón und Apte (2010) optimieren die zwei Ziele, die sie definieren, in zwei Schritten: Zuerst wird das erste Ziel, die Minimierung der Schadensfälle durch nicht rechtzeitig versorgte und evakuierte Verletzte, als Zielfunktion definiert und das Modell gelöst. Anschließend wird das zweite Ziel, die Minimierung nicht evakuierter Betroffener, die zwar keine medizinische Versorgung, aber eine Evakuierung benötigen, optimiert. Dabei wird die erste Zielsetzung als Restriktion formuliert und es wird eine maximal zulässige Abweichung von der rechten Seite (dem Optimum von Ziel 1) der Restriktion zugelassen. Durch dieses

Vorgehen kann es zu beliebig schlechten Ergebnissen in Bezug auf die zweite Zielsetzung kommen, da das Optimum von Ziel 1 nur um einen bestimmten Wert verfehlt werden darf. Darüber hinaus kann die Formulierung der unbefriedigten Nachfrage als Restriktion mit maximal erlaubter Abweichung dazu führen, dass Ressourcen ungenutzt bleiben und die unbefriedigte Nachfrage höher ist als unbedingt notwendig. Nolz u. a. (2010) nutzen die *Constraint* Methode nach Laumanns u. a. (2006) zur Lösung des Problems. Dafür setzen sie die rechte Seite der Zielsetzung, die als Restriktion formuliert wird, vorerst auf einen sehr hohen Wert, um ihn dann iterativ zu verkleinern. Tzeng u. a. (2007) normieren die Ziele und formulieren sie dann als Restriktionen mit einer gemeinsamen Variable als rechte Seite. Diese rechte Seite wird in der Zielfunktion maximiert, um eine möglichst gute Erreichung der Ziele zu gewährleisten. Es wird also eine Kompromisslösung gesucht, bei der alle Ziele den gleichen Zielerreichungsgrad haben (die rechte Seite der Restriktionen). Dieses Vorgehen ist nur möglich, wenn zwischen den Zielen keine Prioritäten bestehen. Es werden auch Kombinationen der Methoden genutzt, indem zum Beispiel zwei Ziele in der Zielfunktion mittels der gewichteten Summe kumuliert und weitere als Restriktionen formuliert werden (Nolz u. a., 2010; Rawls und Turnquist, 2011). Einige Autoren haben vor allem zum Lösen von größeren Problemen Heuristiken entwickelt, wie zum Beispiel Lin u. a. (2011) sowie Nolz u. a. (2010), die einen genetischen Algorithmus nach Deb u. a. (2002) anwenden, oder Drezner u. a. (2006), die eine Tabusuche nutzen, um ein multikriterielles Problem zu lösen. Barbarosoğlu u. a. (2002) haben für ihr biobjektives Modell eine Heuristik entwickelt, bei der für jedes Ziel ein Modell aufgestellt wird und diese iterativ gelöst werden. Die Lösung bezüglich des einen Ziels geht dann jeweils in das Modell zu Optimierung des anderen Ziels ein. Auch Goal Programming findet in der Literatur zur humanitären Logistik Anwendung. So minimieren Ortuño u. a. (2011) und Vitoriano u. a. (2011) die gewichtete Summe der Abweichungen von den gewünschten Zielwerten ihrer als Restriktionen formulierten Ziele. Sie nutzen also weiche Restriktionen, um eine Kompromisslösung zwischen den verschiedenen Kriterien zu generieren.

In dieser Arbeit wird eine Problemstellung in der Wiederherstellungsphase betrachtet. Die Gefahr von Unterbrechungen der laufenden Hilfsaktion besteht jedoch. Dabei ist unbekannt, wo und wann eine solche Unterbrechung eintreten wird. Es muss also unter großen Unsicherheiten geplant werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein konkretes Szenario tatsächlich eintritt, ist sehr gering. Aus diesem Grund ist es ausreichend, eine Abschätzung über die Front der effizienten Lösungen zu generieren. Dafür wird

in dieser Arbeit die Methode der gewichteten Summe als eine mögliche Lösungsmethode angewendet. In Praxisproblemen werden ohnehin selten alle Pareto optimalen Lösungen benötigt, um dem Entscheidungsträger eine gute Auswahl effizienter Lösungen anbieten zu können (Cohon, 1978, S. 289ff). Darüber hinaus wird zur Lösung des vorliegenden Planungsproblems auch die laufzeitintensivere *Constraint* Methode angewendet, um auch nicht unterstützte Pareto optimale Lösungen zu ermitteln. Das *Goal Programming* ist in der betrachteten Fragestellung nicht anwendbar, da es nicht möglich ist, vorab Zielerreichungsgrade festzulegen. Vor allem die Nachfrage, die unbefriedigt bleibt, soll so gering wie möglich gehalten werden. Sowohl die Methode der gewichteten Summe als auch die *Constraint* Methode bieten hier gute Möglichkeiten, einen Überblick über die möglichen Kompromisslösungen zu erhalten. Die Anwendung evolutionärer Algorithmen wäre eine weitere Möglichkeit die Problemstellung zu lösen. Aufgrund der teilweise kontinuierlichen Variablen ist die Alternativenmenge jedoch sehr groß, wodurch zahlreiche Vergleiche nötig werden, um eine gute Qualität der Lösung zu garantieren. Darüber hinaus ist eine große Anzahl Restriktionen zu berücksichtigen, was dazu führt, dass auch die Ermittlung einer zulässigen Lösung erschwert wird. In der vorliegenden Arbeit wird sich daher auf die Lösung des Modells mit der Methode der gewichteten Summe und der *Constraint* Methode beschränkt. Im folgenden Kapitel wird die betrachtete Situation genauer beleuchtet und das multikriterielle Modell *mHumLog* wird vorgestellt. Im Anschluss daran werden die Lösungsmethoden und ihre Umsetzung vorgestellt.

4. Multikriterielle Optimierung in *Overlapping Disasters*

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass in der humanitären Logistik zahlreiche multikriterielle Modelle formuliert werden. Dabei geht es beispielsweise um die Planung von Routen zur Hilfsgüterverteilung, um die Positionierung von Standorten und um die Bestimmung von Lagermengen. Die Zielsetzungen und Methoden zur Lösung multikriterieller Probleme aus der humanitären Logistik wurden ebenfalls vorgestellt. Zur Lösung der Modelle wird dabei mehrheitlich auf Planungsmethoden bei mehrfachen Zielen zurückgegriffen, die auch in der kommerziellen Logistik Anwendung finden. Oftmals müssen diese Methoden auf die Erfordernisse der humanitären Logistik angepasst werden, damit sie anwendbar sind. Dieses Kapitel widmet sich der Vorstellung des multikriteriellen Modells *mHumLog*. Darüber hinaus werden aufbauend auf den Verfahren, die im vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurden, zwei Methoden beschrieben, die zur Lösung des Modells *mHumLog* angewendet werden.

4.1. Einführung des multikriteriellen Transshipment-Modells *mHumLog*

In diesem Abschnitt wird die Ausgangssituation für das multikriterielle Transshipment-Modell *mHumLog* vorgestellt. Anschließend werden die Grundlagen, auf denen die Modellentwicklung aufbaut, präsentiert, bevor die Zielsetzungen, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen, formuliert werden.

4.1.1. Ausgangssituation und Planungsproblem

In der hier betrachteten Ausgangssituation ist bereits eine Hilfsaktion etabliert und somit existiert das Distributionsnetzwerk auch schon, bestehend aus Regionallagern, einem Zentrallager und einem globalen Lager (siehe Abbildung 4.1).

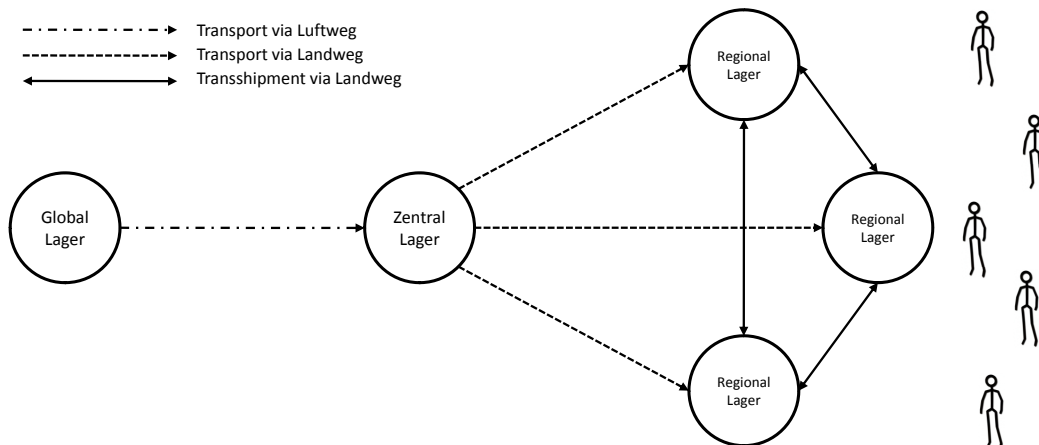


Abbildung 4.1.: Lagerhaltungsstruktur des betrachteten Problems (Rottkemper u. a., 2012)

Diese Struktur ist angelehnt an die Darstellung von Balçık und Beamon (2008) in Abbildung 2.4. Die Transportzeiten und -kosten zwischen den Lagern sind bekannt und deterministisch gegeben. Zudem sind bereits verschiedene Bestandsmengen in den Lagern vorhanden, die für die laufende Hilfsaktion benötigt werden. Unter der Annahme, dass die Hilfsaktion wie geplant fortgesetzt werden kann, existiert auch ein bekannter Bedarf an Hilfsgütern. In dieser Arbeit wird nur ein Hilfsgut betrachtet; es wäre aber durchaus möglich, das entwickelte Modell für mehrere Hilfsgüter zu formulieren. Dann könnte der Transport der Güter gemeinsam geplant werden.

Das globale Lager dient als Quelle für das zentrale Lager; es ist außerhalb des betroffenen Gebiets angesiedelt (action medeor, 2013; WFP - World Food Programme, 2013). Das zentrale Lager befindet sich in der betroffenen Region, zum Beispiel in der Nähe eines Flughafens (Balçık u. a., 2010). So können die Hilfsgüter schnell von außen in die betroffene Region gelangen. Von dort aus werden die Hilfsgüter über den Landweg zu den Regionallagern transportiert. Die Versorgung der Bevölkerung findet direkt an den regionalen Lagern statt (Balçık u. a., 2010). Die weitere Verteilung der Hilfsgüter wird im Modell nicht abgebildet. Das Angebot des globalen Lagers wird als unlimitiert angesehen, denn es wird davon ausgegangen, dass das globale Depot problemlos von externen Anbietern beliefert werden kann (Tiemessen u. a., 2013).

Hilfsgüter können bei Bedarf auch zwischen den regionalen Lagern transportiert werden; damit kann die geringe Distanz, die zwischen den Lagern besteht, ausgenutzt werden, wodurch schneller auf unerwartete Ereignisse reagiert werden kann, als

wenn erst eine Nachlieferung über das zentrale Lager erfolgen muss. Hier wird davon ausgegangen, dass Lieferungen zwischen den regionalen Lagern einen Tag benötigen, Lieferungen aus dem Zentrallager zwei Tage und Nachbestellungen aus dem globalen Lager sind drei Tage unterwegs. Das Konzept des Transshipments zwischen Lagern auf einer Ebene ist in der humanitären Logistik nicht weit verbreitet (Balçık u. a., 2010). In der kommerziellen Logistik wird das Prinzip der Umverteilung zwischen Lagern auf der gleichen Distributionsebene dagegen oft genutzt, um Bestandsengpässen vorzubeugen (Simchi-Levi u. a., 2003, S. 136; Herer u. a., 2006).

Während der laufenden Hilfsaktion tritt nun eine Unterbrechung ein. Diese Unterbrechung kann in Form einer Erhöhung der Nachfrage, zum Beispiel durch den Ausbruch einer Epidemie, oder einer Verringerung der Angebots, zum Beispiel weil ein Lager zerstört oder geplündert wurde, auftreten. Infolge der Unterbrechung findet eine Allokation der Hilfsgüter zwischen den Regionallagern und vom Zentrallager in die Regionallager statt. Darüber hinaus muss über Nachbestellungen zur weiteren Versorgung der Bevölkerung entschieden werden. Diese Entscheidungen müssen unter Berücksichtigung der Gefahr weiterer Unterbrechungen getroffen werden. So kann sich zum Beispiel eine Epidemie schnell in benachbarte Regionen ausbreiten. Diese Unsicherheit führt zur Berücksichtigung sogenannter unsicherer Nachfrage im Modell, die auftreten kann, aber nicht muss.

Die Hilfsaktion wird über mehrere Perioden, aber für einen begrenzten Zeitraum neu geplant. Nach diesem wird davon ausgegangen, dass die Hilfsaktion wie zuvor fortgesetzt werden kann, da wieder größere Mengen Hilfsgüter über die standardisierten Transportwege (in der Regel über die Seefracht) ins Land und in die betroffene Region gelangen.

4.1.2. Transshipment-Modell als Grundlage des Modells *mHumLog*

Die Distributionsstrukturen in der vorliegenden Situation ähneln Strukturen der kommerziellen Logistik, speziell im Einzelhandel. So ist es naheliegend die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus der kommerziellen Logistik zu nutzen und auf dieser Grundlage ein mathematisches Modell zur Optimierung von Transshipment- und Nachbestellungsentscheidungen für die vorliegende Situation zu entwickeln. Dem Modell *mHumLog* liegt ein Modell zur Optimierung einer kommerziellen Lieferkette, bestehend aus einem Anbieter und mehreren Einzelhändlern, zugrunde (Herer u. a., 2006). Dieses

wird im folgenden vorgestellt. Es kann sich zum Beispiel um die Lieferkette eines Warenhauses handeln, mit einem zentralen Lagerhaltungs- und Distributionszentrum und mehreren Filialen. In der Arbeit von Herer u. a. (2006) wird jede Periode separat optimiert und eine optimale Transshipment- und Nachbestellungsstrategie für das Netzwerk aus Einzelhändlern für jede Periode bestimmt. Obwohl es sich um eine kommerzielle Anwendung handelt, wird davon ausgegangen, dass Nachfrage, die in einer Periode unbefriedigt bleibt, nicht von anderen Anbietern außerhalb des betrachteten Systems befriedigt werden kann, sondern durch eine Nachbestellung beim Anbieter nachträglich erfüllt wird. Da die Nachbestellungen zu einer verspäteten Nachfragebefriedigung führen, werden jedoch Strafkosten für diesen Teil der Nachfrage berücksichtigt (p_i). Es ist darüber hinaus möglich, Transshipments zwischen den Einzelhändlern vorzunehmen, die innerhalb der gleichen Periode zu Nachfragedeckung führen.

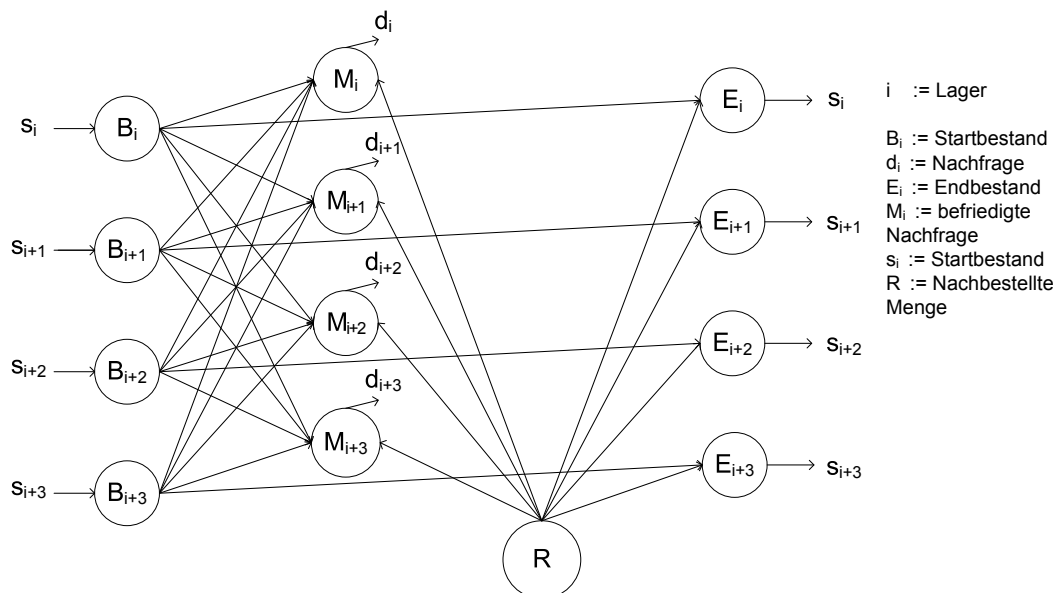


Abbildung 4.2.: Netzwerkflussmodell von Herer u. a. (2006)

Das Netzwerk, das dem Modell von Herer u. a. (2006) zugrunde liegt, ist in Abbildung 4.2 dargestellt. B_i ist der Bestand zu Beginn einer jeden Periode im Lager i . Dieser kann entweder zur Befriedigung von Nachfrage am eigenen oder an einem anderen Standort genutzt werden (M) oder er fließt in den Endbestand des eigenen Standortes ein (E_i). Auch die Nachbestellung kann zur Bedarfsbefriedigung genutzt werden (Fluss von R nach M) oder in den Endbestand der Standorte eingehen, damit sichergestellt ist, dass am Anfang der nächsten Periode der Bestand wieder die Höhe s annimmt.

Damit keine Transporte zur Minimierung von Lagerhaltungskosten durchgeführt werden, müssen die Parameter so definiert werden, dass $h_i \leq c_{ij} + h_j \quad \forall i, j \in DE$ gilt. Die Lagerhaltung (h_i) in einem Lager i darf also nicht teurer sein, als die Lagerhaltung (h_j) in einem anderen Lager j plus der Transportkosten zwischen diesen Lagern (c_{ij}). Außerdem wird davon ausgegangen, dass Transshipments nicht durchgeführt werden, um Lagerbestand aufzubauen, sondern nur, um aktuelle Nachfrage zu decken.

Die Nachbestellung vom Anbieter dauert eine Periode. Der Startbestand s_i wird für jeden Einzelhändler bestimmt und ist in jeder Periode gleich hoch. Das bedeutet, dass alle Einheiten, die in der aktuellen Periode zur Bedarfsbefriedigung genutzt werden, zur nächsten Periode wieder aufgefüllt werden. Diese Annahme macht es möglich, die Perioden unabhängig voneinander zu betrachten. Die Nachfrage ist stochastisch und dementsprechend erst in der jeweiligen Periode bekannt, was dazu führen kann, dass das ganze System aus Einzelhändlern in einer Periode die aufgetretene Nachfrage nicht decken kann.

Die Planungssituation kann als Netzwerkflussmodell formuliert werden. In Tabelle 4.1 sind die Variablen und Parameter gegeben, die im Netzwerkflussmodell benötigt werden. Das lineare Modell, das von Herer u. a. (2006) für eine Periode entwickelt wird, sieht folgendermaßen aus:

$$\min \sum_{i=1}^N (h_i \cdot F_{B_i E_i} + \sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot F_{B_i M_j} + p_i \cdot F_{RM_i}) \quad (4.1)$$

Die Zielfunktion (4.1) minimiert die Kosten, die für Lagerhaltung und Transport zwischen den Einzelhändlern entstehen. Zudem werden Strafkosten berücksichtigt, die für den Teil der Nachfrage auftreten, der nicht direkt gedeckt werden kann, sondern erst durch eine Nachbestellung vom Anbieter. Die Kosten für nachbestellte Güter vom Anbieter gehen nicht in die Zielfunktion ein, da sie nicht von den Entscheidungsvariablen abhängen. Es wird davon ausgegangen, dass die Einzelhändler von einem gemeinsamen Distributionszentrum beliefert werden. Darüber hinaus sind die Transportkosten identisch, egal, ob etwas nachbestellt wird, um die Nachfrage bei einem Einzelhändler direkt zu befriedigen, oder um den Lagerbestand wieder auf das geforderte Niveau zu bringen. Die Kosten für den Transport fallen somit für jede Einheit der nachgefragten Güter $\sum_{i=1}^N d_i$ an. Es wird in der Zielfunktion also ein Kompromiss zwischen

Tabelle 4.1.: Symbole des Modells von Herer u. a. (2006)

Mengen und Indizes	Definition
DE	Menge der Einzelhändler/ regionalen Lager, $DE := \{1, \dots, N\}$.
i, j	Index für die Einzelhändler/ regionale Lager, $i, j \in DE$.
Parameter	Definition
c_{ij}	Transshipmentkosten, die beim Transport von Einzelhändler i zu Einzelhändler j pro Mengeneinheit (ME) anfallen.
d_i	Aktuelle Nachfrage, die am Lager i auftritt in ME.
h_i	Lagerhaltungskosten, die am Lager i auftreten (je ME).
p_i	Strafkosten, die am Lager i auftreten, je ME unbefriedigter Nachfrage.
s_i	Startbestand (ME) an Lager i in jeder Periode.
Variablen	Definition
$F_{B_iE_i}$	Teil des Lagerbestands, der bei Einzelhändler i verbleibt (in Einheiten des betrachteten Gutes).
$F_{B_iM_i}$	Teil des Lagerbestands, der bei Einzelhändler i genutzt wird, um Bedarf zu decken (in Einheiten des betrachteten Gutes).
$F_{B_iM_j}$	Teil des Lagerbestands, der von Einzelhändler i zu Einzelhändler j transportiert wird, um Bedarf zu decken (in Einheiten des betrachteten Gutes).
F_{RE_i}	Lagerbestand, der durch Nachbestellung vom Zentrallager bei Einzelhändler i hinzukommt (in Einheiten des betrachteten Gutes).
F_{RM_i}	Unbefriedigte Nachfrage bei Einzelhändler i , die durch Nachbestellung befriedigt wird (in Einheiten des betrachteten Gutes).

Lagerhaltungs- und Transshipmentkosten sowie Strafkosten für verspätet befriedigte Nachfrage gesucht.

$$s_i = F_{B_iM_i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{B_iM_j} + F_{B_iE_i} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4.2)$$

Die Restriktionen (4.2) definieren die verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten des Startbestands von Einzelhändler i . Dieser ist am Anfang der Periode gegeben und geht somit als Parameter in das Modell ein. Der Startbestand kann entweder zur Befriedigung des Bedarfs beim Einzelhändler i selber dienen, oder zur Bedarfsbefrie-

digung bei einem anderen Einzelhändler $j \neq i$. Eine dritte Möglichkeit ist, dass die Güter im Lager des Einzelhändlers i verbleiben.

$$F_{B_i M_i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{B_j M_i} + F_{R M_i} = d_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4.3)$$

Die Restriktionen (4.3) sorgen dafür, dass die Nachfrage, die bei Einzelhändler i auftritt, entweder aus dem eigenen Lager gedeckt wird oder aus einem Lager von einem anderen Einzelhändler. Alternativ kann die Nachfrage auch durch eine Nachbestellung vom Anbieter gedeckt werden, das dauert dann jedoch länger, wodurch vorerst eine Fehlmenge entsteht, die in der Zielfunktion mit Strafkosten belegt wird.

$$\sum_{i=1}^N d_i = \sum_{i=1}^N (F_{R M_i} + F_{R E_i}) \quad (4.4)$$

Die Gesamtnachfrage aller Einzelhändler entspricht genau der Menge, die insgesamt nachbestellt wird und dann entweder direkt zur Nachfragedeckung dient oder in den Endbestand des Lagers eingeht (4.4). Somit ist sichergestellt, dass am Ende der Periode wieder $\sum_{i=1}^N s_i$ Einheiten in den Lagern der Einzelhändler vorrätig sind. Der Lagerbestand, der zu Beginn einer Periode verfügbar ist, wird durch die Befriedigung von Nachfrage am eigenen oder an anderen Standorten verringert. Die Nachfrage, die in einer Periode nicht durch die Einzelhändler befriedigt werden kann und somit nachbestellt werden muss, geht nicht in die Lager der Händler ein, sondern wird direkt zur Nachfragebefriedigung genutzt. Um den Startbestand konstant zu halten, muss die gesamte Nachfrage, die in einer Periode auftritt, nachbestellt werden. Restriktion (4.4) sorgt somit dafür, dass der Gesamtbestand im System konstant bleibt.

$$F_{B_i E_i} + F_{R E_i} = s_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4.5)$$

Die Restriktionsgruppe (4.5) legt für jeden Einzelhändler fest, welche Menge des betrachteten Gutes nachbestellt werden muss, damit der Startbestand zu Beginn der nächsten Periode wieder auf dem geforderten Niveau ist. Abschließend werden mit (4.6) die Nichtnegativitätsbedingungen definiert.

$$F_{B_i E_i}, F_{B_i M_j}, F_{R M_i}, F_{R E_i} \geq 0 \quad \forall i, j = 1, \dots, N \quad (4.6)$$

Ein guter Startbestand s_i , der das Lagerniveau für jeden Einzelhändler i definiert, wird mittels einer Monte-Carlo Simulation bestimmt. Der optimale Startbestand kann, aufgrund der Unsicherheiten, die berücksichtigt werden müssen, nicht ermittelt werden. In der Simulation wird das vorgestellte Modell mit verschiedenen Zufallsausprägungen der Nachfragewerte wiederholt durchlaufen und der Startbestand wird nach jedem Durchlauf angepasst. So nähert sich das Lagerniveau, welches anfangs aufgrund der angenommenen Nachfrageverteilung für den jeweiligen Einzelhändler geschätzt wurde, einem guten Wert an. In Abschnitt 4.3 wird gezeigt, wie das vorgestellte Modell von Herer u. a. (2006) auf die Anforderungen in *Overlapping Disaster* Situationen angepasst werden kann.

4.1.3. Zielsetzungen bei *Overlapping Disasters*

Mit der sorgfältigen Formulierung der Zielsetzungen wird die Qualität der Lösung eines Optimierungsmodells sichergestellt (Cohon, 1978, S. 19f). Das am häufigsten formulierte Ziel bei der Durchführung einer Hilfsaktion ist die Versorgung der betroffenen Bevölkerung (siehe Anhang A.2). Dieses Ziel ist auch in der hier betrachteten Problemstellung vorrangig zu berücksichtigen. Umgesetzt wird diese Zielsetzung durch die Minimierung der unbefriedigten Nachfrage. Diese Formulierung hat zwei Vorteile gegenüber der Formulierung der Versorgungsmaximierung. Zum einen kann eine Fairnessbetrachtung mit einbezogen werden, indem Nachfrage, die schon länger unbefriedigt ist, priorisiert behandelt wird, und zum anderen wird durch diese Priorisierung auch insgesamt dafür gesorgt, dass Nachfrage nicht länger als unbedingt notwendig unbefriedigt bleibt. Die reine Maximierung der Mengen der gelieferten Hilfsgüter dient in der ersten Katastrophenbewältigungsphase dazu, so viele Hilfsgüter wie möglich bereit zu stellen. In der, im Zuge dieser Ausarbeitung, betrachteten Wiederherstellungsphase können die Bedarfe schon genauer spezifiziert und somit auch gezielter befriedigt werden (Long und Wood, 1995). Auch das knappe Budget in dieser Phase führt dazu, dass bedarfsgerecht geliefert werden muss. Zur Umsetzung dieser Anforderung wird die Minimierung der Logistikkosten als zweite Zielsetzung formuliert. Diese sorgt dafür, dass die Hilfsaktion effizient durchgeführt wird. In der Katastrophenbewältigungsphase hingegen kann die Kostenbetrachtung niedriger priorisiert werden, da Hilfsorganisationen teilweise so viel Budget für die Hilfe nach einer akuten Katastrophe zur Verfügung

haben, dass es nicht vollständig abgerufen werden kann (Médecins Sans Frontières - Ärzte Ohne Grenzen e.V., 2012).

Die Distanzen, die in vielen Planungsmodellen der humanitären Logistik berücksichtigt werden, sind in der hier betrachteten Fragestellung nicht von vorherrschender Relevanz, da das Distributionsnetzwerk schon etabliert ist. Die Minimierung der Distanzen eignet sich bei Fragestellungen der Katastrophenvorsorge, wenn die Gestaltung der Netzwerkes zur Hilfsgüterverteilung bestimmt werden soll (Jahre und Navangul, 2011). Die Transportzeiten sind in der betrachteten Situation ebenso kaum beeinflussbar. Die Geschwindigkeit der Nachfragebefriedigung wird allerdings durch die Gewichtung der unbefriedigten Nachfrage gemäß der Zeitspanne, die sie bereits unbefriedigt ist, berücksichtigt.

Auch die Minimierung des Zeitpunktes, an dem die Hilfsaktion beendet ist, ist eine Zielsetzung, die in der Katastrophenbewältigung ihre Berechtigung hat. In der Wiederherstellungsphase dauert die Hilfe in der Regel bereits über Monate, in komplexen Katastrophen oftmals sogar über Jahre an (van Wassenhove, 2006; Human Rights Watch, 2013). In der hier betrachteten Situation wird jedoch stattdessen der Ausgleich der Unterbrechung dieser Hilfsaktion angestrebt und somit ein fester Planungszeitraum betrachtet. Die Hilfsaktion an sich ist damit in der Regel nicht abgeschlossen.

Ein Ziel, das in Modellen zur Katastrophenbewältigung oder Wiederherstellung nur selten formuliert wird, ist die Minimierung des Risikos eines Auftretens zukünftiger unbefriedigter Nachfrage. Unsichere Nachfrageaufkommen werden allerdings verstärkt in Modellen zur Entscheidung über die Vorpositionierung von Hilfsgütern berücksichtigt (Barbarosoğlu und Arda, 2004; Balçık und Beamon, 2008, u.a.). In diesen Fragestellungen muss über die Allokation von Hilfsgütern und Liefermengen entschieden werden, bevor bekannt ist, wo wie viel Nachfrage auftritt. In der hier betrachteten Fragestellung ist die Situation ähnlich, auch wenn die Mengen der benötigten Hilfsgüter geringer sind und darüber hinaus ein Teil der Nachfrage bereits bekannt ist.

Es ist zu beachten, dass die Unsicherheit in den hier betrachteten *Overlapping Disasters* größer ist als sonst in der Wiederherstellungsphase üblich. Solche Situationen treten vermehrt in Staaten mit politischen Krisen auf. Wenn in diesen instabilen Umfeldern Epidemien, Dürren und Hungersnöte eintreten, sind die Regierungen oftmals nicht in der Lage, die Bevölkerung ausreichend zu versorgen (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2011). Aber auch in langfristigen Projekten zur Notfallhilfe, wie im Nachgang des Erdbebens in Haiti, kommt es immer wieder zu

Unterbrechungen (Human Rights Watch, 2013). Somit wird als dritte Zielsetzung die Minimierung des Risikos zukünftiger unbefriedigter Nachfrage formuliert.

4.2. Annahmen und Voraussetzungen für das Modell *mHumLog*

Das Modell von Herer u. a. (2006) beinhaltet wichtige Grundannahmen, die auch in dem hier entwickelten Modell *mHumLog* Gültigkeit haben. Allerdings sind zahlreiche weitere Randbedingungen zu berücksichtigen, die bei der Lösung der kommerziellen Fragestellung von Herer u. a. (2006) nicht relevant sind und zu Unterschieden in der Modellierung führen. Ein bedeutender Unterschied ist die Betrachtung mehrerer Perioden in einem Modell, da in der humanitären Logistik nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Lagerbestand jeweils zu Beginn einer neuen Periode wieder auf einen vorgegebenen Wert gebracht werden kann. Schließlich sind die Ressourcen in humanitären Fragestellungen knapp. Der Planungshorizont im Modell *mHumLog* ist begrenzt und bekannt. Er bestimmt sich aus der Zeit, die benötigt wird, um die bereits laufende Hilfsaktion wieder in ihren normalen Ablauf zurückzuführen. Über die Perioden hinweg kann es, im Gegensatz zu den Annahmen bei Herer u. a. (2006), aufgrund der unterschiedlichen Risikoeinschätzungen in den Regionen und der dynamisch eintreffenden Informationen, durchaus zu einer Erhöhung des Lagerbestands durch Transshipments zwischen den einzelnen Lagern kommen. Darüber hinaus muss die Nachfrage am Ende des Planungshorizontes nicht vollständig gedeckt sein und es kann auch zu einem Überangebot an anderen Regionallagern kommen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Kosten für nachbestellte Güter im Modell *mHumLog* explizit zu berücksichtigen. Im Modell von Herer u. a. (2006) ist die Menge an Gütern, die in das Netzwerk eingehen, durch den vorgeschriebenen Startbestand und den Verbrauch durch die Nachfrage an den verschiedenen Standorten bestimmt. Die Beschaffungs- und Transportkosten für diese Güter müssen im mathematischen Modell also nicht explizit berücksichtigt werden.

Das Modell *mHumLog* hat eine Distributionsstufe mehr als das Modell von Herer u. a. (2006). Zwischen dem Anbieter, der ein unlimitiertes Angebot hat und den Standorten, die die Nachfrage befriedigen, befindet sich noch ein zentrales Lager, welches zur Verteilung der Güter vor Ort dient. Zugleich kann in diesem Lager vorpositioniert werden, um Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Nachfrageentwicklungen ausgleichen zu können. Die Netzwerkstruktur des Transshipmentproblems ist in Abbildung 4.3 ex-

emparisch für zwei Regionallager i und j und das Zentrallager (gekennzeichnet mit CD) in drei Perioden dargestellt. Das globale Lager, das nur das Zentrallager beliefert, ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht abgebildet. Die möglichen Güterflüsse sind im Netzwerk erfasst: Aus dem Startbestand in den Regionallagern können die Güter entweder zur Bedarfsbefriedigung genutzt werden, sie können zu einem anderen Regionallager transportiert werden oder in den Endbestand der Periode im gleichen Lager eingehen. Güter im Zentrallager können entweder in diesem verbleiben oder zu einem regionalen Lager transportiert werden. Die Transportzeiten betragen zwei Perioden zwischen Zentrallager und Regionallagern und eine Periode zwischen zwei Regionallagern. Diese Daten können entsprechend der betrachteten Situation angepasst werden. Es wird von gleichartigen Transportfahrzeugen ausgegangen, die eine fixe Kapazität aufweisen. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass ausreichend Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Diese Annahme kann aufgrund der etablierten Hilfsaktion in der Wiederherstellungsphase getroffen werden. Der Knoten M_{it} bildet die Nachfrage an Regionallager i in Periode t ab, die entweder aus dem Bestand des Regionallagers i (S_{it}) befriedigt werden kann oder für die Periode t unbefriedigt bleibt (U_{it}).

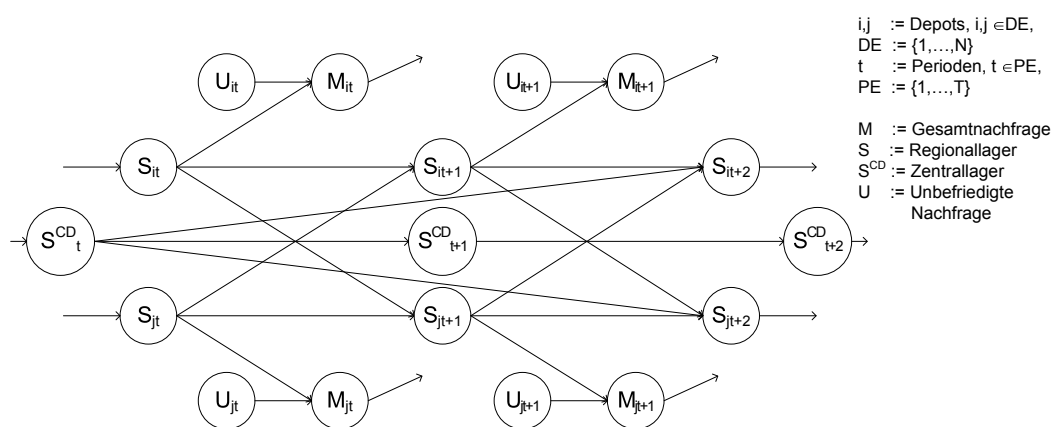


Abbildung 4.3.: Netzwerkstruktur des linearen Modells (Rottkemper u. a., 2011)

Um die Unsicherheiten, die in der humanitären Logistik vielfältig sind, abbilden zu können, wird das Modell rollierend, also einmal für jede Periode gelöst. Informationen bezüglich des Risikos für weitere Unterbrechungen, der Befahrbarkeit der Straßen oder der tatsächlichen Nachfragewerte können sich im Laufe des Planungshorizontes ändern und durch die rollierende Planung in der Lösung des Problems berücksichtigt werden (Scholl, 2001, S. 139). So kann gewährleistet werden, dass die aktuellen Informatio-

nen, die jeweils bekannt werden, für jede Periode berücksichtigt werden, wohingegen zukünftige Perioden mit Unsicherheiten behaftet sind, wie z.B. dem unsicheren Bedarf (für die Verwendung ähnlicher Konzepte in der humanitären Logistik, siehe Hua u. a. (2009); Özdamar u. a. (2004); Balçık u. a. (2008); Martel u. a. (2013)). In Abbildung 4.4 ist das Konzept der rollierenden Planung schematisch dargestellt. Die Ergebnisse der jeweils vorherigen Lösung gehen als Startparameter in den nächsten Lösungsprozess ein, bis der Planungshorizont endet. Die letzte Periode wird dabei nicht noch einmal optimiert, da hier keine Transporte oder Transshipments mehr möglich sind. Abschließend werden die Logistikkosten sowie die unbefriedigte Nachfrage aller Perioden addiert und bilden somit die Zielwerte der periodenübergreifenden Lösung.

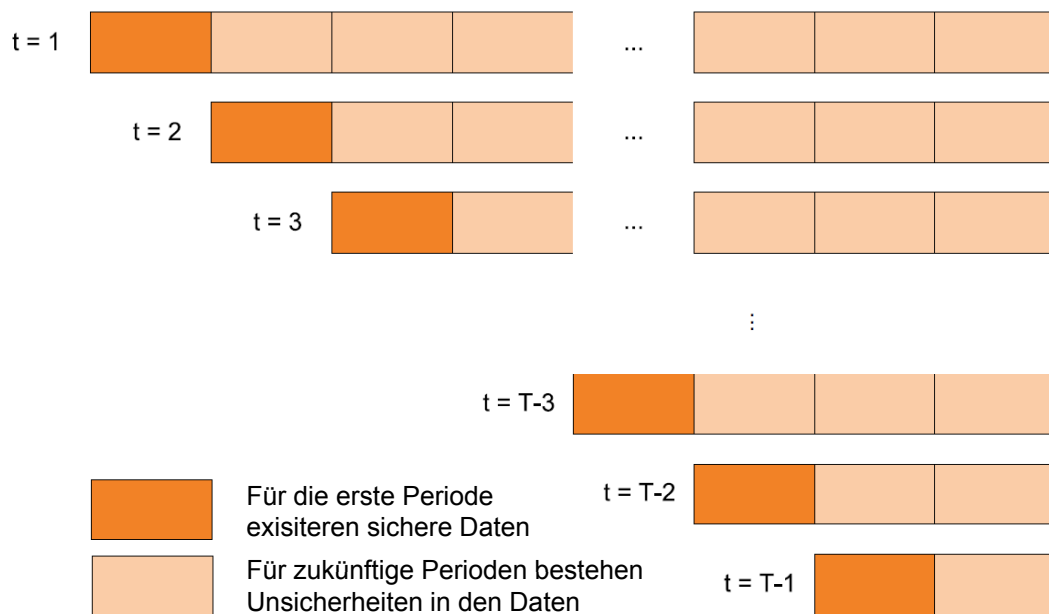


Abbildung 4.4.: Schema der rollierenden Planung

Durch das Berücksichtigen von Voraussagen über zukünftige Perioden wird das Risiko vermindert, dass die zu einem Zeitpunkt getroffenen Entscheidungen wieder rückgängig gemacht werden müssen, wenn neue Informationen eintreffen. Der Einsatz rollierender Planung ermöglicht zudem das Einbeziehen von Informationen, sobald sie verfügbar werden. Zugleich wird sichergestellt, dass die Freiheitsgrade für zukünftige Entscheidungen nicht eingeschränkt werden, da zu jedem Zeitpunkt nur die Entscheidungen fixiert werden, die zu diesem Zeitpunkt auch ausgeführt werden.

Das Konzept der rollierenden Horizonte wird in der Produktionsplanung verbreitet eingesetzt. Definiert wurden rollierende Horizonte von Baker (1977). Er führte die rollierende Planung ein, um unbegrenzte Planungshorizonte bewältigen zu können und um Unsicherheiten über zukünftige Zustände des Systems abzufedern. So können dynamisch neue Informationen und genauere Prognosen in die Planung integriert werden und die Planung wird laufend angepasst (Baker, 1977). Dieses Konzept wird sowohl in Lagerhaltungs- und Produktionsplanungsproblemen (Baker und Peterson, 1979; Chand, 1983; Hua u. a., 2009) als auch in Losgrößenplanungen (Stadtler, 2000; van den Heuvel und Wagelmans, 2005; Tiacci und Saetta, 2012) genutzt. Allerdings werden in diesen Arbeiten infinite Gesamtplanungshorizonte angenommen, das heißt die Länge des Planungshorizontes ist in jedem Modell gleich und es wird kein Endpunkt der gesamten Planung angenommen. Da das Modell *mHumLog* zum Ausgleich einer Unterbrechung während einer laufenden Hilfsaktion entwickelt wurde, ist der Planungshorizont auf die Zeitspanne begrenzt, die notwendig ist, um diese Unterbrechung auszugleichen. Das Modell plant die Notfalldistribution, die durch die Unterbrechung der Hilfsaktion ausgelöst wird. Nach einer bestimmten Zeitspanne können reguläre Aufstockungen der Lager erfolgen, die die Situation in dem betroffenen Gebiet entschärfen und die Notfalldistribution kann beendet werden (Gatignon u. a., 2010).

Die Nachfrage wird zur Modellierung der betrachteten Fragestellung in zwei Teile unterteilt. Zum einen gibt es einen Teil der Nachfrage, der im Rahmen der laufenden Hilfsaktion auftritt. Diese Nachfrage ist also deterministisch (basierend auf Populationsdaten, Art des Hilfsprogramms und Umfang des Budgets) und wird als „sichere Nachfrage“ bezeichnet. Darüber hinaus wird ein Anteil der Nachfrage berücksichtigt, der nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftritt, der sogenannte „unsichere Bedarf“. Dieser ist für die jeweils aktuelle Periode gleich Null, da davon ausgegangen wird, dass die aktuelle Nachfragesituation bekannt ist. Für zukünftige Perioden bildet dieser Anteil die Unsicherheit ab, mit der die Hilfsorganisationen täglich umgehen müssen. Beide Arten von Nachfrage können befriedigt werden oder unbefriedigt bleiben. Unbefriedigte Nachfrage bleibt bestehen und wird in der darauffolgenden Periode bevorzugt befriedigt. Der Umgang mit der Nachfrage ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Es wird immer zuerst der Teil der sicheren Nachfrage befriedigt, der bereits am längsten besteht. Dadurch wird sichergestellt, dass keine der Regionen bevorzugt behandelt wird. Die Befriedigung der unsicheren Nachfrage hat eine geringere Priorität als die

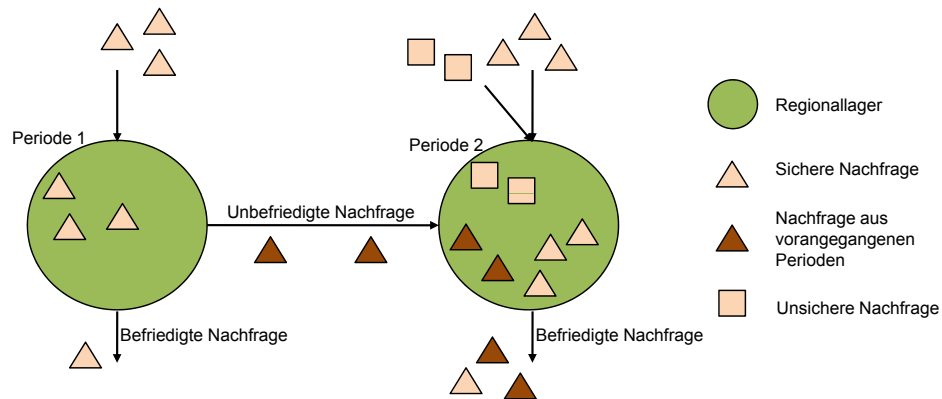


Abbildung 4.5.: Sichere und unsichere Nachfrage in der rollierenden Planung (Rottkemper u. a., 2012)

der sicheren Nachfrage und erfolgt demnach nur, wenn die sichere Nachfrage komplett befriedigt wurde. Die Planung mit der unsicheren Nachfrage in der Zukunft ist ein künstliches Konstrukt, das den Aufbau von Sicherheitsbeständen ermöglicht. Die rollierende Planung sorgt dafür, dass die Nachfrage in der aktuellen Periode auf ihren tatsächlichen Wert gesetzt wird. Die zur Befriedigung der unsicheren Nachfrage beschafften Hilfsgüter gehen als Sicherheitsbestand in die Lager ein. Tritt tatsächlich eine weitere Unterbrechung der Hilfsaktion ein, führt dies zu einer Erhöhung der sicheren Nachfrage in der aktuellen und den zukünftigen Perioden. Gleichzeitig wird der unsichere Bedarf für dieses Lager in allen zukünftigen Perioden angepasst: Werden Unterbrechungen betrachtet, die mehrfach auftreten können, kann die unsichere Nachfrage weiterhin positive Werte annehmen, sonst wird sie auf Null gesetzt.

4.3. Multikriterielles Transshipment-Modell *mHumLog*

Im Folgenden wird das mathematische Modell *mHumLog* vorgestellt und erläutert. Es handelt sich dabei um ein mehrperiodisches Netzwerkflussmodell, dessen Variablen den Fluss der Güter durch das zugrunde liegende Netzwerk darstellen. Eine Definition der Parameter und Indizes des Modells *mHumLog* ist in Tabelle 4.2 gegeben, die Variablen werden in den Tabellen 4.3 und 4.4 definiert. Der Planungshorizont beträgt T Perioden. Es wird davon ausgegangen, dass alle Variablen mit einem Periodenindex $t < 1$, die somit nicht mehr Teil des Planungshorizontes, aber dennoch im Modell enthalten sind, auf den Wert 0 gesetzt werden. Dasselbe gilt für Transportvariablen

Tabelle 4.2.: Parameter und Indizes des Modells $mHumLog$

Indizes	Definition
i, j	Index für die regionalen Lager, $i, j \in DE$, und $DE := \{1, \dots, N\}$.
k, t	Index für die Perioden, $t, k \in PE$, und $PE := \{1, \dots, T\}$.
Parameter	Definition
$bigM$	Eine hinreichend große Zahl.
c_{ij}	Transportkosten pro Einheit des betrachteten Hilfsgutes, die zwischen Depot i und Depot j transportiert wird.
c_{0i}	Transportkosten pro Einheit des betrachteten Hilfsgutes, die vom Zentrallager zu Depot i transportiert wird.
$cFix_{ij}$	Fixe Transportkosten pro Transport zwischen Depot i und Depot j .
$cFix_{0i}$	Fixe Transportkosten pro Transport vom Zentrallager zu Depot i .
d_{it}^1	Sicherer Bedarf in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes an Lager i in Periode t .
d_{it}^2	Unsicherer Bedarf in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes an Lager i in Periode t .
g_{ik-t}^1	Gewichtungsfaktor für unbefriedigten sicheren Bedarf, der in Periode t an Depot i aufgetreten ist und in Periode k noch unbefriedigt ist.
g_{ik-t}^2	Gewichtungsfaktor für unbefriedigten unsicheren Bedarf, der in Periode t an Depot i aufgetreten ist und in Periode k noch unbefriedigt ist.
h	Lagerhaltungskosten pro Einheit des betrachteten Hilfsgutes und Periode.
$maxRoad$	Maximale Transportkapazität in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes für den Straßentransport.
r	Transportkosten bei Nachbestellung pro Einheit des betrachteten Hilfsgutes.
$rFix$	Fixe Transportkosten, pro Nachbestellung.
s_{i1}	Startbestand in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes in Lager i .
s_{01}	Startbestand in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes im Zentrallager.

mit einem Index von $t > T$. Zudem gilt für Lagerhaltungsvariablen mit einem Index $t > T$, dass diese beliebige Werte annehmen können (sie repräsentieren damit den Endbestand in den entsprechenden Lagern).

Das Modell verfügt aufgrund der bereits eingeführten mehrfachen Zielsetzungen in der Problemstellung über mehrere Zielfunktionen. Mit der ersten Zielfunktion (4.7) wird die unbefriedigte sichere Nachfrage minimiert. Als „sicher“ wird sie bezeichnet,

Tabelle 4.3.: Variablen des Modells *mHumLog*

Variablen	Definition
$F_{S_t^{GD} S_{t+3}^{CD}}$	Fluss vom globalen zum Zentrallager, der das globale Lager in Periode t verlässt, in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{S_t^{CD} S_{t+2}}$	Fluss vom Zentrallager zu Depot i , der das Zentrallager in Periode t verlässt, in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{S_{it} S_{jt+1}}$	Fluss vom Depot i zum Depot j , der das Depot i in Periode t verlässt, in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{S_t^{CD} S_{t+1}^{CD}}$	Lagerbestand im Zentrallager am Ende von Periode t , in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{S_{it} S_{it+1}}$	Lagerbestand in Depot i am Ende von Periode t , in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{S_{it} M_{it}}$	Zur Nachfragebefriedigung verwendete Einheiten des betrachteten Hilfsgutes an Lager i in Periode t .
$F_{U_{it} M_{it}}$	Unbefriedigte Nachfrage (sichere und unsichere) an Depot i in Periode t in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{U_{it} M_{it}}^{Cert}$	Unbefriedigte sichere Nachfrage an Depot i in Periode t , in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes.
$F_{U_{it} M_{it}}^{CertPos}$	$\max(0, F_{U_{it} M_{it}}^{Cert})$.
UD_{itk}	Unbefriedigte sichere Nachfrage an Depot i in Periode k in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes, die in oder vor Periode t aufgetreten ist.
UD_{itk}^2	Unbefriedigte unsichere Nachfrage an Depot i in Periode k in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes, die in oder vor Periode t aufgetreten ist.
UD_{itk}^{Pos}	$\max(0, UD_{itk})$.
UD_{itk}^{2Pos}	$\max(0, UD_{itk}^2)$.
UD_{itk}^{Of}	Unbefriedigte sichere Nachfrage an Depot i in Periode k in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes, die in Periode t aufgetreten ist.
UD_{itk}^{2Of}	Unbefriedigte unsichere Nachfrage an Depot i in Periode k in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes, die in Periode t aufgetreten ist.

weil sie durch die laufende Hilfsaktion befriedigt werden soll und somit mit Sicherheit auftritt. Die Nachfrage aus verschiedenen Perioden wird unterschiedlich gewichtet, um sicherzustellen, dass der Teil der Nachfrage, der am längsten unbefriedigt ist, zuerst gedeckt wird. Die Gewichte (g_{ik-t}^1) werden also in Abhängigkeit davon festgelegt, wie lange die entsprechende Nachfrage bereits unbefriedigt ist. Diese Zeitspanne ist durch $k-t$ definiert. UD_{itk}^{Of} repräsentiert den Teil des sicheren Bedarfs, der in Periode t aufgetreten ist und bis Periode k noch nicht befriedigt wurde. Die Bestimmung dieser Werte

Tabelle 4.4.: Binäre und ganzzahlige Variablen des Modells *mHumLog*

Variablen	Definition
Y_{Fijt}	Anzahl an Fahrzeugen, die für den Transport zwischen Lager i und j in Periode t benötigt werden.
Y_{FCDit}	Anzahl an Fahrzeugen, die für den Transport zwischen dem Zentrallager und Lager i in Periode t benötigt werden.
Y_{FGDCDt}	Binäre Variable, die angibt, ob in Periode t eine Nachbestellung vorgenommen wird (Wert 1) oder nicht (Wert 0).
$Y_{FCertPos_{UitMit}}$	Binäre Variable, die angibt, ob Teile der sicheren Nachfrage in Periode t am Depot i noch unbefriedigt sind (Wert 0) oder nicht (Wert 1).
Y_{UDitk}^{Pos}	Binäre Variable, die angibt, ob Teile des sicheren Bedarfs an Lager i aus Periode t in Periode k noch unbefriedigt sind (Wert 0) oder nicht (Wert 1).
Y_{UDitk}^{2Pos}	Binäre Variable, die angibt, ob Teile des unsicheren Bedarfs an Lager i aus Periode t in Periode k noch unbefriedigt sind (Wert 0) oder nicht (Wert 1).
Y_{UDitk}	Binäre Variable, die angibt, ob der gesamte sichere Bedarf an Lager i aus Periode t in Periode k noch unbefriedigt ist (Wert 0) oder nicht (Wert 1).
Y_{2UDitk}	Binäre Variable, die angibt, ob der gesamte unsichere Bedarf an Lager i aus Periode t in Periode k noch unbefriedigt ist (Wert 0) oder nicht (Wert 1).

erfolgt mittels der Restriktionen (4.23) bis (4.36), welche unten detailliert dargestellt werden. Die konkreten Werte, die für g_{ik-t}^1 eingesetzt werden, müssen in Abhängigkeit von den anderen Zielsetzungen und deren Bewertungen gesetzt werden. Dies sollte so geschehen, dass die Relation zwischen den Gewichtungen zu Kompromisslösungen führt, die den Vorstellungen des Entscheidungsträgers entsprechen. Deswegen kann an dieser Stelle noch nicht viel über die konkrete Belegung der Gewichtungsfaktoren ausgesagt werden. Die entsprechenden Erläuterungen erfolgen im weiteren Verlauf der Arbeit.

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{k=t}^T g_{ik-t}^1 \cdot UD_{itk}^{Of} \quad (4.7)$$

Mithilfe der zweiten Zielfunktion (4.8) wird die unbefriedigte Nachfrage minimiert, die in zukünftigen Perioden auftreten kann, aber nicht muss. Auch diese unsichere Nachfrage wird stärker gewichtet, umso länger sie schon „unbefriedigt“ ist. Bei der Lösung eines Modells während der rollierenden Planung wird die unsichere Nachfrage zukünftig

tiger Perioden behandelt, als würde sie tatsächlich auftreten. Durch die rollierende Planung kann dabei sichergestellt werden, dass dieser Teil der Nachfrage in der aktuellen Periode jeweils auf Null gesetzt wird und somit nicht tatsächlich befriedigt wird. Tritt eine Unterbrechung der Hilfsaktion ein, wird die sichere Nachfrage entsprechend erhöht und kann anschließend befriedigt werden. Die Hilfsgüter, die zur Befriedigung der unsicheren Nachfrage beschafft wurden, werden als Sicherheitsbestand aufs Lager gelegt. Zudem kann die Gewichtung entsprechend dem Risiko für Zwischenfälle in den Regionen variieren. Unsichere Nachfrage in Nachbarregionen einer bereits von einer Epidemie betroffenen Region kann somit z.B. stärker gewichtet werden.

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{k=t}^T g_{ik-t}^2 \cdot UD_{itk}^{2Of} \quad (4.8)$$

Die dritte Zielfunktion (4.9) minimiert die operationalen Kosten. Sie besteht aus den Lagerhaltungskosten am Zentral- und an den Regionallagern und den Transportkosten. Es fallen unterschiedlich hohe Transportkosten für den Transport zwischen dem Zentrallager und den Regionallagern und für den Transport zwischen den Regionallagern an. Dabei basieren die Transportkosten auf der Entfernung zwischen den entsprechenden Lagern. Darüber hinaus fallen fixe Kosten pro Fahrzeug für Transporte und Transshipments an. Auch für die Nachbestellung per Luftfracht entstehen fixe Kosten pro Bestellung und variable Kosten, die von der transportierten Menge der Hilfsgüter abhängig sind.

$$\begin{aligned} \min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N (c_{ij} \cdot F_{S_{it}S_{jt+1}} + c_{Fix_{ij}} \cdot Y_{F_{ijt}}) \right. \right. \\ + c_{0i} \cdot F_{S_t^{CD}S_{it+2}} + c_{Fix_{0i}} \cdot Y_{F_{it}^{CD}} + h \cdot F_{S_{it}S_{it+1}} \\ \left. \left. + h \cdot F_{S_t^{CD}S_{t+1}^{CD}} + r_{Fix} \cdot Y_{F_t^{GD}CD} + r \cdot F_{S_t^{GD}S_{t+3}^{CD}} \right) \right) \quad (4.9) \end{aligned}$$

Da die Modellformulierung auf einer Netzwerkstruktur basiert, besteht das mathematische Modell hauptsächlich aus Flussbedingungen. Im Folgenden werden die Restriktionen dargestellt und im Einzelnen erläutert.

$$F_{S_{it-1}S_{it}} + F_{S_{t-2}^{CD}S_{it}} + \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{S_{jt-1}S_{it}} = \quad (4.10)$$

$$F_{S_{it}M_{it}} + \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{S_{it}S_{jt+1}} + F_{S_{it}S_{it+1}} \quad \forall i \in DE, t = 2, \dots, T$$

$$F_{S_{t-1}^{CD}S_t^{CD}} + F_{S_{t-3}^{GD}S_t^{CD}} = F_{S_t^{CD}S_{t+1}^{CD}} + \sum_{i=1}^N F_{S_t^{CD}S_{it+2}} \quad t = 2, \dots, T \quad (4.11)$$

Die Restriktionen (4.10) und (4.11) stellen die Lagerflussbedingungen der Regionallager in den Perioden $t \geq 2$ dar. Die verschiedenen Möglichkeiten des Bestandszuflusses und des Bestandabganges werden modelliert. Der Startbestand am Regionallager i (S_{it}) ist entweder Restbestand aus der vorherigen Periode oder es handelt sich um Lieferungen aus dem Zentrallager oder von anderen Regionallagern $j \neq i$ (linke Seite von (4.10)). Die rechte Seite gibt an, dass der Bestand am Regionallager i zur Befriedigung von Nachfrage genutzt werden kann, er kann zu einem anderen Regionallager $j \neq i$ transportiert werden oder im Lager verbleiben.

Das Zentrallager erhält seinen Bestand aus dem globalen Lager, indem Nachbestellungen geordert werden, oder er stammt aus der Vorperiode (linke Seiten der Restriktionen 4.11). Da am Zentrallager keine Nachfrage auftritt, kann der Lagerbestand (S_t^{CD}) entweder im Lager bleiben oder zu einem Regionallager transportiert werden (rechte Seiten). In der ersten Periode werden die linken Seiten der Restriktionen (4.10) und (4.11) durch die Startbestände der Depots s_{i1} und s_{01} ersetzt, was zu den Restriktionen (4.12) und (4.13) führt.

$$s_{i1} = F_{S_{i1}M_{i1}} + \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{S_{i1}S_{j2}} + F_{S_{i1}S_{i2}} \quad \forall i \in DE \quad (4.12)$$

$$s_{01} = \sum_{i=1}^N F_{S_1^{CD}S_{i3}} + F_{S_1^{CD}S_2^{CD}} \quad (4.13)$$

Die Restriktionsgruppe (4.14) definiert, dass der Bedarf an Lager i in Periode t entweder befriedigt wird oder unbefriedigt bleibt (rechte Seiten der Restriktionen). Darüber hinaus besteht der Bedarf aus einem Teil, der mit Sicherheit auftritt und einem Teil, der unter Unsicherheit auftritt (der unsicheren Nachfrage). Diese beiden Teile bilden,

zusammen mit dem unbefriedigten Bedarf aus der Vorperiode, den gesamten Bedarf der Periode t am Lager i (linke Seiten der Restriktionen).

$$d_{it}^1 + d_{it}^2 + F_{U_{it-1}M_{it-1}} = F_{S_{it}M_{it}} + F_{U_{it}M_{it}} \quad \forall i \in DE, \forall t \in PE \quad (4.14)$$

Restriktion (4.15) stellt eine Balance zwischen allen Eingängen und Ausgängen im Modell her. Der Startbestand und die Nachbestellungen müssen der Gesamtnachfrage und dem Endbestand an den Lagern entsprechen ($F_{S_{iT}S_{iT+1}}$ und $F_{S_T^{CD}S_{T+1}^{CD}}$), wobei die Nachfrage, die in der letzten Periode unbefriedigt bleibt ($F_{U_{iT}M_{iT}}$), abzuziehen ist.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N (F_{S_{iT}S_{iT+1}} + \sum_{t=1}^T (d_{it}^1 + d_{it}^2)) + F_{S_T^{CD}S_{T+1}^{CD}} = \\ \sum_{i=1}^N (s_{i1} + F_{U_{iT}M_{iT}}) + s_{01} + \sum_{t=1}^T F_{S_t^{GD}S_{t+3}^{CD}} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Die folgenden Restriktionen (4.16) und (4.17) bestimmen die Anzahl an benötigten Transportfahrzeugen für den Transport zwischen den Regionallagern sowie zwischen dem Zentrallager und den Regionallagern. Restriktion (4.18) setzt die Binärvariable $Y_{F_t^{GDCD}}$ auf 1, wenn in Periode t nachbestellt wird, sonst ist sie 0. Damit werden die entsprechenden Fixkosten in der Zielfunktion (4.9) berücksichtigt.

$$F_{S_{it}S_{jt+1}} \leq \maxRoad \cdot Y_{F_{ijt}} \quad \forall i, j \in DE, \forall t \in PE \quad (4.16)$$

$$F_{S_t^{CD}S_{t+2}} \leq \maxRoad \cdot Y_{F_t^{CD}} \quad \forall i \in DE, \forall t \in PE \quad (4.17)$$

$$F_{S_t^{GD}S_{t+3}^{CD}} \leq \text{big}M \cdot Y_{F_t^{GDCD}} \quad \forall t \in PE \quad (4.18)$$

Die nachfolgenden Restriktionen (4.19) bestimmen die unbefriedigte sichere Nachfrage an Depot i in Periode t . Diese wird bestimmt, indem vom gesamten sicheren Bedarf (d_{it}^1), zuzüglich dem unbefriedigten Bedarf aus der Vorperiode, der Teil, der in Periode t befriedigt wurde ($F_{S_{it}M_{it}}$), abgezogen wird. Da $F_{U_{it}M_{it}}^{Cert}$ negativ werden kann, wenn auch schon Teile des unsicheren Bedarfs befriedigt werden konnten, sprich $F_{S_{it}M_{it}}$ größer ist als d_{it}^1 und $F_{U_{it-1}M_{it-1}}^{CertPos}$, muss darauf aufbauend $F_{U_{it}M_{it}}^{CertPos}$ als $\max(0; F_{U_{it}M_{it}}^{Cert})$ definiert werden. Somit wird sichergestellt, dass $F_{U_{it}M_{it}}^{CertPos}$ entweder den Teil der sicheren Nachfrage darstellt, der in Periode t noch unbefriedigt ist, oder den Wert Null annimmt, wenn die sichere Nachfrage komplett befriedigt werden konnte. Diese Berechnung er-

folgt mittels der Restriktionen (4.20) bis (4.22) und den Nichtnegativitätsbedingungen für $F_{U_{it}M_{it}}^{CertPos}$.

$$F_{U_{it}M_{it}}^{Cert} = d_{it}^1 + F_{U_{it-1}M_{it-1}}^{CertPos} - F_{S_{it}M_{it}} \quad \forall i \in DE, \forall t \in PE \quad (4.19)$$

$$F_{U_{it}M_{it}}^{Cert} \leq F_{U_{it}M_{it}}^{CertPos} \quad \forall i \in DE, \forall t \in PE \quad (4.20)$$

$$F_{U_{it}M_{it}}^{CertPos} \leq bigM \cdot (1 - Y_{F_{U_{it}M_{it}}^{CertPos}}) \quad \forall i \in DE, \forall t \in PE \quad (4.21)$$

$$F_{U_{it}M_{it}}^{CertPos} - F_{U_{it}M_{it}}^{Cert} \leq bigM \cdot Y_{F_{U_{it}M_{it}}^{CertPos}} \quad \forall i \in DE, \forall t \in PE \quad (4.22)$$

Die Restriktionen (4.23) bis (4.40) sorgen dafür, dass die Gewichtungen der unbefriedigten Nachfrage richtig bestimmt werden können. Für jede Periode wird bestimmt, für welche Zeitspanne die Nachfrage bereits unbefriedigt ist. Die Variablen UD_{itk}^{Of} gehen dann in die Zielfunktion ein und werden dort mit den entsprechenden Gewichtungsfaktoren versehen. Dafür muss für jede Periode bestimmt werden, wie groß die Menge der unbefriedigten sicheren und unsicheren Nachfrage ist und darüber hinaus, aus welcher Periode welcher Teil der Nachfrage stammt.

$$UD_{itk} = F_{U_{ik}M_{ik}}^{CertPos} - \sum_{v=t+1}^k d_{iv}^1 \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k > t \quad (4.23)$$

$$UD_{itk}^2 = F_{U_{ik}M_{ik}} - F_{U_{ik}M_{ik}}^{CertPos} - \sum_{v=t+1}^k d_{iv}^2 \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k > t \quad (4.24)$$

Die Restriktionsgruppen (4.23) und (4.24) bestimmen UD_{itk} und UD_{itk}^2 für den Fall, dass k größer t ist. In diesen Variablen wird die Menge an unbefriedigter Nachfrage festgehalten, die in oder vor Periode t aufgetreten und in Periode k noch unbefriedigt ist. Dafür muss der unbefriedigte Bedarf in Periode k um die Menge verringert werden, die zwischen Periode t und k aufgetreten ist (eine schematische Darstellung der Zusammenhänge ist in Abbildung 4.6 gegeben). Wie oben dargestellt, wird angenommen, dass der Teil der Nachfrage, der am längsten unbefriedigt ist, als erstes befriedigt wird. Diese Annahme wird zur Bestimmung der unbefriedigten Nachfrage und der Zeitspanne, für die sie schon unbefriedigt ist, in den Restriktionen genutzt. Das Ergebnis kann dabei 0 sein (wenn keine Nachfrage aus Periode t mehr unbefriedigt ist) oder sogar negativ (wenn auch schon Bedarf aus den Perioden zwischen t und k

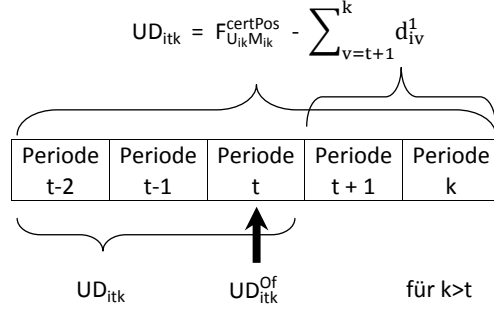


Abbildung 4.6.: Die Bestimmung der Variablen UD_{itk} für den Fall, dass $k > t$

befriedigt wurde). Deswegen wird $UD_{itk}^{Pos} = \max(0; UD_{itk})$ definiert und mithilfe der Restriktionen 4.25 bis 4.27 bestimmt.

$$UD_{itk} \leq UD_{itk}^{Pos} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k > t \quad (4.25)$$

$$UD_{itk}^{Pos} \leq bigM \cdot (1 - Y_{UD_{itk}^{Pos}}) \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k > t \quad (4.26)$$

$$UD_{itk}^{Pos} - UD_{itk} \leq bigM \cdot Y_{UD_{itk}^{Pos}} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k > t \quad (4.27)$$

Ebenso wird $UD_{itk}^{2Pos} = \max(0; UD_{itk}^2)$ definiert und mittels der Restriktionen 4.28 bis 4.30 bestimmt.

$$UD_{itk}^2 \leq UD_{itk}^{2Pos} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k > t \quad (4.28)$$

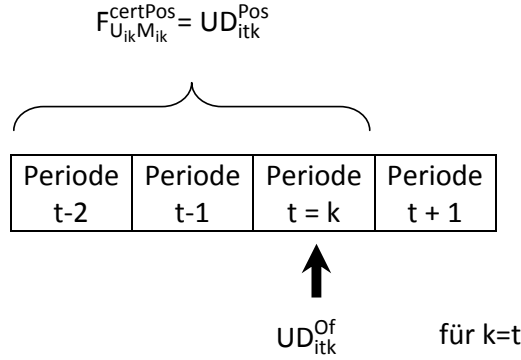
$$UD_{itk}^{2Pos} \leq bigM \cdot (1 - Y_{UD_{itk}^{2Pos}}) \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k > t \quad (4.29)$$

$$UD_{itk}^{2Pos} - UD_{itk}^2 \leq bigM \cdot Y_{UD_{itk}^{2Pos}} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k > t \quad (4.30)$$

Restriktionen (4.31) und (4.32) definieren die unbefriedigte Nachfrage aus der Periode k oder davor, für den Fall, dass t gleich k ist. Da $F_{U_{ik}M_{ik}}^{CertPos}$ und $F_{U_{ik}M_{ik}}$ per Definition nichtnegativ sind und $F_{U_{ik}M_{ik}} \geq F_{U_{ik}M_{ik}}^{CertPos}$ gilt, sind die Werte, die in (4.31) und (4.32) bestimmt werden, ebenfalls nichtnegativ. Eine grafische Darstellung der Bestimmung von UD_{itk}^{Pos} ist in Abbildung 4.7 gegeben. Insofern können UD_{itk}^{Pos} und UD_{itk}^{2Pos} direkt wie folgt bestimmt werden:

$$UD_{itk}^{Pos} = F_{U_{ik}M_{ik}}^{CertPos} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, t = k \quad (4.31)$$

$$UD_{itk}^{2Pos} = F_{U_{ik}M_{ik}} - F_{U_{ik}M_{ik}}^{CertPos} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, t = k \quad (4.32)$$


 Abbildung 4.7.: Die Bestimmung der Variablen UD_{itk}^{Of} für den Fall, dass $k = t$

Die Nebenbedingungen (4.33) bis (4.36) setzen den Wert von UD_{itk}^{Of} auf das Minimum von UD_{itk}^{Pos} und d_{it}^1 . Dadurch wird der Wert von UD_{itk}^{Pos} um den Teil an unbefriedigter Nachfrage verkleinert, der vor Periode t aufgetreten ist. Damit enthält die Variable UD_{itk}^{Of} genau die Menge an unbefriedigter Nachfrage, die in Periode t aufgetreten ist und in Periode k immer noch unbefriedigt ist. Für Perioden t , aus denen schon Nachfrage befriedigt werden konnte, nimmt die Variable UD_{itk}^{Of} den Wert von UD_{itk}^{Pos} an und für die Perioden, aus denen noch keine Nachfrage befriedigt wurde, den Wert d_{it}^1 . Dies ist genau die Menge, die mit dem Gewichtungsfaktor g_{ik-t}^1 bewertet werden soll, daher gehen diese Variablen in die Zielfunktion ein (vgl. Zielfunktion 4.7).

$$UD_{itk}^{Of} \leq UD_{itk}^{Pos} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k \geq t \quad (4.33)$$

$$UD_{itk}^{Of} \leq d_{it}^1 \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k \geq t \quad (4.34)$$

$$UD_{itk}^{Pos} - UD_{itk}^{Of} \leq bigM \cdot (1 - Y_{UD_{itk}}) \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k \geq t \quad (4.35)$$

$$d_{it}^1 - UD_{itk}^{Of} \leq bigM \cdot Y_{UD_{itk}} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k \geq t \quad (4.36)$$

Diese Restriktionen werden ebenso für die unsichere Nachfrage formuliert (Restriktionen 4.37 bis 4.40).

$$UD_{itk}^{2Of} \leq UD_{itk}^{2Pos} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k \geq t \quad (4.37)$$

$$UD_{itk}^{2Of} \leq d_{it}^2 \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k \geq t \quad (4.38)$$

$$UD_{itk}^{2Pos} - UD_{itk}^{2Of} \leq bigM \cdot (1 - Y_{2UD_{itk}}) \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k \geq t \quad (4.39)$$

$$d_{it}^2 - UD_{itk}^{2Of} \leq bigM \cdot Y_{2UD_{itk}} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE, k \geq t \quad (4.40)$$

Im Folgenden sind zudem die Nichtnegativitätsrestriktionen, Binär- und Ganzzahligkeitsbedingungen aufgeführt (Restriktionen 4.41 bis 4.44).

$$F_{S_{it}S_{it+1}}, F_{S_{it}S_{jt+1}}, F_{U_{it}M_{it}}, F_{S_t^{CD}S_{t+1}^{CD}}, F_{S_t^{CD}S_{it+2}}, \quad (4.41)$$

$$F_{S_{it}M_{it}}, F_{S_t^{GD}S_{t+3}^{CD}}, F_{U_{it}M_{it}}^{CertPos}, UD_{itk}^{Pos}, UD_{itk}^{2Pos},$$

$$UD_{itk}^{Of}, UD_{itk}^{2Of} \geq 0 \quad \forall i, j \in DE, \forall t, k \in PE$$

$$Y_{F_{ijt}}, Y_{F_{it}^{CD}} \in \mathbb{N} \quad \forall i, j \in DE, \forall t \in PE \quad (4.42)$$

$$F_{U_{it}M_{it}}^{Cert}, UD_{itk}, UD_{itk}^2 \in \mathbb{R} \quad \forall i \in DE, \forall t, k \in PE \quad (4.43)$$

$$Y_{F_t^{GD}CD}, Y_{UD_{itk}}, Y_{2UD_{itk}}, Y_{F_{U_{it}M_{it}}^{CertPos}}, Y_{UD_{itk}^{Pos}}, Y_{UD_{itk}^{2Pos}} \in (0, 1) \quad (4.44)$$

$$\forall i \in DE, \forall t, k \in PE$$

4.4. Methoden zur Lösung des multikriteriellen Modells *mHumLog*

Zur Lösung des oben vorgestellten Modells *mHumLog* eignet sich aufgrund der mehrfachen Zielsetzung und linearen Struktur des Problems die Methode der gewichteten Summe. Darüber hinaus zeichnet die Methode eine einfache Anwendbarkeit und eine geringe Laufzeit zur Lösung der einzelnen Modelle aus (Cohon, 1978, S. 100ff). Aus diesem Grund wird die Methode der gewichteten Summe für das Modell *mHumLog* implementiert. Wie in Abschnitt 3.5 bereits erläutert, können mit der Methode der gewichteten Summe nur unterstützte Pareto-optimale Lösungen ermittelt werden. Das sind Lösungen, die auf der Front des Zielraums liegen.

Da die Verteilung der Lösungen, die mittels der gewichteten Summe bestimmt werden, auf der effizienten Front nicht beeinflussbar ist, wird das Modell *mHumLog* zusätzlich mit der *Constraint* Methode gelöst. Diese Methode kann auch nicht unterstützte Pareto-optimale Lösungen ermitteln. Der Einsatz dieser Methode ist möglich, da eine klare Priorisierung der Ziele vorliegt. Es soll in erster Linie die unbefriedigte Nachfrage minimiert werden und erst danach die operationalen Kosten. Zwar wird zur Lösung der Problemstellung nur jeweils eine der effizienten Lösungen benötigt, um mit dieser die rollierende Planung fortzuführen. Zur Beurteilung der Lösungen und zur Abschätzung des Lösungsraums werden jedoch vorerst weit verteilte Lösungen erzeugt. Beide Methoden ermöglichen die Anwendung von Standardsoftware zur Lösung der Opti-

mierungsmodelle. Eine Erläuterung der verwendeten Systeme und Programme erfolgt in Abschnitt 7.1. Im Folgenden werden die beiden Methoden zur Lösung des Modells *mHumLog* detaillierter vorgestellt.

4.4.1. Methode der gewichteten Summe

Im Modell *mHumLog* ist mit den operationalen Kosten bereits eine Bewertung gegeben. Zur Anwendung des Ansatzes der gewichteten Summe wird die unbefriedigte Nachfrage im Verhältnis zu den Kosten gewichtet. Dies geschieht im Modell *mHumLog* mittels Strafkosten. In Tabelle 4.5 ist die Definition der verschiedenen Strafkostensätze gegeben. Dabei wird zwischen dem Teil der Nachfrage unterschieden, der im Rahmen der laufenden Hilfsaktion auftritt (die sichere Nachfrage, gekennzeichnet mit der hochgestellten 1) und dem Teil, der darüber hinaus in zukünftigen Perioden auftreten kann (die unsichere Nachfrage, gekennzeichnet mit der hochgestellten 2). Daraus entsteht die aggregierte Zielfunktion (4.45). Die Restriktionen bleiben, wie in Abschnitt 4.3 vorgestellt, erhalten.

Die Bestimmung der Strafkosten zur Gewichtung der unbefriedigten Nachfrage, die mit Sicherheit auftritt, ist unproblematisch: Wie von verschiedenen Autoren empfohlen, werden sie auf einen ausreichend hohen Wert gesetzt, um die Priorität klar auf die Befriedigung der Nachfrage zu legen (Barbarosoğlu und Arda, 2004; Rawls und Turnquist, 2010).

Tabelle 4.5.: Strafkostenparameter für die Methode der gewichteten Summe

Parameter	Definition
p_{i0}^1	Strafkosten für sicheren Bedarf, der seit dieser Periode unbefriedigt ist, an Lager i (in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes).
p_{i0}^2	Strafkosten für unsicheren Bedarf, der seit dieser Periode unbefriedigt ist, an Lager i (in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes).
p_{ik-t}^1	Strafkosten für unbefriedigten sicheren Bedarf, der in Periode t an Depot i aufgetreten ist und in Periode k noch unbefriedigt ist (in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes).
p_{ik-t}^2	Strafkosten für unbefriedigten unsicheren Bedarf, der in Periode t an Depot i aufgetreten ist und in Periode k noch unbefriedigt ist (in Einheiten des betrachteten Hilfsgutes).

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N (c_{ij} \cdot F_{S_{it}S_{jt+1}} + cF_{ix_{ij}} \cdot Y_{F_{ijt}}) \right. \right. \\
 & + c_{0i} \cdot F_{S_t^{CD}S_{it+2}} + cF_{ix_{0i}} \cdot Y_{F_{it}^{CD}}) + r \cdot F_{S_t^{GD}S_{t+3}^{CD}} \\
 & + rF_{ix} \cdot Y_{F_t^{GD}CD} + h \cdot F_{S_t^{CD}S_{t+1}^{CD}} + \sum_{i=1}^N (h \cdot F_{S_{it}S_{it+1}} \\
 & \left. \left. + \sum_{k=t}^T (p_{ik-t}^1 \cdot UD_{itk}^{Of} + p_{ik-t}^2 \cdot UD_{itk}^{2Of})) \right) \right) \tag{4.45}
 \end{aligned}$$

Die Bestimmung der Strafkosten für die unbefriedigte unsichere Nachfrage hingegen ist schwieriger. Da dieser Teil der Nachfrage nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftritt, würden sehr hohe Strafkosten zu massiven Überbeständen in den Lagern führen, die für eine Hilfsorganisation in diesem Stadium des Hilfseinsatzes nicht finanzierbar sind. Aus diesem Grund werden die Gewichte dieser Zielfunktionskomponenten über eine parametrische Variation bestimmt. Das Modell wird also mit fixen Gewichten für die operationalen Kosten und die unbefriedigte sichere Nachfrage und mit unterschiedlichen Strafkosten für die unbefriedigte unsichere Nachfrage wiederholt gelöst, um einen guten Kompromiss zwischen Risikominimierung und Kostenminimierung zu finden. Um interessante Bereiche der effizienten Front zu identifizieren, werden zunächst größere Abstände zwischen den einzelnen Strafkostensätzen gewählt und anschließend werden die ermittelten vielversprechenden Regionen genauer untersucht.

Das Modell wird rollierend für jede Periode erneut gelöst und es werden immer nur die Ergebnisse für die jeweils erste Periode umgesetzt. Dabei bleiben die Strafkosten während eines Lösungsdurchgangs auf einem Wert. Es wird also immer genau eine Kompromisslösung ermittelt und diese Lösung geht dann in die nächste Iteration der rollierenden Planung ein. Nachdem mit der Durchführung der Sensitivitätsanalyse ein Überblick über die Form der Pareto-Front ermöglicht und eine Auswahl guter Gewichtungsfaktoren getroffen wurde, wird zur Lösung der Szenarien anschließend nur noch eine Lösung, mit einer bestimmten Konstellation von Strafkosten, erzeugt. Die Lösung des Modells mit der Methode der gewichteten Summe erfordert dabei nur geringe Laufzeiten. Der Aufwand dieser Methode ist trotzdem relativ hoch, da wie bereits erwähnt, auch bei kleinen Änderungen der Daten eine Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung guter Gewichte für die unbefriedigte unsichere Nachfrage durchgeführt werden muss. Die konkreten Werte der Strafkosten und die Ergebnisse der Lösung des Modells werden in Abschnitt 7.2 dargestellt und diskutiert.

4.4.2. Operationale Kosten als Nebenbedingung

In humanitären Fragestellungen ist das Budget oftmals durch externe Gegebenheiten beschränkt. Die Spendengelder sind begrenzt und gerade in der Wiederherstellungsphase oftmals sehr knapp (van Wassenhove, 2006). Aus diesem Grund ist es naheliegend diese Beschränkung auch zu modellieren. Im Modell *mHumLog* ist eine direkte Erfassung der operationalen Kosten als zusätzliche Restriktion aufgrund der rollierenden Planung und der Berücksichtigung der unsicheren Nachfrage jedoch nicht möglich. Die unsichere Nachfrage wird in der Planung der zukünftigen Perioden berücksichtigt, obwohl sie in den meisten Fällen nicht auftritt. In dem mathematischen Modell wird sie aber trotzdem als möglichst zu befriedigende Nachfrage mit eingeplant. Da eine Deckung der unsicheren Nachfrage angestrebt wird, werden die Bestände im Regionallager und im Zentrallager, in dem Rahmen, den das Budget zulässt, aufgestockt. In den zukünftigen Perioden wird dann jeweils mit der tatsächlichen Ausprägung der Nachfrage geplant. Wenn die Ausprägung der Nachfrage geringer ist als durch die unsichere Nachfrage anfänglich modelliert, bleiben die Hilfsgüter, die zur Befriedigung dieser Nachfrage beschafft wurden, als Sicherheitsbestand in den Lagern. Dadurch werden Lagerhaltungskosten verursacht, die das Maximalbudget sprengen können und somit zur Unlösbarkeit der Probleme in späteren Perioden führen. In diesen Fällen wurde ein großer Teil des Budgets in frühen Perioden zur Beschaffung neuer Hilfsgüter genutzt, die im Anschluss nicht benötigt werden und so zu hohen Lagerhaltungskosten führen. Da anfangs davon ausgegangen wurde, dass zumindest ein Teil der unsicheren Nachfrage eintritt, konnte mit diesen Lagerhaltungskosten nicht gerechnet werden und die Modelle zur Planung späterer Perioden werden unlösbar. Im Fall von hohen Unsicherheiten und einer damit verbundenen großen Anzahl möglicher zukünftiger Zwischenfälle führt das in der Regel nicht zu Problemen, da hier die Hilfsgüter, die zur Deckung des unsicheren Bedarfs angeschafft wurden, benötigt werden. In anderen Fällen kommt es jedoch aufgrund zu hoher Sicherheitsbestände in den Lagern und der damit verbundenen Lagerhaltungskosten zur Unlösbarkeit der Modelle. Somit ist diese Methode bei Problemen unter Unsicherheit mit einem rollierenden Planungshorizont nicht direkt anwendbar.

Um die oben erwähnten Probleme zu umgehen, kommen unterschiedliche Ansätze in Frage. Zum einen können die Lagerhaltungskosten ignoriert und stattdessen eine Maximalkapazität der Lager modelliert werden. Im humanitären Kontext ist dies

eine weitere realistische Möglichkeit zur Berücksichtigung der Lagerhaltung vor Ort (Chang u. a., 2007). Allerdings wird dabei nicht mehr berücksichtigt, dass die langfristige Lagerung von Hilfsgütern Budget bindet und es sich oft um verderbliche Güter (zum Beispiel Medikamente) handelt. Darüber hinaus könnte auch diese Lagerkapazität überschritten werden, durch die Beschaffung von Hilfsgütern zur Befriedigung der unsicheren Nachfrage, die anschließend nicht benötigt werden. Somit kann es auch bei dieser Variante des Modells dazu kommen, dass Unzulässigkeiten auftreten. Zum Zeitpunkt der Nachbestellung ist noch nicht bekannt, wie viel des unsicheren Bedarfs tatsächlich eintritt. Deswegen werden, nach Möglichkeit, ausreichend Hilfsgüter nachbestellt, um diesen Bedarf zu decken. Kommt es bis zum Eintreffen der Güter nicht zu einer weiteren Unterbrechung der Hilfsaktion, müssen die nachbestellten Güter ins Lager gelegt werden. Sind die Lagerkapazitäten bereits ausgenutzt, kommt es zu Unzulässigkeiten.

Um die Unlösbarkeit des Problems zu vermeiden, könnte eine Abschätzung der zukünftigen Lagerhaltungskosten durchgeführt werden. Bei der Kalkulation des maximal verwendbaren Budgets müssen diese geschätzten Lagerhaltungskosten subtrahiert werden, um gültige Lösungen zu erhalten. Die Kalkulation zukünftiger Lagerhaltungskosten ist jedoch aufgrund der dynamischen Anpassung des Modells über den Planungshorizont aufwendig und kann nur als grobe Abschätzung dienen. Die Lagermenge besteht aus dem Startbestand im System und den Nachbestellungen abzüglich der sicheren Nachfrage, die befriedigt worden ist. Die Kalkulation bezieht lediglich die bereits mit Sicherheit bekannte Nachfrage ein, was dazu führt, dass die Schätzung der Lagerhaltungskosten in den ersten Perioden sehr hoch ausfällt. Treten tatsächlich keine weiteren Zwischenfälle ein, ist diese Kalkulation realistisch. Für alle anderen Fälle führt sie aber zu beliebig schlechten Ergebnissen, da die extrem hohe Kalkulation der Lagerhaltungskosten in Kombination mit dem festgelegten Budget dafür sorgt, dass kaum noch Handlungsspielräume bestehen, um Hilfsgüter nachzubestellen oder zu transportieren.

Da das Ziel bei der Anwendung des Modells *mHumLog* die Bestimmung eines realistischen Distributionsplans unter großer Unsicherheit ist, wird diese Lösungsmethode aufgrund der genannten Schwächen nicht umgesetzt. Stattdessen wird im folgenden Abschnitt eine Methode eingeführt, die das Budget für jeden Schritt der rollierenden Planung aufs neue festlegt. Hier werden die Parameter zur Problemlösung also dynamisch an die betrachtete Situation angepasst.

Tabelle 4.6.: Variablen und Parameter für die *Constraint* Methode

Variablen und Parameter	Definition
$gridPoint_{sol}$	Rechte Seite für die sekundäre Zielfunktion, die die Lösung sol erzeugt.
$kritWert$	Parameter, der angibt, ab welchem Quotienten der Lösungsprozess abgebrochen wird.
sol	Index für die Lösung mit einer bestimmten rechten Seite $gridPoint_{sol}$.

4.4.3. *Constraint* Methode

Zur Lösung des Modells mit der *Constraint* Methode ist es notwendig, eine primäre Zielsetzung und eine oder mehrere untergeordnete Zielsetzungen festlegen zu können. Letztere werden dann als Restriktionen im Modell formuliert und das Modell wird mit verschiedenen rechten Seiten für diese Restriktionen gelöst. Ausgehend von dem in Abschnitt 4.3 vorgestellten mathematischen Modell werden die operationalen Kosten in dieser Variante des Modells *mHumLog* als zweite, untergeordnete Zielsetzung definiert und somit als Restriktion mit variablen rechten Seiten formuliert. Im Unterschied zu der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Lösungsmethode, ist das Budget hier nicht von vornherein auf einen bestimmten Wert festgelegt, sondern wird für jeden Lösungsdurchlauf in der rollierenden Planung neu bestimmt.

Für die Formulierung des Modells sind zusätzliche Variablen und Parameter notwendig, die in Tabelle 4.6 definiert werden. Die sogenannten *Grid Points* stellen die unterschiedlichen rechten Seiten der Kostenrestriktion dar, für die das Modell gelöst wird. Diese werden in gleichmäßigen Abständen zwischen dem minimal und dem maximal möglichen Budget definiert. Die Extremwerte des Budgets und der Nachfrage werden dafür vorab in einer *Payoff*-Tabelle festgehalten (zur Erläuterung der *Payoff*-Tabelle siehe 3.4.1). Die meisten der erzeugten Lösungen sind zumindest schwach effizient. Das liegt daran, dass die Kosten zwischen den möglichen Extremwerten (minimal und maximal anfallende operationale Kosten) variiert werden und in diesem Bereich eine Änderung der Kosten in den meisten Fällen auch eine Änderung in der unbefriedigten Nachfrage nach sich zieht. Aufgrund der ganzzahligen Variablen kann es jedoch auch vorkommen, dass eine Erhöhung des Budgets keine weitere Befriedigung der Nachfrage ermöglicht. Besonders bei geringem Abstand zwischen den *Grid Points* kann dies

der Fall sein. Die Vollständigkeit der ermittelten effizienten Front hängt dabei von der Anzahl der *Grid Points* ab.

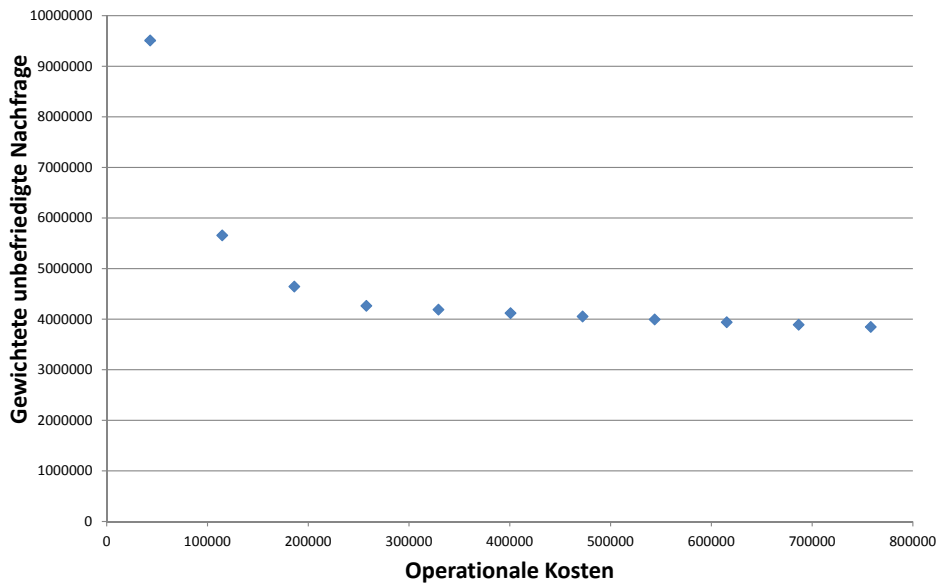
Die Restriktion, die die Kosten limitiert, ist für die Lösung *sol* in der Ungleichung (4.46) formuliert. Die linke Seite der Restriktion entspricht der Zielfunktion (4.9) und die rechte Seite ist durch den entsprechenden *Grid Point* definiert.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N (c_{ij} \cdot F_{S_{it}S_{jt+1}} + c_{Fix_{ij}} \cdot Y_{F_{ijt}}) + c_{0i} \cdot F_{S_t^{CD}S_{it+2}} \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + c_{Fix_{0i}} \cdot Y_{F_{it}^{CD}} + h \cdot F_{S_{it}S_{it+1}} \right) + h \cdot F_{S_t^{CD}S_{t+1}^{CD}} \right. \\
 & \quad \left. + r \cdot F_{S_t^{GD}S_{t+3}^{CD}} + r_{Fix} \cdot Y_{F_t^{GDCD}} \right) \leq \text{gridPoint}_{sol}
 \end{aligned} \tag{4.46}$$

Die Zielfunktionen (4.7) und (4.8) werden in einer gewichteten Summe zusammengefasst. Dadurch kann die Priorisierung der Nachfrage, die länger unbefriedigt ist, gewährleistet werden. Die entsprechende gewichtete Summe der Zielfunktionen ist in (4.47) gegeben. Die Gewichte werden, wie auch bei Lösung des Modells mit der Methode der gewichteten Summe, zugunsten der Befriedigung der sicheren Nachfrage festgelegt. Die Gewichte sind für diesen Teil der Nachfrage also deutlich höher, als für die unsichere Nachfrage. Die konkrete Gewichtung der unsicheren Nachfrage ist in diesem Fall nicht entscheidend, so lange sie deutlich niedriger ausfällt, als die Gewichtung für die sichere Nachfrage. Da die Kosten als Restriktion formuliert werden, würde ohnehin versucht, nachdem die sichere Nachfrage befriedigt wurde, so viel unsichere Nachfrage wie möglich zu befriedigen. Der Tradeoff zwischen der Befriedigung der unsicheren Nachfrage und der operationalen Kosten wird in dieser Methode über die Höhe der *Grid Points* definiert und nicht über das Verhältnis der Gewichte in der Zielfunktion.

$$\min \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T \left(\sum_{k=t}^T (g_{ik-t}^1 \cdot UD_{itk}^{Of} + g_{ik-t}^2 \cdot UD_{itk}^{2Of}) \right) \right) \tag{4.47}$$

Die unterschiedlichen *Grid Points* führen zu verschiedenen Kompromisslösungen zwischen Kosten und unbefriedigter Nachfrage auf der effizienten Front. Bei steigendem Budget wird der Teil der Nachfrage, der befriedigt werden kann, größer. Allerdings nimmt die Steigerung der Nachfrage, die befriedigt werden kann, mit steigendem Budget ab. Der Grenznutzen einer Geldeinheit wird also geringer, umso mehr Budget zur Verfügung steht. In Abbildung 4.8 ist dieser absteigende Grenznutzen grafisch darge-

Abbildung 4.8.: Darstellung der effizienten Front mit elf *Grid Points*

stellt. Die operationalen Kosten (also die rechten Seiten der Restriktionen 4.46) werden in gleichmäßigen Schritten erhöht und sorgen somit für die Erzeugung unterschiedlicher Lösungen. Die Werte der unbefriedigten Nachfrage sind als gewichtete Summe der sicheren und unsicheren Nachfrage angegeben, wie sie mittels der Zielfunktion 4.47 definiert wird.

Die Bestimmung möglichst vieler effizienter Lösungen ist zwar interessant, um eine Idee über die Form der effizienten Front zu erhalten, aber der Entscheidungsträger benötigt anschließend eine Handlungsempfehlung und somit muss eine der Lösungen ausgewählt werden. Oftmals wird diese Auswahl a posteriori vorgenommen, also nachdem eine Reihe von Lösungen auf der gesamten effizienten Front erzeugt wurde. Aufgrund des hohen Rechenaufwands und zur Vermeidung der Generierung zahlreicher Lösungen, die nicht weiter betrachtet werden, erfolgt die Auswahl der Lösung aus den möglichen effizienten Lösungen für das Modell *mHumLog* durch einen dynamischen Ansatz. Hierbei findet nach jeder erzeugten Lösung ein Vergleich der Ergebnisse statt. Der Lösungsprozess wird abgebrochen, sobald der Grenznutzen einer Geldeinheit unter einen bestimmten, vorher festgelegten Wert sinkt. Dieses Vorgehen nutzt das Prinzip der angemessenen Pareto Optimalität, welches in Abschnitt 3.3.2 eingeführt wurde. Somit ist es nicht notwendig, das Modell jedes Mal für alle erzeugten *Grid Points* zu lösen.

Die Regel zum Abbruch des Lösungsprozesses und zur Auswahl der Lösung wird mit der Ungleichung (4.48) definiert. Mit dieser Ungleichung wird der *Tradeoff* zwischen zwei Lösungen bestimmt und mit einem kritischen Wert verglichen, der vor dem Lösungsdurchlauf festgelegt werden muss (ähnlich der Auswahlregel für angemessen Pareto optimale Lösungen in Mattson u. a. (2004)). Sobald die daraus resultierende Bedingung erfüllt ist, wird der Lösungsprozess abgebrochen und die Ausgangslösung für den nächsten Lösungsdurchlauf der rollierenden Planung ist gefunden:

$$\frac{UnbefriedigteNachfrage_{sol} - UnbefriedigteNachfrage_{sol+1}}{Logistikkosten_{sol+1} - Logistikkosten_{sol}} \leq kritWert \quad (4.48)$$

Der Quotient, der in Ungleichung (4.48) definiert wird, wird für jeweils zwei aufeinanderfolgende Lösungen sol und $sol + 1$ bestimmt, beginnend bei der Lösung mit den minimalen Kosten. Die auszuwählende Lösung ist gefunden, sobald der Quotient den definierten kritischen Wert das erste Mal unterschreitet. Die letzte Lösung sol , die über diesem Wert liegt, wird dann als Ausgangslösung für den nächsten Lösungsdurchlauf gewählt. Eine Veranschaulichung des Lösungsprozesses ist in Abbildung 4.9 gegeben. Dieser Ansatz zur Lösungsauswahl führt zu einer detaillierten Untersuchung der Lösungen von besonderer Bedeutung, die laut Das (1999) im Knie der Pareto-Front liegen: Der Abstand zwischen den *Grid Points* kann zu diesem Zweck verringert werden, ohne die Laufzeit signifikant zu erhöhen, im Gegensatz zu Methoden, die zuerst Lösungen auf der gesamten Pareto-Front ermitteln. Der Mehraufwand durch den verringerten Abstand zwischen den *Grid Points* wird durch den vorzeitigen Abbruch des Lösungsprozesses ausgeglichen. Lösungen im weniger interessanten Bereich, in dem die unbefriedigte Nachfrage kaum noch verringert werden kann, werden nicht weiter betrachtet. Die Ergebnisse des Modells mit der *Constraint* Methode sind in Abschnitt 7.3 dargestellt.

Mit dem in diesem Kapitel vorgestellten Modell *mHumLog* kann die Distribution von Hilfsgütern in *Overlapping Disasters* optimiert werden. Dabei wird ein Kompromiss zwischen einer möglichst guten Versorgung der Bevölkerung und realistischen Kosten gesucht. Dieser Kompromiss führt zu der Formulierung als multikriterielles Modell. Das Modell *mHumLog* wird mit den beiden in diesem Kapitel vorgestellten Lösungsmethoden für verschiedene Szenarien gelöst. Die Methode der gewichteten Summe erzeugt ohne großen Rechenaufwand Lösungen für das multikriterielle Problem. Vorher muss

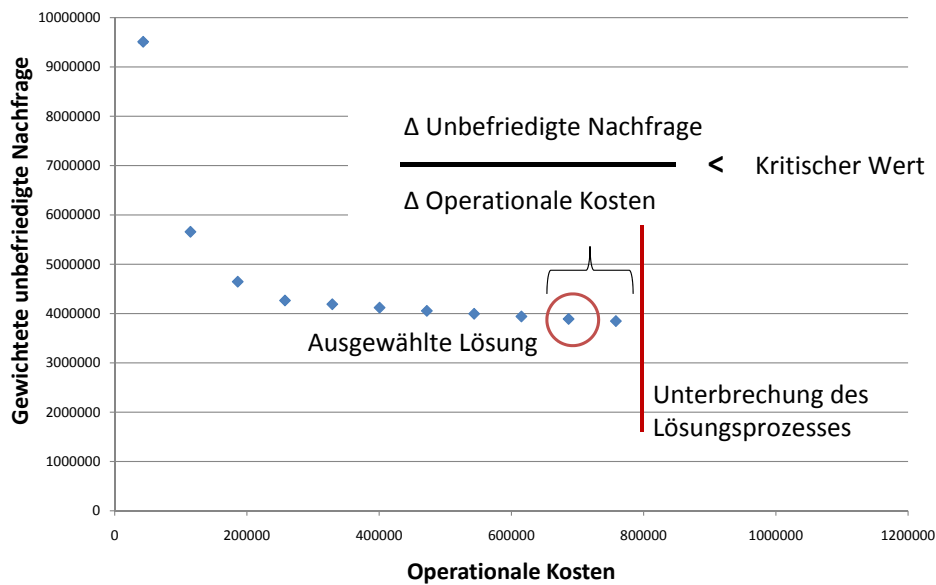


Abbildung 4.9.: Grafische Darstellung der Auswahl einer effizienten Lösung nach Rottkemper und Fischer (2013)

allerdings eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse stattfinden, um gute Gewichte für die Zielsetzungen zu ermitteln. Die *Constraint* Methode reagiert weniger sensitiv auf Veränderungen in den Daten, was bei der Anwendung in der humanitären Logistik Vorteile hat. Dafür benötigt sie eine deutlich höhere Laufzeit zur Lösung der einzelnen Modelle. Die Generierung der Szenarien, für die das Modell *mHumLog* gelöst wird, wird in Kapitel 6 erläutert, doch zunächst erfolgt in Kapitel 5 eine Einführung in die Szenariotechnik.

5. Szenariotechnik und robuste Optimierung

Ein Szenario ist ein komplexes Zukunftsbild, das Zusammenhänge zwischen verschiedenen Akteuren und Einflussfaktoren beinhaltet. Ein Szenario ist zudem nur ein mögliches Zukunftsbild. Es besteht also nicht der Anspruch, mit einem Szenario die Zukunft zu prognostizieren, sondern es soll vielmehr eine mögliche Zukunft skizziert werden:

„Ein Szenario ist eine allgemeinverständliche Beschreibung einer möglichen Situation in der Zukunft, die auf einem komplexen Netz von Einflussfaktoren beruht. Ein Szenario kann darüber hinaus die Darstellung einer Entwicklung enthalten, die aus der Gegenwart zu dieser Situation führt“ (Gausemeier u. a., 1996, S. 90).

Szenariotechnik wird oft mit Prognosen verglichen. Beide Verfahren versuchen Entwicklungsrichtungen in der Zukunft abzubilden. Dabei beschränken sich Prognoseverfahren auf eine, als am wahrscheinlichsten angesehene, Entwicklungsrichtung, wohingegen in der Szenariotechnik verschiedene Einflussfaktoren und Entwicklungsrichtungen berücksichtigt werden (van der Heijden, 1996, S. 101ff). Dadurch steigt die Komplexität: Es gibt nicht mehr eine Prognose, auf die es sich vorzubereiten gilt, sondern viele Eventualitäten, die betrachtet werden (Gausemeier u. a., 1996, S. 91-97). Im Gegensatz zu Prognoseverfahren, die rein quantitative Methoden nutzen und mit historischen Daten genau eine Vorhersage erzeugen, werden mittels der Szenariotechnik zahlreiche mögliche Entwicklungen offen gelegt (Garvin und Levesque, 2006; Scholl, 2001, S. 215-216). *„Somit liefert die Szenariotechnik einen Überblick über verschiedene wahrscheinliche Umweltlagen in der Zukunft und führt nicht, wie andere Verfahren, die für jeden Datenparameter nur einen erwarteten Wert liefern, zu einer (vermeintlichen) Beseitigung der Unsicherheit von Daten“* (Scholl, 2001, S. 216).

In den Anfängen wurde die Szenario-Analyse von einigen Autoren als ein Prognoseverfahren verstanden (Huss, 1988; Brauers und Weber, 1986). Andere Autoren, zum Beispiel Schnaars (1987) rücken davon jedoch bereits ab und stellen die Szenario-Analyse klar den Prognoseverfahren gegenüber. Bunn und Salo (1993) stellen wiederum fest, dass mit fortschreitender Entwicklung der Prognoseverfahren, die Unterscheidung zwischen einem rein quantitativen Szenario (also eines, das nur quantitative

Faktoren berücksichtigt) und einer Prognose immer schwieriger wird. Sie definieren ein Szenario darüber, wie es erstellt wird, und nicht darüber, was es am Ende ist (denn es ist im Endeffekt auch „nur“ eine mögliche Vorhersage der Zukunft). Auch van der Heijden (1996) differenziert Szenarien und Prognosen über ihre Erstellung: Während Szenarien von den Entscheidungsträgern selber und ohne den Einsatz komplexer Methoden generiert werden, zum Beispiel mithilfe von Mind-Mapping, werden Prognosen von Experten erstellt, die in die aktuelle Entscheidungsfindung oftmals nicht eingebunden sind. Das kann dazu führen, dass der Entscheidungsträger keine Übersicht über die Unsicherheiten in der vorliegenden Situation hat und seine Entscheidung basierend auf den kommunizierten Prognosen trifft, ohne sich der Unsicherheiten überhaupt bewusst zu sein (van der Heijden, 1996, S. 101ff). Darüber hinaus ermöglichen die Methoden zur Erstellung von Szenarien auch die Berücksichtigung von qualitativen Faktoren.

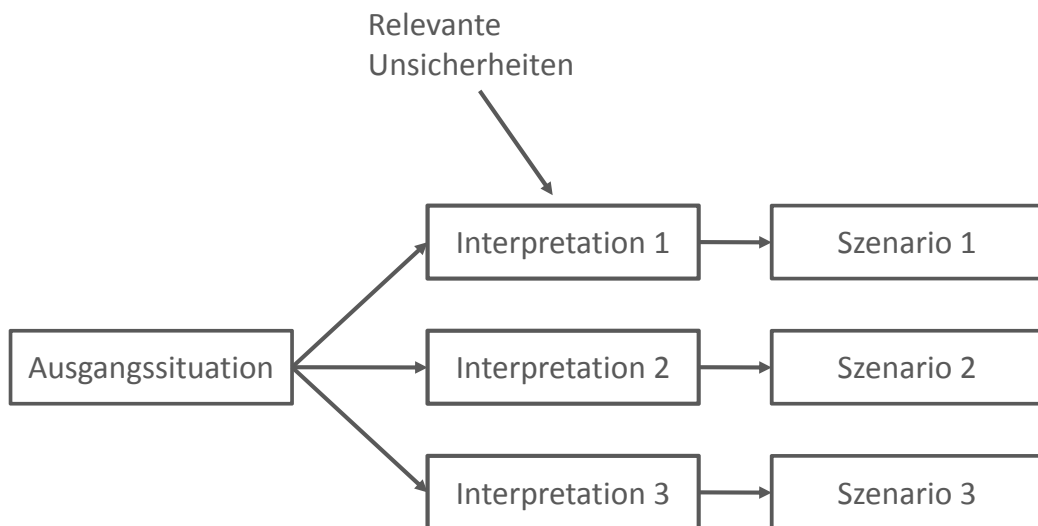


Abbildung 5.1.: Framework zur Generierung von Szenarien, nach van der Heijden (1996, S. 95)

Szenariotechnik wird vorwiegend zur strategischen Planung in unsicheren und komplexen Planungssituationen eingesetzt (Schoemaker, 1993). Hier werden systematisch zukünftige Entwicklungspfade erzeugt und untersucht (Bunn und Salo, 1993). Dazu werden mögliche Entwicklungen bestimmter Einflussfaktoren betrachtet, die die Problemdata beeinflussen oder es werden Ereignisse identifiziert, die Einfluss auf den zukünftigen Umweltzustand haben. Die veränderbaren Faktoren werden auch Variablen genannt. Die verschiedenen Ausprägungen der Problemdata werden dann so kombi-

niert, dass mögliche alternative Szenarien entstehen. Szenarien können also auch als Pfade eines Entscheidungsbaums definiert werden, in dem unterschiedliche Interpretationen der Ausgangssituation und der möglichen Entwicklungen der relevanten Faktoren in der Zukunft zu verschiedenen Zukunftsbildern führen (siehe Abbildung 5.1) (Bunn und Salo, 1993). Die Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien hängt dann von den Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Ausprägungen ab. Dabei müssen zudem Abhängigkeiten der Ausprägungen untereinander berücksichtigt werden (Scholl, 2001, S. 215-216). Szenario-Analyse wird daher besonders häufig von Managern in sehr unsicheren Geschäftszweigen angewandt (Linneman und Klein, 1979). Die Erstellung der Szenarien führt darüber hinaus zu einer intensiven Auseinandersetzung mit den aktuellen Umweltbedingungen, wodurch Erkenntnisse über das aktuelle Umfeld gewonnen werden können (Kouvelis und Yu, 1997, S. 14).

Historisch gibt es zwei Entwicklungen, die dazu beigetragen haben, dass Szenario-basiertes Denken in allen führenden Unternehmen Einzug erhalten hat. Zum einen ist dies die Erkenntnis, dass es nicht nur eine mögliche Zukunftsentwicklung gibt und dass viele Planer und Manager sich in der Prognose der Zukunft geirrt haben (Linneman und Klein, 1979). Zum anderen ist es die Tatsache, dass die Welt immer vernetzter wird und es somit nicht mehr möglich ist, ein Unternehmen alleine für sich zu betrachten. Immer wieder müssen Entscheidungsträger mit Unsicherheiten in der Zukunft umgehen und trotz dieser vertretbare Entscheidungen treffen. Handelt es sich um eine Bandbreite an Unsicherheiten und zahlreiche mögliche Ausprägungen, reichen Vorhersagen und Schätzungen basierend auf vergangenen Entwicklungen nicht mehr aus, um Entscheidungen zu treffen (van der Heijden, 1996, S. 100f). Zudem beschränkt die Konzentration auf historische Daten die Sichtweise auf in der Vergangenheit aufgetretene Ereignisse. Somit wird die Anzahl und die Gestaltung der Szenarien eingeschränkt (Reynolds, 2001). Vielmehr ist es notwendig, die möglichen Entwicklungen in der Zukunft zu kennen sowie *Best* und *Worst Cases* vor Augen zu haben, um auf diese vorbereitet zu sein. Auch wenn die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein konkretes Szenario tatsächlich eintritt, nahe null ist, lohnt es sich für den Entscheidungsträger, auf eine Bandbreite von Entwicklungsrichtungen vorbereitet zu sein (van der Heijden, 1996, S. 105f).

Die Vorbereitung auf eine Reihe von möglichen Entwicklungsrichtungen hat in der humanitären Logistik eine hohe Relevanz. In diesem Umfeld muss nicht nur in strategischen, sondern auch in taktischen und operationalen Fragestellungen mit großen

Unsicherheiten umgegangen werden. Das führt dazu, dass Szenariotechnik hier auch zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in kurzfristigen Planungsproblemen angewandt wird (zum Beispiel in Barbarosoğlu und Arda (2004) und in Falasca und Zobel (2011)). In der vorliegenden Problemstellung, der Unterbrechung einer laufenden Hilfsaktion, ist die Situation relativ klar eingegrenzt. Es können aber nichtsdestotrotz verschiedene Formen solcher Unterbrechungen auftreten und ihre Auswirkungen auf die zukünftige Entwicklung sollen deswegen bei der Reaktion auf den bereits eingetretenen Zwischenfall berücksichtigt werden. Die Szenariotechnik eignet sich gut, um die verschiedenartigen und oftmals nicht quantifizierbaren Unsicherheiten zu erfassen. Im Folgenden werden Grundlagen der Szenariotechnik allgemein vorgestellt, bevor speziell auf Anwendungen in der humanitären Logistik eingegangen wird.

5.1. Klassifizierung und Qualitätskriterien für Szenarien

Gausemeier u. a. (1996) definieren mehrere Szenario-Dimensionen, die als Orientierungshilfe bei der Anwendung von Szenarien dienen und die Klassifizierung der Szenarien erleichtern sollen. Damit wird die Auswahl geeigneter Methoden zur Szenario-Generierung ermöglicht. Die für diese Arbeit wichtigsten Szenario-Dimensionen werden im Folgenden kurz erläutert.

Bei der Erstellung von Szenarien werden die drei Dimensionen Zeit, Ausgangspunkt und Zielgerichtetheit beachtet (siehe auch Abbildung 5.2). Bezogen auf die zeitliche Dimension, können Szenarien situationsbezogen oder prozessbezogen sein. Unterschieden wird dabei, ob es darum geht, einen bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft zu untersuchen oder ob die Entwicklung zu diesem Zeitpunkt im Fokus der Betrachtung liegt. Prozessbezogene Szenarien können zum Beispiel generiert werden, um die möglichen Entwicklungen in einem Katastrophengebiet über die nächsten Monate zu untersuchen und dann eine Entscheidung bezüglich der Ausgestaltung eines Hilfsprojektes zu treffen, wohingegen situationsbezogen untersucht werden kann, ob zu einem bestimmten Zeitpunkt noch eine Lieferung an Hilfsgütern notwendig ist oder nicht. Szenarien werden außerdem aufgrund ihres Ausgangspunktes unterschieden. Bei explorativen Szenarien wird von einem bestimmten Startpunkt ausgegangen und es werden mehrere mögliche Entwicklungsalternativen betrachtet (Börjeson u. a., 2005). So kann untersucht werden, in welche Richtungen sich die Situation in einem Katastrophengebiet entwickeln kann. Bei einem antizipativen Szenario dagegen wird der Endpunkt vorher-

gesagt und es wird darauf aufbauend untersucht, welche Entwicklungszusammenhänge zu diesem Endpunkt führen können. Dieser Punkt kann zum Beispiel das Auftreten eines Hurrikans sein und es soll untersucht werden, welche Faktoren seinem Eintreten vorausgehen. Börjeson u. a. (2005) nennen diese Szenarien auch normative Szenarien. Die dritte Dimension der Szenario-Erstellung bezieht sich auf die Zielgerichtetheit.

Zeitliche Dimension	situationsbezogene Szenarien
	prozessbezogene Szenarien
Ausgangspunkt	explorative Szenarien
	antizipative Szenarien
Zielgerichtetheit	präskriptive Szenarien
	deskriptive Szenarien

Abbildung 5.2.: Die Dimensionen der Szenario-Erstellung nach Gausemeier u. a. (1996)

Bei präskriptiven Szenarien wird das Ziel in die Szenario-Erstellung mit einbezogen, so dass untersucht wird, mit welchen Mitteln das Ziel erreicht werden kann. Deskriptive Szenarien untersuchen nur die Wirkungen von verschiedenen Einflussfaktoren, ohne die Zielrichtung zu berücksichtigen (Gausemeier u. a., 1996, S. 107-112). In einer Hilfsaktion kann das Ziel zum Beispiel die wiederhergestellte Selbstständigkeit der betroffenen Bevölkerung sein und es ist zu klären, welche Mittel und Schritte zur Erreichung dieser notwendig sind. Oft sind die Mittel in humanitären Hilfsprojekten jedoch sehr begrenzt und es muss stattdessen gefragt werden, was mit den vorhandenen Ressourcen erreicht werden kann.

Comes (2011) definiert inhaltliche Qualitätskriterien für eine Menge von Szenarien. Sie sollen inhaltlich konsistent, kohärent, vollständig, belastbar (in Bezug auf die Unsicherheiten) und ausbalanciert sein, damit sie zum besseren Verständnis einer Situation dienen können (Comes, 2011, S. 109):

Konsistent ist eine Menge von Szenarien, wenn alle Namen und Bezeichner einheitlich über alle Szenarien verwendet werden, wenn alle Szenarien ausgehend vom

gleichen Hintergrund erzeugt werden, wenn alle Szenarien im Hinblick auf die gleichen Zielsetzungen generiert werden, wenn die Informationen, die zur Erstellung der Szenarien genutzt werden, mit dem Problemverständnis des Adressaten übereinstimmen und wenn alle Szenarien bezüglich einzelner Variablen die gleiche Quellen nutzen (Comes, 2011, S. 109f).

Kohärenz bedeutet, dass Szenarien von einer gemeinsamen Ausgangssituation ausgehend logisch aufgebaut sein sollten (Comes, 2011, S. 110).

Vollständigkeit definiert Comes (2011) in Bezug auf die vom Adressaten benötigten Informationen. Diese Eigenschaft ist also subjektiv und kann von Entscheidungsträger zu Entscheidungsträger variieren. Sind lenkbare Einflussgrößen vorhanden, muss für die verschiedenen Ausprägungen dieser je mindestens ein Szenario generiert werden, damit die Vollständigkeit erfüllt ist (Comes, 2011, S. 110f).

Reliabilität Die Reliabilität oder Belastbarkeit einer Menge an Szenarien wird immer im Hinblick auf die unsicheren Informationen beurteilt. Sie bezieht sich also in der Regel auf die Unsicherheit der Variablenausprägungen und stellt sicher, dass die erstellten Szenarien tatsächlich die möglichen Entwicklungen und deren Wahrscheinlichkeiten abbilden. Dabei bedeutet eine hohe Anzahl an Szenarien mit einer bestimmten Variablenausprägung nicht unbedingt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten dieser Ausprägung auch größer ist. Bei der Auswertung der Ergebnisse sollte deswegen darauf geachtet werden, dass keine falschen Annahmen bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeiten getroffen werden (Comes, 2011, S. 111f).

Balance Eine ausbalancierte Menge an Szenarien betrachtet eine ausreichende Spannbreite der möglichen Ausprägungen aller Variablen. Was dabei ausreichend ist, muss vorher festgelegt werden und ist somit subjektiv (Comes, 2011, S. 121f).

5.2. Phasen des Szenario-Managements

Im Szenariofeld wird nach Gausemeier u. a. (1996) zwischen Gestaltungsfeld und Umfeld unterschieden. Während das Gestaltungsfeld die Art der zu treffenden Entscheidung definiert, bestimmt das Umfeld den zu klärenden Sachbestand, also die möglichen Entwicklungen in der Zukunft. Das Umfeld kann also durch die Entwicklung der Situation in einem Gebiet, das von einem Erdbeben betroffenen ist, definiert werden und das Gestaltungsfeld beschreibt dann die Entscheidung über Hilfsgüterverteilungen in diesem Gebiet. Diese Trennung erleichtert dem Entscheidungsträger die Konzentration

on auf die, für die zu treffende Entscheidung, relevanten Faktoren (Gausemeier u. a., 1996, S. 98-102). Es werden nach Gausemeier u. a. (1996) fünf Phasen im Szenario-Management unterschieden. Eine Übersicht dieser Phasen und eine kurze Beschreibung der Aufgaben in den verschiedenen Phasen ist in Abbildung 5.3 gegeben.

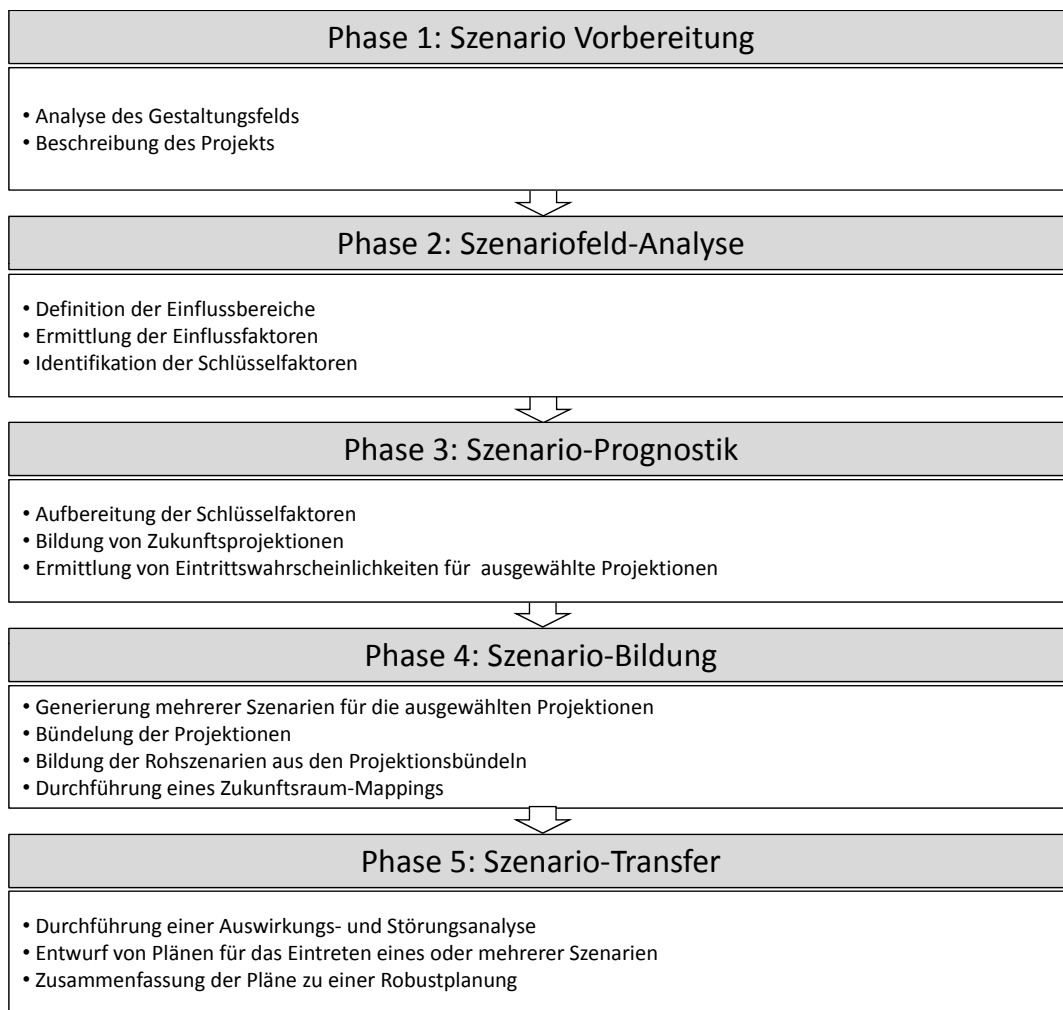


Abbildung 5.3.: Die fünf Phasen des Szenariomanagements nach Gausemeier u. a. (1996)

Im Folgenden wird auf jede der Phasen kurz eingegangen und die wichtigsten Schritte bei ihrer Durchführung werden erläutert.

Szenario-Vorbereitung

Im Zuge der Szenariogenerierung und -analyse müssen einige vorbereitende Schritte durchgeführt werden. Dazu gehören zum einen die Analyse des Ist-Zustandes des

Gestaltungsfeldes und zum anderen die Projektbeschreibung. Letztere definiert die Aufgaben des Projektes (die Zielsetzung, das zu lösende Problem) und die Form der eingesetzten Szenarien. Aufgaben eines Szenarioprojektes können zum Beispiel die Einführung eines neuen Produktes oder die Untersuchung von neuen Technologien und deren Potentialen sein. Außerdem wird zwischen Zielplanung (das Ziel ist noch zu bestimmen) und Mittelplanung (das Ziel steht fest und die Mittel zur Zielerreichung sollen bestimmt werden) unterschieden.

Im nächsten Schritt wird eine Gestaltungsfeld-Analyse durchgeführt. Dabei werden zuerst die Gestaltungsfeldkomponenten, aus denen sich das Gestaltungsfeld zusammensetzt, definiert und anschließend die wichtigsten Kriterien dieser Komponenten herausgestellt (Gausemeier u. a., 1996, S. 125-138). Die Komponenten, aus denen sich das Gestaltungsfeld bei der Planung einer Hilfsgüterverteilung nach einem Erdbeben zusammensetzt, können zum Beispiel die Beschaffung der Hilfsgüter, die Lagerung dieser, ihr Transport und ihre Verteilung sein.

Szenariofeld-Analyse

Bei der Szenariofeld-Analyse werden Einflussfaktoren ermittelt, die die zukünftige Entwicklung bestimmen. Um diese zu identifizieren, werden drei Schritte durchgeführt: Zuerst müssen die Einflussbereiche definiert werden, anschließend werden die Einflussfaktoren ermittelt und abschließend werden Schlüsselfaktoren identifiziert (Gausemeier u. a., 1996, S. 167).

Bei der Ermittlung der Einflussbereiche wird zwischen solchen unterschieden, die vom Entscheidungsträger beeinflusst werden können und solchen, auf die kein Einfluss genommen werden kann. Die Einflussbereiche werden durch die Ermittlung von Einflussfaktoren weiter konkretisiert. Am Ende soll eine Liste von Einflussfaktoren stehen, die das Szenariofeld detailliert beschreibt. Zur Bildung der Einflussfaktoren stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, angefangen bei sehr strukturierten Methoden bis hin zu Brainstorming oder Skizzen des Szenariofeldes. Sind die Einflussfaktoren lenkbar, handelt es sich um Gestaltungsfeldszenarien. Bei teilweise lenkbaren Einflussfaktoren handelt es sich um Systemszenarien (oder strategische Szenarien, (Börjeson u. a., 2005)) und bei nicht lenkbaren Einflussfaktoren werden Umfeldszenarien (oder externe Szenarien (Börjeson u. a., 2005)) generiert (Gausemeier u. a., 1996, S. 125-138).

Bei der Betrachtung der Ausbreitung einer Flut können das Wetter und der Zustand der Deiche zum Beispiel Einflussbereiche sein. In diesem Fall wäre ersterer Bereich nicht lenkbar, letzterer jedoch schon, denn die Deiche können mit Sandsäcken

unterstützt werden. Aus diesen Bereichen würden sich dann Einflussfaktoren ergeben, wie zum Beispiel in Bezug auf das Wetter die Niederschlagsmenge in den nächsten Wochen, die Zeitspanne, in der dieser Niederschlag entsteht, der Niederschlag in den vergangenen Wochen, aber auch vorhergesagte Windstärken, Temperaturen u.a. (Merz und Blöschl, 2003).

Die Einflussfaktoren werden anschließend auf ihre Vorhersagbarkeit überprüft. Faktoren, die sich in dem betrachteten Zeithorizont nicht verändern werden, dienen lediglich dazu die IST-Situation zu beschreiben, müssen aber in der Szenariogenerierung nicht berücksichtigt werden. In dem Flut-Beispiel wäre das zum Beispiel der Niederschlag in den vergangenen Wochen. Dieser beeinflusst den aktuellen Wasserspiegel und definiert damit die Ausgangssituation. Zur Generierung unterschiedlicher Szenarien werden nur die unsicheren Faktoren betrachtet (Garvin und Levesque, 2006). Abschließend wird die üblicherweise große Menge an Einflussfaktoren über strukturiertes Vorgehen verringert, bzw. die wichtigsten Faktoren werden identifiziert. Das Ziel ist es, die Anzahl an Schlüsselfaktoren so gering zu halten, dass die durch sie definierten Szenarien klare Entwicklungsrichtungen aufzeigen. Dazu wird zuerst eine Einflussanalyse durchgeführt, bei der Beziehungen der Faktoren untereinander und ihre Wechselwirkungen identifiziert werden. Außerdem müssen die Auswirkungen auf die Problemstellung klar skizziert werden, um ggf. sehr ähnliche Faktoren zusammenzufassen (Gausemeier u. a., 1996, S. 189ff). Anschließend werden Schlüsselfaktoren definiert, die besonders relevant für die Entscheidung in der betrachteten Problemstellung sind. Die Schlüsselfaktoren sollten dafür bei unterschiedlichen Ausprägungen auch unterschiedliche Entscheidungen forcieren. Linneman und Kennell (1977) empfehlen außerdem, nicht mehr als vier Schlüsselfaktoren zu betrachten, da sonst die Anzahl an Szenarien zu unübersichtlich wird. Auch Schnaars (1987) betont, dass Szenariotechniken sich besonders gut eignen, wenn die Anzahl an Schlüsselfaktoren gering ist, die Entwicklung dieser aber schwer prognostizierbar ist.

Szenario-Prognostik

Die Szenario-Prognostik besteht aus zwei Komponenten. Zuerst müssen die Schlüsselfaktoren aufbereitet und anschließend Zukunftsprojektionen gebildet werden (Gausemeier u. a., 1996, S. 221). Zukunftsprojektionen sind Kombinationen aus den Ausprägungen der Schlüsselfaktoren, die ausgehend von der aktuellen Situation mögliche Entwicklungsrichtungen aufzeigen.

Zur Aufbereitung der Schlüsselfaktoren werden zunächst Merkmale identifiziert, die die Entwicklung dieser Faktoren beschreiben. Pro Schlüsselfaktor sollten es nicht mehr als zwei Merkmale sein (Gausemeier u. a., 1996, S. 229). Im Zuge der Identifizierung und Beschreibung von Einflussfaktoren wurden bereits Merkmale ermittelt, welche nun auf ihre Relevanz geprüft und vom Entscheidungsträger ausgewählt werden. Merkmale zur Bestimmung des Niederschlags in den nächsten Wochen sind zum Beispiel meteorologische Daten, wie zum Beispiel Strömungen, die die Wetterentwicklung beeinflussen. Anschließend wird der Ist-Zustand festgehalten, um von diesem ausgehend und durch Analyse der Entwicklungsrichtungen der Schlüsselfaktoren, die Zukunftsprojektionen erstellen zu können (Gausemeier u. a., 1996, S. 228f). Dabei wird zwischen der Ausrichtung der zu entwickelnden Szenarien unterschieden. Es können Extremszenarien und Trendszenarien entwickelt werden. Erstere spiegeln extreme Entwicklungen wider und bilden somit das gesamte Spektrum der Möglichkeiten von Zukunftsentwicklungen ab. Letztere konzentrieren sich auf Szenarien mit großer Wahrscheinlichkeit (Gausemeier u. a., 1996, S. 113-115). Für die Zukunftsprojektionen werden dann Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt. Allerdings ist dieser Schritt meist nur bei der Arbeit mit Trendszenarien möglich. Bei Extremszenarien kann oft lediglich eine grobe Abschätzung der Wahrscheinlichkeiten gegeben werden (Gausemeier u. a., 1996, S. 241).

Viele Autoren sprechen sich explizit gegen die Belegung der Szenarien mit Eintrittswahrscheinlichkeiten aus, wie z.B. Schnaars (1987), Garvin und Levesque (2006) und Kouvelis und Yu (1997). Sie kritisieren, dass diese Wahrscheinlichkeiten oft nicht stimmen, da sie subjektiv ermittelt werden und dem Entscheider ein falsches Gefühl von Sicherheit geben. Darüber hinaus führe das Berücksichtigen von Eintrittswahrscheinlichkeiten dazu, dass die wahrscheinlicheren Szenarien sehr stark in den Vordergrund rücken. Handelt es sich hierbei um ein Standardszenario, welches den Fall skizziert, dass keine Probleme eintreten, wird damit der risikoaversen Einstellung vieler Entscheidungsträger nicht hinreichend Rechnung getragen (Kouvelis und Yu, 1997, S. 13). Andere Autoren, wie z.B. Scholl (2001), befürworten die Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten für verschiedene Szenarien wiederum, da sie helfen, sehr unwahrscheinliche Ereignisse nicht überzubewerten (Scholl, 2001, S. 207).

Abschließend muss der Zeithorizont des Szenarioprojektes erfasst werden. Dabei wird, wie in der Unternehmensplanung üblich, zwischen kurz-, mittel- und langfristigen Planungen unterschieden. Üblicherweise werden Szenarien für Zeithorizonte ab einem Jahr verwendet. Linneman und Kennell (1977) nennen sogar fünf Jahre als

minimalen Horizont für die szenariobasierte Planung und ordnen sie somit den strategischen Planungsmethoden zu. Wichtig bei der Definition des Zeithorizontes eines Szenarioprojektes ist die Beachtung der Reichweite der betrachteten Ziele und der zur Verfügung stehenden Maßnahmen. Soll ein Standort zur Vorpositionierung von Hilfsgütern weltweit ausgewählt werden, reicht es nicht, nur die mögliche Entwicklung im folgenden Jahr zu betrachten, wird eine Strategie zur Versorgung der von einem Hurrikan betroffenen Bevölkerung mit Notfallkits gesucht, dagegen schon. Darüber hinaus muss die Zeit, die zur Strategieumsetzung benötigt wird, bestimmt werden (Gausemeier u. a., 1996, S. 113-115).

Szenario-Bildung

Für jede der Zukunftsprojektionen werden nun mehrere Szenarien generiert, die ähnliche Entwicklungsrichtungen aufweisen. Zuerst werden die Projektionen gebündelt und auf Konsistenz und Wahrscheinlichkeit überprüft. Diese Bündel gruppieren die Projektionen zu einer handhabbaren Zahl und dienen als Basis zur Entwicklung der Rohszenarien (Gausemeier u. a., 1996, S. 251f).

Es können zum Beispiel bei der Untersuchung einer Flut Rohszenarien nach der Schwere der Überschwemmungen gebildet werden. Dabei werden alle Projektionsbündel, die eine milde Entwicklung des Wasserstandes voraussagen, zu einem Rohszenario zusammengefasst, die, die eine mittelschwere Entwicklung beinhalten und solche, die schwere Überschwemmungen prognostizieren. Der Schritt von den Rohszenarien zu den Szenarien erfolgt anschließend über die Bildung von Ausprägungen der unterschiedlichen Rohszenarien. Scholl (2001) definiert die Rohszenarien als Hauptszenarien und die konkreten Ausprägungen als Einzelszenarien (Scholl, 2001, S. 243). Wird mit Extremszenarien gearbeitet, sollte das wahrscheinlichere Auftreten eines Erwartungsszenarios berücksichtigt werden, damit nicht nur die Extrema vorbereitet sind, sondern auch der „Normalfall“ (Schnaars, 1987).

Es gibt zahlreiche Verfahren zur Generierung von Szenarien. Im Allgemeinen ist es wichtig, dass die Anzahl der Szenarien nicht zu groß wird, um die Zeit, die zur Lösung und Analyse der Szenarien aufgewendet wird, zu begrenzen und die Aussagekraft zu erhalten (Linneman und Kennell, 1977). Die empfohlenen Anzahlen an Szenarien gehen weit auseinander: Einige Autoren empfehlen, nur vier bis sechs Hauptszenarien zu generieren (z.B. Brauers und Weber (1986)), Scholl (2001) empfiehlt 20-50 Szenarien. Hier müssen vor allem die Konsistenz der Szenarien und die Laufzeiten beim Lösen beachtet werden (Scholl, 2001, S. 219-222). Wird die Eintrittswahrscheinlichkeit

für ein einzelnes Hauptszenario zu gering, kann kaum noch auf mögliche zukünftige Entwicklungen geschlossen werden (Scholl, 2001, S. 213-215). Alle Entwicklungen, die entweder sehr wahrscheinlich sind oder sehr starke Auswirkungen in Bezug auf das zu untersuchende Gestaltungsfeld haben, müssen aber abgedeckt sein. Dafür erfolgt vorerst eine möglichst umfangreiche Informationssammlung (Linneman und Kennell, 1977). Im Fall von risikoaversen Entscheidern ist dabei ein besonderes Augenmerk auf Entwicklungen zu legen, die negativ bewertet werden, um auf diese vorbereitet zu sein. Nicht zuletzt darf die Entwicklung der Szenarien nicht zu aufwendig sein, um praktikabel zu bleiben (Scholl, 2001, S. 213-215).

Die Verfahren zur Szenario-Generierung reichen von rein quantitativen bis hin zu qualitativen Verfahren und Mischformen beider Arten. Die qualitativen Verfahren gehen auf Kahn (1968) zurück. Auch der Begriff des Szenario-Schreibens, der deutlich die qualitativen Aspekte der Szenario-Generierung hervorhebt, wurde von Kahn geprägt. Damit soll das Risiko verhindert werden, nur leicht quantifizierbare Faktoren zu berücksichtigen (Kahn, 1968). Huss (1988) hat die qualitative Szenariogenerierung in seinem Artikel als intuitive Logik bezeichnet. Auch hier werden Schlüsselfaktoren und Umwelteinflüsse identifiziert sowie ihre Auswirkungen auf die Zukunft des Geschäftsfeldes untersucht und in Szenarien festgehalten. Daraufhin können Entscheidungen bewertet und Strategien auf ihre Robustheit untersucht werden. Im Kontrast dazu stehen analytische Szenarien, die mithilfe von formalisierten Methoden generiert werden (van Notten, 2006).

Eine der bekanntesten quantitativen Methoden zur Erstellung von Szenarien ist die *Cross-Impact* Analyse. Die Idee, auf der die *Cross-Impact* Analyse beruht, ist die, dass keine Ereignisse ohne Einfluss auf andere eintreten. Es wird also nach den Wechselwirkungen der Schlüsselfaktoren mit den jeweils anderen Faktoren gesucht (Schnaars, 1987). Die Methoden zur *Cross-Impact* Analyse sind dabei vielfältig¹. Schnaars (1987) empfiehlt, sich nicht zu sehr auf die Methoden an sich zu konzentrieren, sondern eher auf die Idee, dass Entwicklungen nicht unabhängig von anderen auftreten und stets nach Zusammenhängen gesucht werden sollte.

¹Eine Einführung in die *Cross-Impact* Analyse ist in Gordon und Hayward (1968) gegeben. Angewendet wird die Methode unter anderem in Nováky und Lóránt (1978).

Eine weitere quantitative Methode ist die *Trend-Impact Analyse*². Hierbei wird der generelle Trend ermittelt, der die Entwicklung des Schlüsselfaktors bestimmt. Zusätzlich können Abweichungen in Form von Ereignissen, die den Trend verfälschen, modelliert werden (Huss, 1988).

Das Battelle-Institut entwickelte ein Verfahren, das nach diesem benannt ist³. Dieses Verfahren nutzt keine Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien. Es wird lediglich festgestellt, ob ein Szenario konsistent ist, also auftreten kann, oder nicht. Dafür werden kritische Einflussfaktoren, für die mehrere Entwicklungsrichtungen ermittelt wurden, identifiziert. Die verschiedenen Ausprägungen dieser Faktoren werden zu Szenarien kombiniert. Anschließend wird überprüft, ob die ermittelten Kombinationen konsistent sind (Brauers und Weber, 1986).

Szenario-Transfer

In der letzten Stufe der Szenarioplanung werden die Aussagen der Szenarien für die Realität aufgezeigt. Dazu wird zu Beginn eine Auswirkungsanalyse durchgeführt, bei der Wirkungen der Szenarien auf das Gestaltungsfeld untersucht werden. Anhand derer werden anschließend Pläne entworfen, die bei Auftreten eines oder mehrerer Szenarien greifen sollen. Diese werden dann zu einer Robustplanung zusammengefasst (Gausemeier u. a., 1996, S. 321f). An dieser Stelle können auch Störereignisse einbezogen werden, die zufällig und somit unkalkulierbar auftreten. Die Störereignisse werden dann als gesamter Katalog betrachtet. Es wird dann also nicht zwischen den einzelnen Störereignissen differenziert, sondern nur zwischen dem Auftreten einer Störung und Szenarien, in denen keine Störungen auftreten (Gausemeier u. a., 1996, S. 323ff). In der Eventualplanung werden verschiedene Pläne und Strategien für das Eintreten unterschiedlicher Szenarien definiert. Hier wird den Störereignissen mit einem Krisenplan begegnet, der die Entscheider auf ein Krisenszenario vorbereitet (Gausemeier u. a., 1996, S. 321f).

Aus der Kombination der Eventualpläne oder auch aus der Kombination einzelner Maßnahmen werden anschließend Pläne erstellt, die für möglichst viele Szenarien gute Ergebnisse erzielen. Außerdem kann es nötig sein, für einzelne Szenarien Zusatzpläne zu generieren (Gausemeier u. a., 1996, S. 353). Bei der Erstellung der Pläne wird zwi-

²Eine ausführliche Erläuterung der *Trend-Impact Analyse* kann in Gordon (1994) nachgelesen werden.

³Das Battelle Verfahren wurde maßgeblich in Frankfurt entwickelt. Eine Einführung in die Methode ist in Technologie Management und Assessment (1986) gegeben.

schen risikofreudigen und risikoaversen Entscheidern unterschieden (Gausemeier u. a., 1996, S. 355). Somit wird sichergestellt, dass der Entscheidungsträger die Pläne auch als echte Alternativen ansieht. Einem risikoaversen Anleger braucht bei der Investmentplanung zum Beispiel keine Alternative angeboten zu werden, bei der sein Geld zum Großteil in sehr unsicheren Anlageformen investiert wird. Zur Entwicklung der Pläne werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Szenarien berücksichtigt, sofern diese vorhanden sind; so kann sichergestellt werden, dass nicht zu viel Aufwand betrieben wird, um ein sehr unwahrscheinliches Ereignis zu berücksichtigen (Gausemeier u. a., 1996, S. 339ff).

5.3. Modellierung von Unsicherheiten in Szenarien

Verschiedene Arten von Unsicherheiten werden in der Szenariogenerierung berücksichtigt. Diese können in systematische und unsystematische Unsicherheiten klassifiziert werden. Erstere hängen von bekannten Einflussfaktoren ab, der Einfluss dieser auf den Umweltzustand ist ebenso bekannt. Bei letzteren Unsicherheiten ist entweder der Einflussfaktor unbekannt oder die Wirkungsweise dieses Faktors auf den Umweltzustand ist nicht ermittelbar. Es bleibt also bei zufälligen Ausprägungen dieser Unsicherheit. In vielen Planungssituationen sind beide Arten von Unsicherheiten präsent. Faktoren, die einen großen Einfluss auf zukünftige Entwicklungen haben, sind oft bekannt, es bleibt aber trotzdem noch eine Restunsicherheit, die nicht zu spezifizieren ist (Scholl, 2001, S. 213-215).

Die Unsicherheiten werden aufgrund ihrer spezifischen Natur mit speziellen Methoden erfasst. Um systematische Unsicherheiten zu erfassen, kann Szenariotechnik angewandt werden. Hier werden Einflussfaktoren systematisch ermittelt und die Eintrittswahrscheinlichkeit sowie die Problemparameter geschätzt. Zudem wird geprüft, ob Korrelationen zwischen den Einflussfaktoren bestehen, die berücksichtigt werden müssen (Garvin und Levesque, 2006).

Unsystematische Unsicherheiten sind oft nur kleinere Schwankungen in einzelnen Parametern, die nicht gleich ein neues Szenario definieren, sondern eher ein Rauschen darstellen. Zur Bestimmung der Ausprägungen können z.B. Werte aus einem bestimmten Intervall gezogen werden oder gleichverteilt um einen Mittelwert herum. Wenn keine Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeiten gegeben sind, werden die Werte gleichverteilt für die Gesamtmenge der Szenarien generiert. Liegt eine Wahr-

scheinlichkeitsverteilung zugrunde, kann eine Monte-Carlo-Simulation genutzt werden, um mögliche Ausprägungen zu untersuchen (Scholl, 2001, S. 213-215).

Die systematischen Unsicherheiten lassen auf verschiedene Hauptszenarien schließen, während zu jedem Hauptszenario mittels der unsystematischen Unsicherheiten Einzelszenarien generiert werden (Brauers und Weber, 1986). Die Faktoren, die die systematischen Unsicherheiten modellieren, haben dabei für jedes der Einzelszenarien eines Hauptszenarios die gleiche Ausprägung, wohingegen die Faktoren zur Modellierung unsystematischer Unsicherheiten variiert werden.

5.4. Robuste Optimierung

Eine Möglichkeit Unsicherheiten in einem Optimierungsproblem zu berücksichtigen, ist die Lösung des mathematischen Modells für eine Reihe von Szenarien, die die möglichen Entwicklungsrichtungen abdecken. Anschließend können dann mithilfe der Ergebnisse aus der Optimierung Pläne generiert werden, die unter den gegebenen Unsicherheiten möglichst gute Ergebnisse erzielen. Über die Planung mithilfe von Szenarien wurde bereits in den vorherigen Abschnitten geschrieben, ebenso über die Berücksichtigung verschiedener Arten von Unsicherheiten in der Szenarioplanung. Im Folgenden wird die Berücksichtigung von Unsicherheiten, die über Szenarien ausgedrückt werden, in mathematischen Optimierungsproblemen untersucht und es werden Qualitätskriterien für die aus der Lösung der Optimierungsprobleme resultierenden Pläne eingeführt.

In fast allen mittel- und langfristigen Fragestellungen gilt es Unsicherheiten zu berücksichtigen. In klassischen Optimierungsmodellen können Unsicherheiten oft nicht adäquat abgebildet werden, da diese lediglich die optimale Lösung für ein mögliches zukünftiges Szenario liefern können (Kouvelis und Yu, 1997, S. 3). Wenn die Angabe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen für das Auftreten zukünftiger Ereignisse möglich ist, kann stochastische Optimierung angewendet werden und diese Nachteile ausgleichen (Ben-Tal u. a., 2011). Allerdings wird in stochastischen Programmen oft der Erwartungswert als Optimierungskriterium eingesetzt, wodurch die risikoaverse Einstellung vieler Entscheider nicht hinreichend berücksichtigt wird (Kouvelis und Yu, 1997, S. 5). Darüber hinaus wird der Auswirkungsumfang in deterministischen und stochastischen Programmen oftmals unterschätzt. Abhängig davon, welches Szenario tatsächlich eintritt, können die Umweltbedingungen, unter denen eine Lösung zulässig und möglichst gut sein muss, große Variationen aufweisen (Kouvelis und Yu, 1997, S. 5). So

können für bestimmte Datenausprägungen optimale Lösungen bei kleinen Änderungen der Umwelt weit entfernt vom Optimum sein oder sogar unzulässig werden (Ben-Tal u. a., 2011). Aufgrund dieser Einschränkungen werden Planungsprobleme, bei denen die Zulässigkeit der Lösung auch in Extremsituationen wichtig ist und die Kosten für unzulässige Lösungen entsprechend hoch sind, oftmals mit robuster Optimierung adressiert (Ben-Tal u. a., 2011). Dabei wird eine Fragestellung unter Berücksichtigung einer gegebenen Anzahl möglicher Zukunftsszenarien optimiert (van der Heijden, 1996, S. 100f). Aufgrund der Unsicherheit über die zukünftigen Entwicklungen kann keine Optimalität erzielt werden. Stattdessen wird versucht, möglichst gute Lösungen in Bezug auf vorab definierte Kriterien zu generieren (Ben-Tal u. a., 2011): Eine Lösung soll möglichst stabil, zulässig, flexibel und optimal sein (Sundaresan u. a., 1995; Beyer und Sendhoff, 2007). Stabilität ist gegeben, wenn die Planung nur geringe (oder keine) Anpassungen benötigt, um für möglichst viele der betrachteten Szenarien zulässig zu bleiben. Nicht immer ist es möglich einen Plan zu finden, der für alle Szenarien zulässig ist. Teilweise müssen Abstriche in Bezug auf die Zulässigkeit gemacht werden, da Pläne, die für alle Szenarien zulässig sind, mit sehr hohen Kosten verbunden sein können (Bertsimas und Thiele, 2006). Das zweite Kriterium der Zulässigkeit wird anhand der Anzahl der Szenarien gemessen, für die ein Plan zulässig ist. Flexibilität bezieht sich auf die Möglichkeit, einen Plan im Falle von geänderten Umständen ohne hohe Kosten anzupassen. Diese Anpassungen sind, aufgrund der geforderten Stabilität, nicht erwünscht, jedoch nicht immer vermeidbar. Das Kriterium der Optimalität bezieht sich auf die Güte eines Plans in Bezug auf die einzelnen Szenarien. Nur in den wenigsten Fällen ist es möglich einen Plan zu generieren, der für alle Szenarien optimal ist. Das Kriterium fordert deswegen möglichst geringe Abweichungen von der optimalen Lösung oder die Erreichung eines bestimmten Niveaus für alle Szenarien (Sundaresan u. a., 1995). Der Forderung nach Stabilität kann nur für Szenarien nachgekommen werden, die bekannt sind. Muss eine Planung unter hoher Unsicherheit durchgeführt werden, kann eine mangelnde Stabilität durch die Flexibilität des Plans ausgeglichen werden (Scholl, 2001, S. 93ff).

Folgende Kriterien werden von Scholl (2001) zur Bewertung von Lösungen angewandt:

- **Ergebnisrobustheit** - Ein Plan ist ergebnisrobust, wenn er für alle Szenarien ein bestimmtes (vorher definiertes) Anspruchsniveau erreicht. Dabei kann

entweder die Güte des Plans für jedes Szenario bewertet werden oder die Abweichung vom Zielniveau. Das Minimum der Zielerreichung bzw. das Maximum der Abweichung wird dann durch einen Grenzwert limitiert (Scholl, 2001, S. 99f).

- **Optimalitätsrobustheit** - Zur Bewertung eines Plans in Bezug auf die Optimalitätsrobustheit werden die Abweichungen dieses Plans von den jeweiligen optimalen Lösungen der einzelnen Szenarien gemessen. Dies kann absolut oder relativ, also in Bezug zur optimalen Lösung, geschehen. Diese Abweichungen können durch einen Maximalwert beschränkt werden oder die Wahrscheinlichkeit für ihr Auftreten wird auf einem akzeptablen Niveau gehalten (Scholl, 2001, S. 102f).
- **Zulässigkeitsrobustheit** - Die Zulässigkeitsrobustheit ist ein Maß für die Anzahl an Szenarien, für die ein Plan gültig ist. Im Zuge von Kompensationsmodellen können Maßnahmen definiert werden, die einen eigentlich unzulässigen Plan entsprechend anpassen, dass er zulässig wird. Sind Eintrittswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Szenarien bekannt, können diese auch genutzt werden, um *Chance-Constraint* Modelle aufzustellen, bei denen eine Wahrscheinlichkeit vorgegeben werden kann, mit der einzelne Restriktionen erfüllt werden sollen (Scholl, 2001, S. 104)⁴.
- **Informationsrobustheit** - Informationsrobuste Pläne erzielen auch für Szenarien, die nicht direkt in die Planung mit eingeflossen sind, gute Ergebnisse. Dieses Kriterium ist schwer messbar, da zum Zeitpunkt der Planung oft nicht alle möglichen Szenarien absehbar sind. Darüber hinaus können nicht immer alle Szenarien, die bekannt sind, in die Planung mit einbezogen werden. Ein Grund dafür, dass Szenarien nicht berücksichtigt werden, obwohl die Möglichkeit ihres Eintretens bekannt ist, kann die Komplexität der Lösungssuche sein. Ist die Berücksichtigung aller Szenarien nicht möglich, können diese zum Beispiel aggregiert werden. Die Lösung für die aggregierte Menge der Szenarien soll dann auch für die nicht konkret einbezogenen Szenarien anwendbar sein (Scholl, 2001, S. 105ff).
- **Planungsrobustheit** - Planungsrobustheit wird für rollierende Pläne definiert und bezieht sich auf die Güte eines Planes, bei verändertem Informationsstand

⁴Eine Einführung in *Chance Constraint Programming* ist in Charnes und Cooper (1959) gegeben

in der fortlaufenden Planung. Umso weniger Anpassungen nötig sind, desto stabiler ist die Lösung. Aber auch Flexibilität kann zu Planungsrobustheit führen, wenn Anpassungen aufgrund neuer Informationen ohne hohe Kosten möglich sind (Scholl, 2001, S. 108ff).

- **Bewertungsrobustheit** - Dieses Kriterium bezieht sich auf die verschiedenen Möglichkeiten einen Plan zu bewerten. Wird ein Plan, unabhängig von der Methode, die zur Bewertung herangezogen wird, immer ähnlich eingeordnet im Vergleich zu den Alternativen, ist er bewertungsrobust. Im Gegensatz dazu fehlt es Plänen, die nach der einen Methode weit vorne einsortiert werden und bei der nächsten einen der hinteren Plätze belegen, an Bewertungsrobustheit (Scholl, 2001, S. 110f).

Die robuste Optimierung eignet sich vor allem für Planungssituationen, in denen aufgrund der Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung der Situation keine eindeutige optimale Lösung ermittelt werden kann (Mulvey u. a., 1995). Bei dem Maß an Unsicherheit, mit dem Entscheider in solchen Situationen konfrontiert sind, ist es wichtiger und auch weitaus praktikabler, Entwicklungsrichtungen oder Trends zu erkennen, anstatt alle möglichen Entwicklungen detailliert zu definieren und in der Planung zu berücksichtigen. Ziel ist es dann, möglichst gute und zulässige Lösungen für die verschiedenen Entwicklungsrichtungen zu finden (Mulvey u. a., 1995). Darüber hinaus kann in der robusten Optimierung die Risikobereitschaft des Entscheiders in die Lösungsfindung mit einbezogen werden (Scholl, 2001, S. 90ff). Risikoaverse Entscheidungsträger, die über die Verteilung von Hilfsgütern nach einem Hurrikan entscheiden müssen, würden zum Beispiel vor allem Szenarien betrachten, in denen sehr viele Menschen von dem Sturm betroffen sind. Damit würden dann Pläne entwickelt, die eine große Menge an Hilfsgütern einplanen.

Nach Greenberg und Morrison (2009) fallen auch Methoden unter robuste Optimierung, die eine Alternative auswählen, die unter den denkbar schlechtesten Bedingungen die besten Ergebnisse erzeugt (Minimax-Kriterium). Beispielsweise kann die Minimax Regret Regel angewendet werden, bei der für jede Lösung bestimmt wird, wie sie unter schlechtesten Bedingungen abschneiden würde und dieser Wert anschließend mit dem besten erzielbaren Ergebnis verglichen wird (Eldar u. a., 2004). Oftmals ist es jedoch nicht empfehlenswert, nur eine Optimierung des *Worst Case*-Szenarios vorzunehmen. Durch die Optimierung des schlechtesten Falls werden zu viele Entwicklungsrichtun-

gen außer Acht gelassen (Mulvey u. a., 1995). Darüber hinaus sind in humanitären Fragestellungen die Ressourcen knapp. Der *Worst Case* wird aber durch die denkbar schlechteste Entwicklung der Situation definiert. Es wären also sehr große Mengen an Hilfsgütern notwendig, um optimal auf den *Worst Case* reagieren zu können. Diese Lösung ist somit in der Regel nicht umsetzbar.

Eine andere Möglichkeit ist die Beschränkung des Lösungsraums, so dass die Lösung nicht zu weit von einem zentralen Wert (der für das Mittel der Szenarien gute Ergebnisse erzielt) entfernt ist. Diese Modelle erfordern keine Angabe von Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der verschiedenen Zustände, was zur Lösung vieler realer Fragestellungen günstig ist. Beim Laplace-Kriterium werden alle möglichen Szenarien als gleichwahrscheinlich angenommen und es wird die Alternative gewählt, bei der die Summe der individuellen Ergebnisse aller Szenarien maximal ist. Bei der Hurwicz-Regel werden sowohl das schlechteste als auch das beste Ergebnis einer jeden Alternative zur Bewertung heran gezogen (Kramer, 1967)⁵.

Insbesondere zwei Entwicklungsrichtungen haben den Begriff der robusten Optimierung geprägt: Mulvey u. a. (1995) haben ein Modell entwickelt, das aus einer Struktur- und einer Kontrollkomponente besteht. Letztere kann angepasst werden, wenn die Ausprägung der unsicheren Parameter bekannt ist, wohingegen die Strukturvariable nicht von den unsicheren Werten abhängt und von Beginn an fixiert wird. Es wird ein Kompromiss zwischen Optimalitäts- und Zulässigkeitsrobustheit gesucht. Optimiert wird dann z.B. der Mittelwert über alle Szenarien. Dafür müssen jedoch die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien bekannt sein (Mulvey u. a., 1995).

Kouvelis und Yu (1997) haben parallel dazu eine Form der robusten Optimierung entwickelt, die ohne Eintrittswahrscheinlichkeiten auskommt. Es wird eine Lösung generiert, die unter allen möglichen Szenarien zulässig ist. Eine Verletzung einzelner Restriktionen unter bestimmten Entwicklungen ist demnach nicht erlaubt. Dies führt zu beliebig schlechten Lösungen für viele Szenarien. Dieser Effekt wird verstärkt durch die Optimierung des *Worst Case*. Alle anderen Szenarien werden in der Zielfunktion nicht abgebildet. Diese Form der robusten Optimierung ist also nur sinnvoll anwendbar, wenn der Entscheidungsträger extrem risikoavers ist (Kouvelis und Yu, 1997, S. 15 - 28).

⁵Eine Einführung zu den verschiedenen Bewertungskriterien bei Entscheidungsproblemen unter Unsicherheit sowie eine Übersicht ihrer Einsatzgebiete ist zum Beispiel in Szaniawski (1960) gegeben.

Aufgrund der komplexen Strukturen von robusten Optimierungsmodellen und um die gut entwickelten klassischen Lösungsmethoden nutzen zu können, wurde der Versuch gemacht, die Unsicherheiten aus dem Modell an sich auszublenden und sie stattdessen vor- oder nachgelagert zu berücksichtigen. Zur vorgelagerten Berücksichtigung der Unsicherheiten wurden sogenannte deterministische Ersatzwertmodelle entwickelt. Dabei wird entweder der Erwartungswert, der Erwartungswert zuzüglich von Sicherheitszuschlägen oder der *Worst Case* anstelle der unsicheren Parameter eingesetzt (Scholl, 2001, S. 186ff). Dadurch bleiben allerdings viele mögliche Entwicklungsrichtungen völlig unberücksichtigt, so dass diese Art der Ersatzwertmodellierung nur bedingt zum Lösen von Modellen unter Unsicherheit geeignet sind.

Für lineare Probleme kann eine Sensitivitätsanalyse zur Einschätzung der Robustheit dienen. Dabei werden die unsicheren Parameter im Anschluss an die Optimierung analysiert. Gemischt-ganzzahlige Probleme müssen für jede Parametervariation erneut gelöst werden, um Auswirkungen von Veränderungen in den Daten ermitteln zu können (Scholl, 2001, S. 189ff). Wiederholt auftretende Lösungskomponenten können anschließend fixiert werden und so zu einer Kompromisslösung zusammengefügt werden. Diese kann jedoch recht weit von den jeweils optimalen Lösungen für die einzelnen Szenarien entfernt sein. In dieser Arbeit wird die parametrische Variation genutzt, um die Sensitivität bezüglich der Ausgangsparameter zu überprüfen. Mithilfe der veränderten Ausgangsparameter werden die Ergebnisse der Szenariolösung mit dem Modell *mHumLog* analysiert und es werden die Faktoren ermittelt, die Einfluss auf die Entscheidung haben, die sogenannten Schlüsselfaktoren.

Die Betrachtung mehrerer Zielsetzungen führt bei der Analyse der Robustheit von Plänen zu einer gesteigerten Komplexität. Während es in Problemstellungen mit einer Zielsetzung und einer nicht zu großen Anzahl an Szenarien möglich ist, die Pläne für jedes Szenario zu beurteilen, ist dies kaum noch durchführbar, wenn mehrere Zielsetzungen hinzukommen. Es müssen nicht nur die Strategien für jedes Szenario evaluiert, sondern auch Kompromisslösungen zwischen den Zielsetzungen gefunden und die Robustheit über alle Szenarien und über alle Ziele beurteilt werden (Wright u. a., 2009).

Comes (2011) definiert Kriterien, mit denen ein Plan, bzw. eine Alternative, a posteriori, also im Vergleich zu anderen Alternativen, beurteilt werden kann. Die Qualität eines Planes ist in multikriteriellen Fragestellungen subjektiv und hängt vom jeweiligen Entscheidungsträger und seinen Prioritäten ab. Comes (2011) definiert dafür Kriterien, die das „Risiko“ für das Eintreten eines unerwünschten Ereignisses bei Auswahl

einer bestimmten Alternative bewerten. Einige Risiken können akzeptiert werden, wohingegen andere mit allen Mitteln verhindert werden müssen. Sowohl die Schwere der Auswirkung als auch die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses sind dafür zu beurteilen und zu berücksichtigen (Haimes u. a., 2002).

Zur Messbarkeit des Risikos bei Verfolgung eines bestimmten Plans wurden von verschiedenen Autoren Indikatoren definiert: Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses und der Verlust im Falle des Eintretens (Haimes u. a., 2002). Darüber hinaus spielt die Varianz eine Rolle bei der Risikobewertung (Fishburn, 1984), der *Worst Case* (Rustem u. a., 2000) und das Bedauern im Vergleich zu den anderen Alternativen (Bell, 1982). Comes (2011) definiert folgende Indikatoren, um das Risiko einer Alternative zu bewerten:

- Der *Worst Case*,
- die Differenz zwischen den möglichen Ergebnissen,
- die Abweichung der Ergebnisse vom Benchmark und
- das Bedauern.

In multikriteriellen Problemen ist der *Worst Case* nicht objektiv ermittelbar. Die Präferenzen des Entscheidungsträgers müssen zur Identifizierung des *Worst Case* berücksichtigt werden. In humanitären Fragestellungen wird zum Beispiel die Versorgung der Bevölkerung stärker gewichtet als das Einsparen von Kosten. Die Differenz zwischen den möglichen Ergebnissen bezeichnet die Spannbreite der Ergebnisse für jede der betrachteten Variablen (Comes, 2011, S. 146ff). Bei der Beurteilung im Vergleich zum Benchmark wird für jede Alternative evaluiert, wie viele Variablenwerte über alle betrachteten Szenarien von vorher definierten Werten für die entsprechenden Variablen abweichen. Dieses Konzept kann noch erweitert werden, indem die Höhe der Abweichung einbezogen wird (Comes, 2011, S. 151ff). Das Bedauern kann erst im Nachhinein gemessen werden, wenn also die tatsächliche Entwicklung bekannt ist. Dann wird das eingetretene Ergebnis einer Alternative mit dem bestmöglichen Ergebnis verglichen (Matos, 2007).

Im Folgenden wird die Nutzung von Szenarien in der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Fragestellungen der humanitären Logistik untersucht. Anschließend werden generelle Charakteristika bei der Entwicklung solcher Szenarien herausgearbeitet und darauf aufbauend werden konkrete Szenarien entwickelt, die daraufhin mithilfe

des Modells *mHumLog* gelöst werden. Schließlich werden die Ergebnisse in Abschnitt 7.6 auf ihre Robustheit überprüft und mithilfe der in diesem Kapitel vorgestellten Methoden bewertet. Dabei wird der Fokus auf die vielfach geforderte einfache Anwendbarkeit der Methoden zur Entscheidungsunterstützung gelegt. Damit wird sichergestellt, dass die Ergebnisse auch im humanitären Kontext anwendbar sind.

6. Anwendung der Szenariotechnik in der humanitären Logistik

In der humanitären Logistik werden in zahlreichen Anwendungen Szenarien genutzt, um mögliche Entwicklungen in der Zukunft und deren Folgen zu untersuchen. Das liegt zum einen an den Unsicherheiten, mit denen sich die Entscheider bei humanitären Fragestellungen konfrontiert sehen, und zum anderen an den oftmals unvollständigen Daten und der fehlenden Möglichkeit Daten zu erheben (van Wassenhove, 2006). Die großen Unsicherheiten führen dazu, dass eine Vielzahl an möglichen Entwicklungsrichtungen betrachtet werden müssen. Darüber hinaus führen die unvollständigen Datenbestände zu der Notwendigkeit, fehlende Informationen durch Schätzungen zu ergänzen sowie deren Einfluss auf die zu treffende Entscheidung zu untersuchen. Es ist dabei ohnehin fraglich, inwieweit einzelne Prognosen nützlich sind, die sich auf vergangene Daten stützen, wenn es um die Vorbereitung auf mögliche zukünftige Katastrophen geht. Schon im geschäftlichen Umfeld kann die Nützlichkeit von Vorhersagen in Frage gestellt werden:

„The purpose of the exercise is not to come up with a forecast, because you know it will be wrong. Instead, it's to draw a circle around multiple possibilities and think about whether you are prepared to face the range of futures that might unfold...“ (Garvin und Levesque, 2006, S. 1).

In humanitären Fragestellungen ist die Vorbereitung auf seltene Ereignisse mit starken Auswirkungen auf die Umwelt gefordert, was noch weniger anhand von Prognosen durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund werden historische Daten in diesem Bereich oftmals nicht für Vorhersagen genutzt, sondern um verschiedene mögliche Zukunftsbilder, also Szenarien, zu generieren (Balçık und Beamon, 2008; Uribe-Sánchez u. a., 2011; De Silva, 2001).

Im Folgenden wird die Nutzung von Szenarien in der wissenschaftlichen Literatur zur humanitären Logistik aufgezeigt, anschließend werden typische Charakteristika für Szenarien in der humanitären Logistik herausgearbeitet und es wird auf Szenarien für

Overlapping Disasters eingegangen. Abschließend werden konkrete Szenarien für den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall generiert.

6.1. Szenarien in der humanitären Logistik - Stand der Forschung

Der Einsatz von Szenarien ist in der humanitären Logistik weit verbreitet. Zum Beispiel nutzen Barbarosoğlu und Arda (2004); Salmerón und Apte (2010) und Bozorgi-Amiri u. a. (2013) Szenarien, die basierend auf historischen Daten generiert werden. Die Daten werden zum Großteil aus Katastrophendatenbanken herausgefiltert (De Silva, 2001; Balçık und Beamon, 2008; Uribe-Sánchez u. a., 2011). So beziehen Balçık und Beamon (2008) zum Beispiel ihre Daten zur Generierung von Erdbebenszenarien vom National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Department of Commerce (2013). Sie definieren Tupel bestehend aus Ort, an dem das Erdbeben eintritt, und Impakt des Erdbebens, die die Szenarien beschreiben. Andere Autoren beziehen ihre Daten aus Experteninterviews (Salmerón und Apte, 2010; Bozorgi-Amiri u. a., 2013; Uribe-Sánchez u. a., 2011). So nutzen Salmerón und Apte (2010) zur Vervollständigung ihrer Hurrikanszenarien unter anderem Daten aus Interviews mit Praktikern aus der humanitären Logistik. Es ist jedoch selten der Fall, dass die zur Modellierung der Problemstellung benötigten Daten vollständig verfügbar sind; fehlende Angaben müssen oft geschätzt werden (Balçık und Beamon, 2008). Auf Szenarien von guter Qualität wird gerne von anderen Autoren zugegriffen. Barbarosoğlu und Arda (2004); Salmerón und Apte (2010) und Mete und Zabinsky (2010) nutzen zum Beispiel Szenarien oder Teile dieser von anderen Autoren: Salmerón und Apte (2010) nutzen Daten für ihre Hurrikanszenarien, die für zwei Masterarbeiten von Tean (2006) und Heidtke (2007) zusammengetragen worden sind. Mete und Zabinsky (2010) arbeiten mit Erdbebenszenarien im Umkreis von Seattle, die in Stewart (2005) vorgestellt werden und Barbarosoğlu und Arda (2004) nutzen Erdbebenszenarien aus Erdik u. a. (2001). Sind keine Daten vorhanden oder sollen die Szenarien rein illustrativen Zwecken dienen, werden sie, zum Testen der entwickelten Modelle, in der Regel selbst erstellt. Solch ein Vorgehen ist bei Sherali u. a. (1991); Tamura u. a. (2000); Chang u. a. (2007); Jia u. a. (2007) und Rawls und Turnquist (2010) zu finden. Chang u. a. (2007) generieren zum Beispiel Szenarien zum Testen ihres mathematischen Modells, das zur Vorbereitung einer schnellen Reaktion auf eine Flut in urbanen Umgebungen angewendet werden kann. Auch Tamura u. a. (2000) generieren eigene Szenarien, um ihr Entscheidungs-

unterstützungssystem zu testen, das zur Vorbeugung vor gravierenden Konsequenzen im Katastrophenfall dienen soll. Dafür erstellen sie mehrere Erdbebenszenarien, auf die sie ihr mathematisches Modell anwenden.

Die Verfügbarkeit der benötigten Daten beeinflusst die Art der Szenariogenerierung, entscheidend ist jedoch vor allem der Zweck der Szenariogenerierung. So nutzen viele Autoren Zufallszahlen, um unsystematische Unsicherheiten darzustellen (Barbarosoğlu und Arda, 2004; Rawls und Turnquist, 2010). Andere Autoren generieren bewusst Fallunterscheidungen in den Hauptszenarien, die mögliche Entwicklungen der Zukunft detaillierter abbilden (De Silva, 2001; Sheu, 2007). Damit wird dann oftmals die Anwendbarkeit mathematischer Modelle in verschiedenen Situationen gezeigt. In der Regel beschränken sich die Autoren jedoch auf einen Katastrophentyp. Salmerón und Apte (2010) und Mete und Zabinsky (2010) betonen dagegen die generelle Anwendbarkeit ihrer Modelle für verschiedene Katastrophentypen. Getestet werden die Modelle aber in beiden Fällen nur für eine spezielle Situation: Mete und Zabinsky (2010) testen ihr Modell, wie oben erwähnt, für Erdbebenszenarien und Salmerón und Apte (2010) treffen verschiedene Annahmen bezüglich des Ausmaßes einer Flut. Die so generierten Szenarien beeinflussen die Transportmöglichkeiten und somit die Geschwindigkeit, mit der die Bevölkerung evakuiert werden kann bzw. Hilfsgüter geliefert werden können. Einen ähnlichen Ansatz in Bezug auf Erdbeben verfolgen Tamura u. a. (2000). Dabei ist die größte Wahrscheinlichkeit vergeben für den Fall, dass gar kein Erdbeben auftritt (das Erwartungsszenario). Falasca und Zobel (2011) betrachten verschiedene Klassen von Nachfrageentwicklungen (geringe, mittlere und hohe Nachfrage) und des Spendenaufkommens. Aus den Kombinationen dieser Klassen entstehen dann die zu betrachtenden Szenarien. Zhu u. a. (2008) betrachten zwei verschiedene Erdbebenszenarien; je nach Auswirkung der Katastrophe unterscheidet er zwischen leichten und ernsthaften Erdbeben. Für jedes dieser Hauptszenarien werden dann drei Einzelszenarien definiert, die mit einem mathematischen Modell gelöst werden. Das Modell soll dabei helfen Ressourcen zu positionieren, die im Erdbebenfall benötigt werden. Für die leichten Erdbeben sollen die Regionen selber genug Ressourcen vorrätig haben, so dass nur in schweren Fällen auf zentrale Lager zurückgegriffen werden muss.

Die meisten Autoren in der humanitären Logistik ordnen den Szenarien Wahrscheinlichkeiten für ihr Auftreten zu. Dies ist nicht unproblematisch, da dadurch oft Extremszenarien vernachlässigt werden, was gerade in der humanitären Hilfe nicht zielführend ist. Darüber hinaus ist es oftmals kaum möglich, die entsprechenden Wahr-

scheinlichkeiten zu bestimmen. Zum Generieren einer Lösung über verschiedene Szenarien mithilfe eines Optimierungsmodells sind Wahrscheinlichkeiten jedoch Voraussetzung. Auch die Anzahl der erstellten Szenarien variiert stark, vergleichbar mit den weit auseinander gehenden Empfehlungen in der Grundlagenliteratur. Viele Autoren stellen wenige (zwei oder drei) Szenarien auf, um gegenläufige Entwicklungen darzustellen (Tamura u. a., 2000; Jia u. a., 2007; Chang u. a., 2007, u.a.). Andere Autoren stellen mehr als drei und bis zu zehn Szenarien auf (Sherali u. a., 1991; De Treville u. a., 2006; Mete und Zabinsky, 2010, u.a.). Wieder andere testen ihre Modelle an zahlreichen Einzelszenarien, um über Erwartungswerte zu robusten Planungen zu gelangen. Balçık und Beamon (2008) stellen zum Beispiel 286 Erdbebenszenarien zur Standortplanung und Positionierung von Hilfsgütern auf. Auch Rawls und Turnquist (2010) generieren 51 Szenarien zur Vorpositionierung von Hilfsgütern in Hurrikan gefährdeten Gebieten. Einige Autoren unterscheiden zwischen Haupt- und Einzelszenarien: Barbarosoğlu und Arda (2004) erstellen zum Beispiel acht Erdbebenszenarien, die dann wiederum in neun Einflussfaktoren-Szenarien unterschieden werden. Kombinationen dieser bilden dann die Menge der zu lösenden Szenarien.

Die meisten Autoren lösen die Szenarien mit eigens dafür entwickelten Optimierungsmodellen. Dies geschieht entweder, indem die verschiedenen Szenarien mit dem entsprechenden Modell gelöst und die Ergebnisse anschließend verglichen werden (Uribe-Sánchez u. a., 2011) oder unter Nutzung von Wahrscheinlichkeiten durch Bestimmung des Erwartungswertes (Barbarosoğlu und Arda, 2004; Chang u. a., 2007; Balçık und Beamon, 2008, u.a.). De Silva (2001) löst die generierten Szenarien mit einer Simulation, um geeignete Evakuierungspläne für verschiedene Situationen zu erstellen.

Die meisten Studien aus der humanitären Logistik nutzen rein extern beeinflusste Szenarien (Umfeldszenarien). Als Ausnahmen sind hier De Treville u. a. (2006); Tamura u. a. (2000) und De Silva (2001) zu nennen. Diese Autoren definieren auch Faktoren des Gestaltungsfeldes in ihren Szenarien, sie modellieren die Situation also abhängig von den vorher getroffenen Entscheidungen. Eine ausführliche Übersicht über die Nutzung von Szenarien in der humanitären Logistik ist in Anhang A.3 gegeben.

6.2. Charakteristika von Szenarien in der humanitären Logistik

Einige generelle Charakteristika können für Szenarien in der humanitären Logistik aus den in Abschnitt 6.1 zitierten Arbeiten abgeleitet werden. In den meisten Fällen

werden Szenarien generiert und mittels eines Optimierungsmodells gelöst, um eine Entscheidungsunterstützung zu erhalten. Wird dabei mithilfe des Modells nach einer optimalen oder guten Entscheidung gesucht, werden in der Regel Umfeldszenarien generiert. Soll der Einfluss der Handlungsalternativen des Entscheidungsträgers auf die zukünftige Entwicklung der Situation untersucht werden, werden Systemszenarien definiert. Die meisten Szenarien in der humanitären Logistik sind prozessbezogen, da die Entwicklung in der betrachteten Region im Fokus steht. Zudem handelt es sich um explorative Szenarien, da von einem Startpunkt aus mehrere Entwicklungsmöglichkeiten betrachtet werden. Die Szenarien können, je nach Rahmenbedingungen, präskriptiv oder deskriptiv sein. Das zu erreichende Ziel einer Hilfsaktion ist in jedem Fall bekannt. Allerdings ist der maximale oder ein realistischer Zielerreichungsgrad zu bestimmen. Abhängig davon, ob das Budget für die Hilfsaktion begrenzt ist oder nicht, wird ein präskriptives Szenarioumfeld (bei unbegrenztem Budget) betrachtet oder ein deskriptives (bei begrenztem Budget).

In der humanitären Logistik werden zumeist Extremszenarien generiert. Die Möglichkeit, dass keines der Extremszenarien eintritt, darf aber nicht vernachlässigt werden. Dieser Fall wird als Erwartungsszenario definiert. Zur Lösung der Szenarien mit mathematischen Modellen werden oftmals Eintrittswahrscheinlichkeiten geschätzt und die Szenarien werden somit als Vorhersagen formuliert. Die größte Wahrscheinlichkeit hat dabei das Erwartungsszenario. Trotzdem haben die Extremszenarien einen großen Einfluss auf die Lösung, da die Auswirkungen einschneidend sind und die Region deswegen auf ein eventuelles Eintreten vorbereitet werden soll.

Der betrachtete Zeithorizont hängt von der Phase im Katastrophenhilfe-Lebenszyklus ab, in der die Szenarien zum Einsatz kommen. In vorbereitenden Fragestellungen (Katastrophenvermeidung und -vorsorge) ist der Planungshorizont länger. Oft wird er aber nicht explizit definiert, so zum Beispiel von Balçık und Beamon (2008) und Mete und Zabinsky (2007). In Fragestellungen aus der Katastrophenbewältigung dagegen werden durchaus kurze (Tage oder sogar Stunden) Planungshorizonte betrachtet, zum Beispiel von Sheu (2007) und Yi und Özdamar (2007). Die Betrachtung eines solchen kurzen Zeithorizontes begründet sich mit der großen Unsicherheit, die in der betrachteten Situation herrscht. In kommerziellen Fragestellungen ist die Wahrscheinlichkeit, dass in einem Zeitraum von ein bis zwei Wochen Ereignisse eintreten, die die aktuelle Situation grundlegend verändern, sehr gering. Die Berücksichtigung solcher Ereignisse würde das Zukunftsbild entsprechend verzerren. In laufenden Hilfsaktionen hingegen

sind die Entscheidungsträger jeden Tag mit großen Unsicherheiten konfrontiert und müssen diese in ihren Entscheidungen berücksichtigen, um eine fundierte Planung der weiteren Hilfsaktion zu gewährleisten (van der Heijden, 1996, S. 91f und Schnaars, 1987).

6.3. Die Phasen des Szenario-Managements in Reaktion auf die Unterbrechung einer Hilfsaktion

In der vorliegenden Problemstellung soll die Reaktion auf eine unterbrochene Hilfsaktion optimiert werden und zwar so, dass auf mögliche zukünftige Unterbrechungen besser reagiert werden kann. Da unbekannt ist, ob und wenn ja, in welcher Region und zu welchem Zeitpunkt eine weitere Unterbrechung eintritt, wird Szenarioplanung angewandt, um trotz dieser Unsicherheiten möglichst robuste Pläne zu generieren.

Die zu lösende Problemstellung definiert das Gestaltungsfeld: Es soll entschieden werden, wie viele Hilfsgüter nachbestellt werden und welche Mengen der Hilfsgüter wo gelagert werden. Dafür muss auch entschieden werden, wie viele Hilfsgüter zwischen welchen Lagern transportiert werden sollen und wie viel Sicherheitsbestand an den einzelnen Lagern gehalten wird. Diese Fragen sollen mithilfe der Szenarioanalyse beantwortet werden. Es wird ein kurzer Zeithorizont (ein bis zwei Wochen) betrachtet, da lediglich der Zeitraum bis zur Regulierung der Unterbrechung von Bedeutung ist. Nach dieser Zeit können größere Nachbestellungen eintreffen, die die Hilfsaktion wieder normalisieren. Mithilfe der Szenariotechnik sollen Distributionspläne für verschiedene Situationen generiert und ausgewertet werden, um daraus Handlungsempfehlungen ableiten zu können, die den Entscheidungsträgern als Entscheidungsunterstützung zur Verfügung gestellt werden können.

Szenario-Vorbereitung

Zur Vorbereitung der Szenarien wird die aktuelle Lage des Hilfsprojektes sorgfältig beschrieben. Die Lagerbestände werden aufgenommen und die Menge des Bestandes am Zentrallager sowie der Fortschritt der Hilfsaktion werden erfasst. Wichtige Faktoren zu diesem Zeitpunkt sind zum Beispiel, wie viele Hilfsgüter sich in den Lagern befinden, wie viele sich im Distributionssystem befinden, wie zuverlässig die Infrastruktur ist und wie gut das Distributionsnetz ausgebaut ist. Darüber hinaus werden die Ursa-

chen für die Unterbrechung der Hilfsaktion untersucht und der eingetretene Schaden wird analysiert. Dafür muss spezifiziert werden, wie viele Menschen betroffen sind und wie viele davon noch unversorgt sind. Darüber hinaus muss die Höhe des Risikos für zukünftige Unterbrechungen der Hilfsaktion eingeschätzt werden. Auch grundlegende Informationen über die betroffene Region sind wichtig, wie zum Beispiel die Populationsdichte, die Gesamtanzahl an gefährdeten Menschen, das herrschende Klima und die Temperatur, die politische Lage im Land sowie die grundlegende Situation der Bevölkerung (Anteil in Armut lebender Menschen, BIP, Ernährungssicherheit usw.) (World Health Organization, 2004; Protopopoff u. a., 2009).

Szenariofeld-Analyse

Im zweiten Schritt wird das Szenariofeld genauer beleuchtet. Typische Bestandteile des Gestaltungsfeldes einer Hilfsaktion sind die Distributionsentscheidungen für die Hilfsgüter. Umfeldbereiche ergeben sich dagegen aus den Unsicherheiten, denen eine Hilfsaktion ausgesetzt ist. Beispiele dafür sind die Ausbreitung einer Epidemie, die Überflutung von Straßen oder ganzer Landstriche, Plünderungen von Lagern oder Flüchtlingsströme in die betrachteten Regionen, die versorgt werden müssen.

Anschließend werden Einflussfaktoren definiert. Die Umfeldfaktoren ergeben sich zum Teil aus der Analyse der IST-Situation: So beeinflussen die Bevölkerungsdichte, die medizinische Versorgung, die politische Lage und die Mobilität der Bevölkerung die Wahrscheinlichkeit, dass weitere Unterbrechungen im Laufe der Hilfsaktion auftreten. Natürlich unterscheiden sich die Einflussfaktoren von Situation zu Situation und müssen durch eine Analyse der IST-Situation und der möglichen Entwicklungen jeweils identifiziert werden. Die Faktoren werden anschließend gruppiert, zum Beispiel in Umweltfaktoren, menschliche Faktoren und biologische Faktoren (Protopopoff u. a., 2009). Aber auch Gruppierungen aufgrund der Auswirkung, die die einzelnen Faktoren haben, sind möglich. So können Faktoren zusammengefasst werden, die sich tendenziell gleichläufig entwickeln und die gleichen Auswirkungen auf die Hilfsaktion haben.

Durch Erstellen einer Hierarchie der Faktoren können Schlüsselfaktoren identifiziert werden. Dies sind Faktoren, die besonders wichtig für die zukünftige Entwicklung in der betrachteten Region sind. Diese Schlüsselfaktoren können zum Beispiel mit der CART-Methode ermittelt werden (Protopopoff u. a., 2009). Bei dieser Methode wird ein Entscheidungsbaum generiert und an jedem Knoten neu entschieden, nach wel-

chem Merkmal die Nachfolger generiert werden. Es wird jeweils das Merkmal gewählt, das die deutlichste Differenzierung in Bezug auf die Fragestellung zeigt (Protopopoff u. a., 2009). Abschließend werden die Wechselwirkungen der Faktoren untereinander untersucht¹.

In der vorliegenden Arbeit wird die Relevanz von Einflussfaktoren anhand der Lösung der Szenarien mit dem entwickelten Modell *mHumLog* untersucht. Durch die Lösung der Szenarien mit unterschiedlichen Parametereinstellungen wird untersucht, welche Faktoren tatsächlich einen Einfluss auf die Entscheidung haben und welche in der Entscheidungsfindung nicht näher betrachtet werden müssen.

Szenario-Prognostik

Zur Aufbereitung der Schlüsselfaktoren wird untersucht, welche Merkmale Einfluss auf die Ausprägung der Faktoren haben. Wurde als Schlüsselfaktor der Wasserspiegel eines Flusses identifiziert, sind der Niederschlag und die Stabilität von Dämmen Merkmale, die diesen Faktor beeinflussen. Aufgrund mangelnder Möglichkeiten, das Wetter für die nächsten zwei Wochen exakt vorherzusagen und aufgrund der großen Gesamtzahl an Einflussfaktoren, müssen verschiedene Entwicklungsrichtungen betrachtet werden. Diese Entwicklungsrichtungen sind die Zukunftsprojektionen. Für den Schlüsselfaktor „Wasserspiegel“ können beispielsweise drei Zukunftsprojektionen erstellt werden: Ein hoher, ein moderater und ein geringer Wasserstand.

Szenario-Bildung

Die Zukunftsprojektionen werden anschließend in sogenannten Projektionsbündeln zusammengefasst, denn es werden oftmals zahlreiche ähnliche Zukunftsprojektionen für unterschiedliche Schlüsselfaktoren generiert (Gausemeier u. a., 1996, S. 251f). So werden Zukunftsprojektionen zur Untersuchung der Situation im Zuge der Unterbrechung einer Hilfsaktion nach dem Grad des Risikos für weitere Unterbrechungen zusammengefasst. Diese Bündel werden dann auf Konsistenz geprüft, d.h. es wird geprüft, ob sich die Merkmale teilweise widersprechen (beispielsweise können nicht hoher und geringer Niederschlag zugleich in einem Projektionsbündel auftreten). Anschließend können aus den Projektionsbündeln die Hauptszenarien generiert werden und es werden mehrere Einzelszenarien definiert, die die einzelnen Ausprägungen beinhalten. Überflutungen

¹Informationen zur CART-Methode sind unter anderem in Lausen u. a. (1994) veröffentlicht.

können zum Beispiel in verschiedenen Regionen auftreten und in unterschiedlichen Zeiträumen. Diese Unterscheidungen in Einzelszenarien können mittels Zufallszahlen erzeugt werden, die angeben, welche der betrachteten Regionen von der Flut betroffen sind und zu welchem Zeitpunkt diese Flut eintritt (Scholl, 2001, S. 213-215).

Szenario-Transfer

Der Transfer der Szenarien findet in der Umsetzung der Entscheidung im Zuge der Hilfsaktion statt. Dafür müssen die Ergebnisse der Szenario-Analyse auf die reale Situation übertragen und die Machbarkeit der Pläne geprüft werden. In der operativen Planung ist eine Erstellung und Lösung von Szenarien vor der Entscheidungsfindung oft nicht realisierbar, da in der Regel sowohl Zeit als auch Ressourcen fehlen (van Wassenhove, 2006). Aus diesem Grund ist es hilfreich vorab verschiedene Szenarien zu betrachten, um Merkmale zu identifizieren, die auf eine bestimmte Entwicklung hindeuten. Mithilfe dieser Merkmale und der für verschiedene Situationen generierten optimalen Allokationen, werden Handlungsempfehlungen gegeben, die den Entscheidungsträger in der akuten Situation unterstützen. Dafür muss er oder sie eine Einschätzung über die Ausgangssituation und die möglichen Entwicklungen in der Zukunft abgeben, damit die Ergebnisse aus den Szenarien zu sinnvollen Entscheidungen führen können.

6.4. Fallbeispiel - Burundi vor einer Malaria-Epidemie

Nachdem im vorherigen Abschnitt Faktoren erläutert wurden, die bei der Erstellung von Szenarien zur Planung von *Overlapping Disaster* Situationen relevant sind, wird im Folgenden der Anwendungsfall dieser Arbeit vorgestellt. Dafür werden zuerst allgemeine Informationen über die Ausgangssituation genannt, bevor anschließend konkrete Szenarien generiert werden, die dann im weiteren Verlauf der Arbeit mit dem Modell *mHumLog* gelöst werden.

Im Folgenden wird die Ausbreitung einer Malaria-Epidemie in Burundi als Beispiel für eine Situation mit *Overlapping Disasters* betrachtet. Burundi ist ein Land in Zentralafrika, das von einem jahrelang anhaltenden Bürgerkrieg betroffen war. Es werden zuerst einige allgemeine Fakten über Malaria und der Ausbreitung dieser Krankheit eingeführt sowie über die Situation in Burundi. Auch Informationen zur endemischen

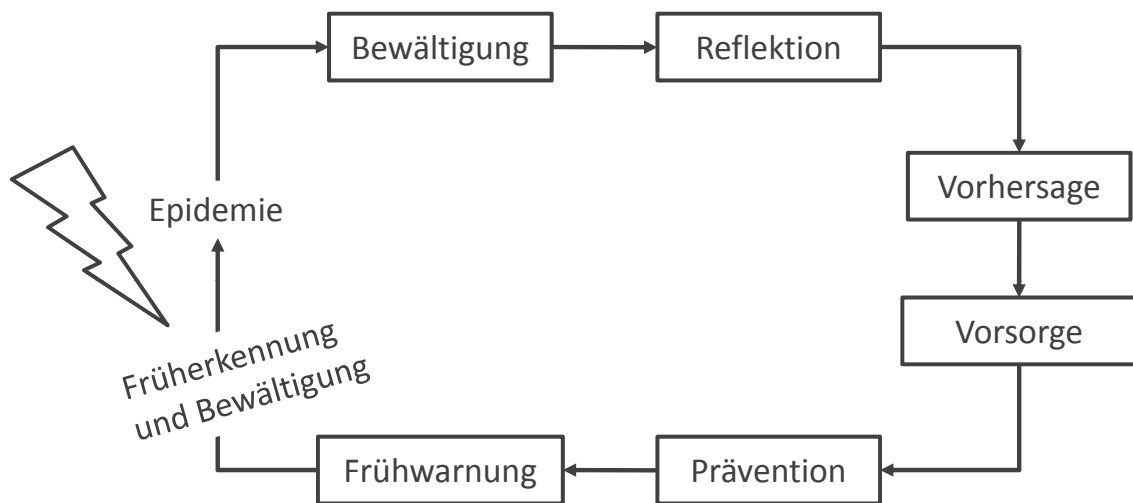


Abbildung 6.1.: Der Zyklus einer Malaria-Epidemie, nach World Health Organization (2005, S. 218)

Ausbreitung und zu vergangenen Malaria-Epidemien in Burundi werden zur Vervollständigung der IST-Situation gegeben. Anschließend werden Risikofaktoren ermittelt, besonders wichtige als Schlüsselfaktoren identifiziert und konkrete Szenarien zur Untersuchung dieser *Overlapping Disasters* generiert. Es handelt sich hierbei nicht um ein konkretes Hilfsprojekt, allerdings um realistische Annahmen in Bezug auf Entfernungen, Bedarfe etc. Die logistischen Strukturen sind rein exemplarisch aufgezeigt, entsprechen aber Expertenmeinungen und den tatsächlichen Entfernungen.

Die Entwicklung einer Malaria-Epidemie

Der Zyklus einer Malaria-Epidemie weist Parallelen zum Katastrophenhilfelebenszyklus auf (Abbildung 6.1). Im Idealfall finden fortlaufend Prognosen statt, um eine frühzeitige Vorbereitung auf eine Epidemie zu ermöglichen (World Health Organization, 2005, S. 37). Besonders wichtig ist ein funktionierendes Frühwarnsystem, um noch vor Ausbruch der Epidemie Gegenmaßnahmen zur Vermeidung und Vorbereitungen zur Versorgung der erkrankten Bevölkerung durchzuführen (World Health Organization, 2005, S. 58). So wird versucht, den Ausbruch einer Epidemie zu vermeiden oder zumindest ihre Ausbreitung zu begrenzen. Nach dem Ausbruch der Epidemie geht es dann vor allem um eine funktionierende Reaktion in Form von wirksamen Medikamenten, die die Bevölkerung auch wirklich erreichen, und um eine Prävention der

weiteren Ausbreitung (World Health Organization, 2005, S. 58f). In einer späten Phase der Epidemie ist die weitere Prävention meistens wirkungslos und die Konzentration liegt auf der Behandlung der erkrankten Menschen. Nach Abklingen der Epidemie sollten Schlüsse aus der vergangenen Hilfsaktion gezogen werden, die in der Zukunft eine bessere Prävention und Reaktion ermöglichen (World Health Organization, 2005, S. 216f).

Um eine gute Früherkennung und eine adäquate Reaktion auf eine Malaria-Epidemie zu ermöglichen, werden Informationen über Bevölkerungsdichte und Struktur, über endemisches Auftreten der Krankheit in der betrachteten Gegend, über Bewegungen in der Bevölkerung (aufgrund von Flüchtlingsströmen), die Sterblichkeitsrate (als Indikator für das Ausmaß der Epidemie), die Immunität in der Bevölkerung und die Anzahl der Malariafälle benötigt (Checchi u. a., 2006). Ein großes Problem sind die Unsicherheiten in den Daten, vor allem in Situationen politischer Instabilität, in denen kein zuverlässiges Monitoring dieser Daten stattfindet (Protopopoff u. a., 2007) und Gesundheitseinrichtungen oftmals zerstört oder für die Bevölkerung nicht zugänglich sind (World Health Organization, 2005, S. 16). Darüber hinaus sollten geografische und klimatische Faktoren aufgezeichnet werden sowie saisonale Schwankungen in Niederschlag und Temperatur. Auch geänderte Umweltbedingungen, z.B. geänderte Landnutzung, können das Risiko einer Epidemie erhöhen, da sie zu verbesserten Brutbedingungen für die Überträger führen können (World Health Organization, 2005, S. 18f).

Malaria-Epidemien breiten sich nicht nach einem festen Schema aus. Die Geschwindigkeit ihrer Verbreitung variiert sehr stark. Das führt dazu, dass es keinen fixen Grenzwert an Malariafällen gibt, ab dem eine Epidemie festgestellt werden kann. Vielmehr müssen Erfahrungen aus vergangenen Epidemien in der betroffenen Region bei der Beurteilung der aktuellen Lage berücksichtigt werden. Das führt in Kombination mit der hohen Geschwindigkeit, mit der sich eine Malaria-Epidemie ausbreitet, oftmals dazu, dass erst reagiert werden kann, wenn die Epidemie schon um sich gegriffen hat (World Health Organization, 2005, S. 24; Checchi u. a., 2006).

Da Prävention zu dem Zeitpunkt, zu dem eine Malaria-Epidemie erkannt wird, oft nicht mehr möglich ist, ist die wichtigste Maßnahme eine schnelle und flächendeckende Behandlung mit einer *Artemisinin-based combination therapy* (ACT). Dieses Medikament wird eingesetzt, seitdem in vielen Ländern eine Resistenz gegen die vorher verwendeten Chloroquine-Präparate aufgetreten ist (World Health Organization, 2013b).

Diagnosen dauern oftmals zu lange, so dass alle Patienten mit fiebrigen Erkrankungen vorsorglich mit ACT behandelt werden. Somit ist eine ausreichende Verfügbarkeit des Medikaments von großer Wichtigkeit für den Erfolg der Hilfsaktion (World Health Organization, 2005, S. 57ff). Dafür sollte sichergestellt werden, dass zentrale Lager eingerichtet werden, in denen ständig Medikamente gegen Malaria verfügbar sind (World Health Organization, 2004, S. 27). Diese Depots werden von den nationalen Behörden betrieben. Zusätzlich dazu haben private Organisationen und Hilfsorganisationen, die nicht der Regierung angehören, eigene Bestände an ACT und anderen Medikamenten gegen Malaria in den Malaria gefährdeten Gebieten im Lager (Amuasi u. a., 2011). Diese Medikamente stellen zumindest eine erste Versorgung sicher, müssen aber in der Regel im Laufe einer Epidemie aufgestockt werden. In der Vergangenheit kam es dabei zu Lieferengpässen von Seiten der Produzenten. Durch die Zusicherung von Sicherheitsbeständen, die im Notfall ausgeliefert werden, sollen diese zukünftig vermieden werden (World Health Organization, 2004, S. 27). Malaria-Epidemien sind, im Vergleich zu anderen Epidemien, relativ langwierig. Ihre Dauer ist abhängig vom Klima und kann drei bis vier Monate oder länger betragen (World Health Organization, 2005, S.53). Allerdings ist in Bezug auf die Versorgung der Bevölkerung mit ACT vor allem die erste Phase einer Epidemie entscheidend. In späteren Phasen, wenn die Bestände an ACT aufgestockt wurden, kann der Epidemie aufgrund der guten Behandlungsmöglichkeit effektiv begegnet werden.

Die Ausgangssituation (IST-Analyse) und das Planungsproblem

Burundi ist mit einer Fläche von 25.680km² eines der kleinsten Länder in Zentralafrika (eine Karte Afrikas ist in Anhang B.1 gegeben). Auf der anderen Seite ist die Einwohnerzahl mit 8.382.000 recht hoch, so dass auf einen km² 326,4 Einwohner kommen (Statistisches Bundesamt, 2013). Damit ist Burundi eines der Länder Afrikas mit der höchsten Bevölkerungsdichte. Mehr als 80% der Bevölkerung in Burundi leben unterhalb der Armutsgrenze (United Nations High Commissioner for Refugees, 2013). Die medizinische Versorgung ist mit 0,03 Ärzten auf 1000 Einwohner mangelhaft (World Health Organization, 2013a). Zudem können sich viele Menschen in Burundi den Besuch eines Gesundheitszentrums oder gar eines Arztes nicht leisten: Obwohl im Jahr 2002 in den meisten der 17 Provinzen ein staatliches Gesundheitssystem eingeführt

wurde, müssen einige Landarbeiter zwölf Tageslöhne erübrigen, um ein Gesundheitszentrum zu besuchen (Médecins Sans Frontières, 2004).

Ärzte ohne Grenzen (MSF) arbeitet seit 1992 in Burundi, um den Folgen eines lang anhaltenden Bürgerkriegs zu begegnen (Médecins Sans Frontières, 2011). Folgen solcher komplexer Krisen sind zumeist unter anderem eine zerstörte Infrastruktur sowie nicht mehr funktionierende Distributionsstrukturen, ein mangelhaftes Gesundheitssystem und ein hoher Armutsanteil in der Bevölkerung. Darüber hinaus sind viele Hilfsaktionen in Krisengebieten, die schon seit Jahren laufen, unterfinanziert, was die Situation vor Ort verschärft. In Burundi werden diese Faktoren noch durch wiederkehrende Dürren, gefolgt von starken Regenfällen, verstärkt. Die Erholung von komplexen Krisen zieht sich nicht selten über Jahre hinweg und verläuft in Zyklen, da oftmals neue akute Krisen auftreten (World Health Organization, 2005). Dies gilt auch für Burundi: Mit dem offiziellen Ende des Bürgerkrieges im Jahr 2006 konnten die Hilfsorganisationen langsam von Katastrophenbewältigungs- zu Wiederherstellungsmaßnahmen und zur Entwicklungshilfe übergehen (U.S. Global Health Initiative, 2011). Unruhen sorgten jedoch weiterhin für Probleme beim Aufbau einer funktionierenden Gesundheitsversorgung. So schreibt MSF in seinem Jahresbericht 2008: *„In April, two years after a peace deal was signed to end more than a decade of conflict in Burundi, rebels of the National Liberation Forces (FNL) launched an offensive against the capital, Bujumbura, prompting fears of a return to war. In June, the government and the rebels signed a ceasefire. However, the long years of war have weakened the country’s health system. Therefore, MSF teams constantly monitor potential health emergencies, such as epidemics or nutritional crises“* (Médecins Sans Frontières, 2009, S. 19).

Das Land erholt sich immer noch von dem jahrelangen Bürgerkrieg. Auch die Flüchtlingsbewegungen in Burundi halten an: In den letzten zehn Jahren sind rund 500.000 Flüchtlinge in das Land zurück gekehrt. Bis Ende 2015 werden weitere 28.000 zurückkehrende Flüchtlinge erwartet, die Unterstützung benötigen (Simons, 2014).

Aufgrund der langen Geschichte von MSF in Burundi existiert bereits eine lokale Distributionsstruktur, mit mehreren Gesundheitszentren und mobilen sowie fest installierten Krankenhäusern im Land, auf die MSF zurückgreifen kann. Zudem laufen diverse Projekte zur Unterstützung der Gesundheit der Bevölkerung, vor allem von Frauen und Kindern, sowie zur Ernährungssicherheit (Médecins Sans Frontières, 2001). Die Sterblichkeitsrate in Burundi ist, auch im Vergleich zu den umliegenden Ländern, sehr hoch. Nach Zahlen aus 2010 sterben von 1000 Kindern 142, bevor sie

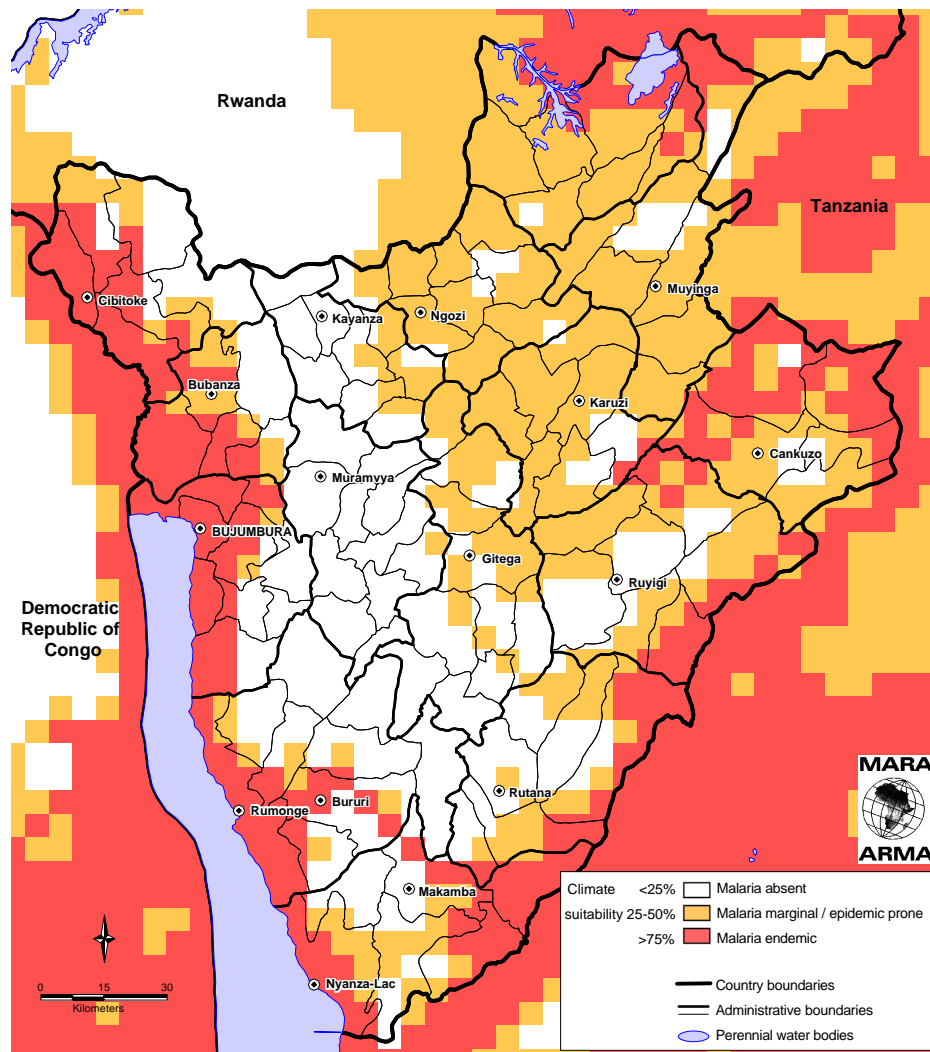


Abbildung 6.2.: Endemisches Auftreten von Malaria in Burundi, nach MARA/ARMA collaboration (2005)

das fünfte Lebensjahr erreichen. Die Lebenserwartung liegt bei 50 Jahren (World Health Organization, 2012). Eine der häufigsten Todesursachen in Burundi ist Malaria (Caritas International, 2012; Amadou u. a., 2010). Jährlich erkranken 2-3 Millionen Menschen in Burundi an Malaria. Die Krankheit ist in weiten Teilen des Landes endemisch, was zu einer relativ hohen Immunität der Bevölkerung führt. Die endemische Ausbreitung von Malaria ist auf der Karte in Abbildung 6.2 dargestellt. Es wird deutlich, dass in den Grenzgebieten ein endemisches Auftreten von Malaria vorherrscht. Dagegen ist die Krankheit in weiten Teilen des westlichen Landes fast absent. Im

Osten befinden sich dagegen große Epidemie-gefährdete Gebiete. Auf der einen Seite ist die Immunität der Bevölkerung nicht so umfassend, dass sich eine Epidemie nicht ausbreiten könnte und auf der anderen Seite ist die Moskito-Dichte so hoch, dass die Krankheit sich schnell ausbreiten kann. Kinder, die noch keine Immunität entwickeln konnten und zudem oftmals unterernährt sind, leiden sehr häufig unter Malaria; bei Kindern unter fünf Jahren ist Malaria die dritt-häufigste Todesursache (World Health Organization, 2010). Eine zeitnahe Behandlung von erkrankten Kindern ist dringend notwendig, denn bei ihnen kann die Krankheit innerhalb von 24 Stunden zum Tod führen (Médecins Sans Frontières, 2010a).

Aufgrund der endemischen Ausbreitung von Malaria, werden laufend Menschen mit ACT behandelt. Es befinden sich daher immer Bestände in den Lagern der Gesundheitszentren und Krankenhäuser (Amuasi u. a., 2011). Problematisch ist aber der schon angesprochene fehlende Zugang vieler Bevölkerungsschichten zur medizinischen Versorgung, mangels finanzieller Mittel. Zudem schlafen viele Einwohner mit ihrem Vieh unter einem Dach, um es zu schützen, was die Gefahr, an Malaria zu erkranken, erhöht (Protopopoff u. a., 2009). Aus diesem Grund sind die Todesfälle, die durch Malaria verursacht werden, trotz der guten Behandlungsmöglichkeit mit ACT kaum zurückgegangen (Médecins Sans Frontières, 2004). Obwohl große Bevölkerungsteile in Burundi aufgrund der endemischen Ausbreitung von Malaria immun gegen die Krankheit sind, kommt es in den Hochlagen von Burundis Norden regelmäßig zu Malaria-Epidemien. In diesen Gegenden ist die endemische Ausbreitung der Krankheit nicht so weit fortgeschritten und die Immunität der Bevölkerung dadurch geringer (World Health Organization, 2005).

Die Ausbrüche von Malaria-Epidemien erschweren die Bekämpfung der Krankheit und gefährden regelmäßig die Bevölkerung. Aufgrund der instabilen politischen Lage in Burundi funktioniert auch das Monitoring von Faktoren, die auf eine Malaria-Epidemie hinweisen, nicht einwandfrei. Zusammen mit der Tatsache, dass sich die Epidemien mit hohen Geschwindigkeiten ausbreiten, führt dies dazu, dass eine drohende Epidemie oftmals zu spät erkannt wird und damit auch die Hilfsorganisationen zu spät um Hilfe gebeten werden (Protopopoff u. a., 2007).

Genau dieser Situation stand MSF 2010 gegenüber, nachdem Ende 2009 starke Regenfälle zu günstigen Brutbedingungen für die Malaria übertragenden Moskitos im Norden von Burundi geführt hatten (Médecins Sans Frontières, 2010b). Schon im Dezember 2009 traten vermehrt Malariafälle auf. Als die Regierung MSF Anfang 2010 um

Tabelle 6.1.: Krankenhäuser und Gesundheitsstationen in Kayanza, Karuzi und Ngozi

Provinz	Bevölkerung	Krankenhäuser	Gesundheitsstationen
Kayanza	514.075	1	7
Ngozi	735.700	4	59
Karuzi	302.062	1	11

Unterstützung bei der Bekämpfung einer sich ausbreitenden Epidemie bat, war diese schon relativ weit fortgeschritten und die Bestände an ACT bei weitem nicht ausreichend. Zudem sorgte die späte Reaktion von MSF auf die Epidemie dafür, dass weitere Präventionsmaßnahmen nicht effektiv greifen konnten. Diese Situation wird im Folgenden analysiert. Es wird die Distribution von ACT zur Bekämpfung einer Malaria-Epidemie sowie zur anhaltenden Versorgung der endemisch betroffenen Bevölkerung betrachtet. Der Entscheidungsträger muss über die Positionierung und eventuelle Allokation von Medikamenten, sowie die Menge der nachzubestellenden Dosen ACT entscheiden. Dabei hat er nur ein begrenztes Budget zur Verfügung, da langfristige Hilfsaktionen nicht mehr im Fokus der Medien stehen und somit aus nicht projektgebundenen Mitteln der Hilfsorganisation finanziert werden müssen, die für zahlreiche Projekte genutzt werden (Médecins Sans Frontières, 2010c). Trotzdem handelt es sich bei dem vorliegenden Planungsproblem um eine Mittelplanung. Das Ziel ist durch die Problemstellung schon beschrieben: Es soll eine möglichst gute Distributionsstrategie für das ACT ermittelt werden. Die Mittel sind zwar begrenzt, aber variabel, da im Vorfeld nicht bestimmbar ist, wie viel Budget eingesetzt werden kann.

In dieser Arbeit werden fünf Regionen in den Provinzen Kayanza, Karuzi und Ngozi betrachtet; das sind die Provinzen in Burundis Norden, in denen die Epidemie 2010 ausgebrochen ist. Eine Übersichtskarte von Burundi und seinen Provinzen ist in Anhang B.2 gegeben. Jede der fünf Regionen wird über ein regionales Lager versorgt (die Positionierung der Lager ist in Abbildung 6.3 dargestellt). Die medizinische Versorgung der Bevölkerung durch MSF wird in diesen Regionen über Gesundheitszentren und über Krankenhäuser sichergestellt. Die Anzahlen der Gesundheitszentren und Krankenhäuser sind in Tabelle 6.1 gegeben². Darüber hinaus werden im Notfall

²Die Informationen zu Kayanza stammen von Ministère de la planification du développement et de la reconstruction nationale (2006, S. 4 und 59), die Informationen zu Ngozi stammen von Swiss Tropical and Public Health Institute (2006) und die Informationen zu Karuzi stammen aus Gomez-Elipe u. a. (2007).

mobile Kliniken eingerichtet (Médecins Sans Frontières, 2010c). Die Versorgung der Gesundheitszentren und mobilen Kliniken erfolgt über die regionalen Lager. Oft sind diese direkt an ein Gesundheitszentrum oder ein Krankenhaus angeschlossen.

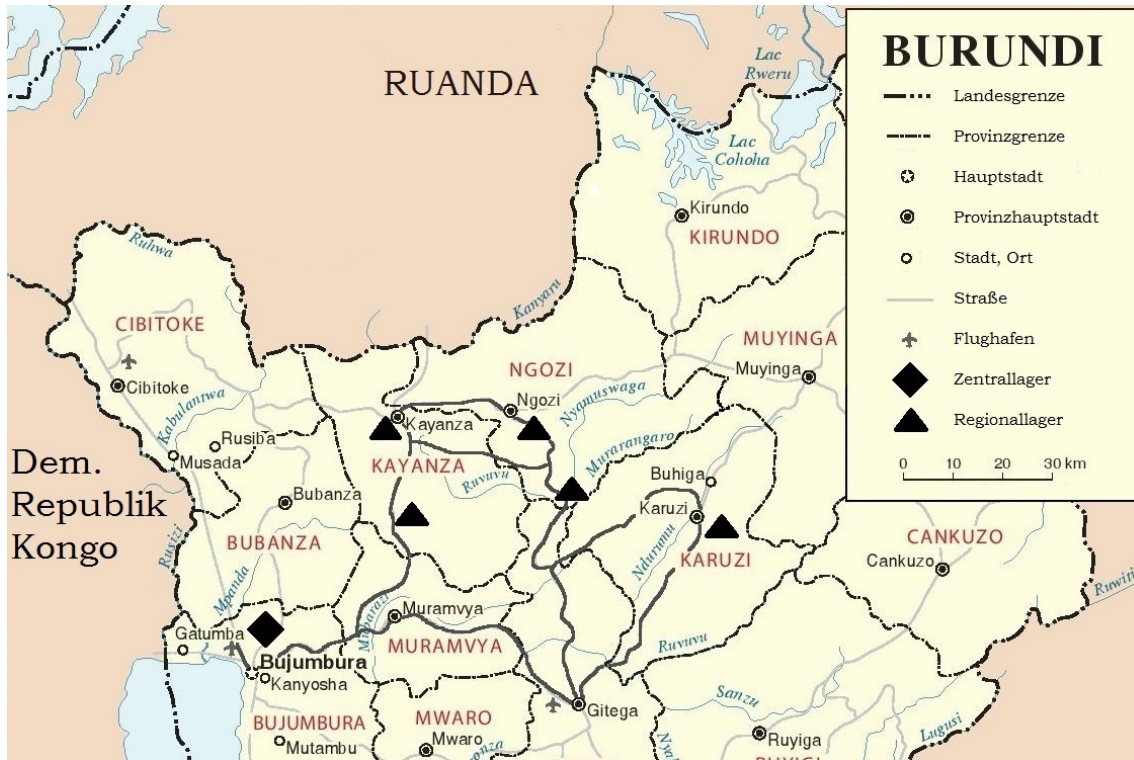


Abbildung 6.3.: Die drei betrachteten Provinzen im Norden Burundis und die Distributionsstruktur (Karte von United Nations (2011))

Die abschließende Verteilung der Medikamente an die betroffene Bevölkerung über die Gesundheitszentren und mobilen Kliniken wird hier nicht betrachtet. Die betrachtete Lieferkette endet in den regionalen Lagern. Nachbestellungen werden per Flugzeug zu einem zentralen Lager in Bujumbura geliefert und von dort aus an die Regionallager verteilt. Transporte zwischen den betrachteten Regionen sind ebenso möglich. Es werden folgende Annahmen getroffen: Der Transport zwischen den Regionallagern dauert einen Tag (aufgrund der schlechten Infrastruktur) und kostet eine Geldeinheit (GE) pro Einheit ACT und 200 GE pro eingesetztem Fahrzeug mit einer Kapazität von 2500 Einheiten ACT. Der Transport vom zentralen Lager in Bujumbura zu einem der Regionallager nimmt zwei Tage in Anspruch und kostet ebenfalls 200 GE pro eingesetztem Fahrzeug mit der gleichen Kapazität, sowie zwei GE pro transportierter

Tabelle 6.2.: Nachfragedaten und Startbestände in den Regionallagern (RL) und im Zentrallager (ZL)

Lager	Startbestand	sichere Nachfrage	unsichere Nachfrage
RL 1	0	19.100	0
RL 2	1000	100	1000
RL 3	800	80	3000
RL 4	1500	150	2000
RL 5	1000	100	1000
ZL	20.000	-	-

Einheit ACT. In den variablen Kosten sind neben den Transportkosten auch Handlingkosten enthalten. Eine Nachbestellung ist innerhalb von drei Tagen am Flughafen von Bujumbura und ist sehr kostenintensiv. Jede Einheit ACT, die nachbestellt und beschafft wird, kostet 16 GE und die fixen Kosten für die Organisation der Bestellung betragen 400 GE. Auch die lange Transportzeit begründet sich vor allem durch die organisatorischen Abläufe zur Abwicklung der Luftfracht und des Imports. Die Lagerhaltungskosten betragen sowohl in den regionalen Lagern als auch im Zentrallager 0,1 GE pro Einheit ACT. Die Lager haben bereits einen Bestand an ACT vorrätig, der zur Versorgung von laufend auftretenden Malaria-Infektionen benötigt wird. Durch das Eintreten der Epidemie übersteigt der Bedarf jedoch weit die vorhandenen Bestände. In den fünf Lagern sind Bestände an ACT für die nächsten zehn Tage bei regulärem Bedarf vorrätig. Das ist der Planungshorizont, der im Folgenden betrachtet wird, um die Unterbrechung der Hilfsaktion auszugleichen. Ein Tag entspricht dabei einer Periode im Modell. Je nach Größe der zu versorgenden Region und abhängig von den bereits benötigten Mengen an ACT, unterscheiden sich die Bestände in den Lagern. Die konkreten, hier angenommenen Ausprägungen sind in Tabelle 6.2 gegeben. In der Region um das Regionallager 1 ist bereits ein erhöhter Bedarf an ACT aufgetreten, denn hier ist die Epidemie ausgebrochen und das Lager ist dementsprechend leer. Die unsichere Nachfrage in den anderen Lagern repräsentiert das Risiko zukünftiger Epidemieausbreitungen. In der Region 1 ist die Epidemie bereits aufgetreten, so dass hier keine unsichere Nachfrage mehr betrachtet wird. Die in Tabelle 6.2 angegebene sichere Nachfrage tritt in den Regionen in jeder Periode auf und entspricht dem Bedarf

zur Fortführung der laufenden Hilfsaktion. Eine Ausnahme bildet das Regionallager 1: Der erhöhte Wert der Nachfrage gilt nur für die erste Periode. Aufgrund der Zeit, die vergangen ist, bis MSF auf die Epidemie reagieren konnte, ist dieser Wert sehr hoch. In zukünftigen Perioden sinkt dieser Wert wieder auf 1000 bzw. ab Periode 6 auf 2000, wenn die Epidemie ihren Höhepunkt erreicht. Diese Daten sind ebenso wie die unsicheren Nachfragewerte auf Basis vergangener Epidemien angenommen, zum Beispiel aus dem Jahr 2001 (Guthmann u. a., 2007). In Anhang C befindet sich eine vollständige Übersicht über die verwendeten Daten.

Im Folgenden wird auf Basis der vorgestellten IST-Situation und der getroffenen Annahmen, zur Vorbereitung der Szenariogenerierung, das Szenariofeld analysiert. Dafür werden Umfeld- von Gestaltungsfeldfaktoren differenziert und es wird untersucht, welche dieser Faktoren über den betrachteten Zeithorizont Änderungen unterworfen sind und welche nicht.

Szenariofeld-Analyse

Zur Analyse des Szenariofeldes werden die Faktoren, auf die der Entscheidungsträger Einfluss hat, in Abgrenzung zu denen, auf die er keinen Einfluss hat, untersucht. Einfluss genommen werden kann auf die Positionierung von Medikamenten sowie die Allokation dieser und die nachbestellten Mengen. Darüber hinaus gibt es Bereiche, auf die der Entscheider keinen Einfluss hat. Diese werden als Umfeldfaktoren in der Szenariofeld-Analyse betrachtet, da sie das Risiko einer Ausbreitung der Epidemie beeinflussen. Die große Bevölkerungsdichte in Burundi fördert zum Beispiel eine schnelle Ausbreitung von Malaria, ebenso wie die Regenfälle, die dem Ausbruch der Epidemie vorausgegangen sind. Die Umfeldfaktoren, die für die Ausbreitung von Malaria relevant sind, können nach Protopopoff u. a. (2009) in drei Klassen unterteilt werden: Die Umweltfaktoren, die biologischen Faktoren und die gesellschaftlichen Faktoren, wie in Abbildung 6.4 dargestellt. Zu den Umweltfaktoren gehören die Niederschlagsmenge, die Temperatur und die Höhenlage. Zu den biologischen Faktoren zählen die Altersstruktur in der Bevölkerung (viele junge Menschen, die noch keine Immunität entwickeln konnten, erhöhen das Risiko einer Epidemie), die Immunität in der Bevölkerung, der Moskitobestand, die vorhandenen Brutstätten für die Moskitos, die Resistenz der Bevölkerung gegen die angewendeten Medikamente, die Resistenz der Moskitos gegen Bekämpfungsmittel sowie die Langlebigkeit der Moskitos und der Ge-

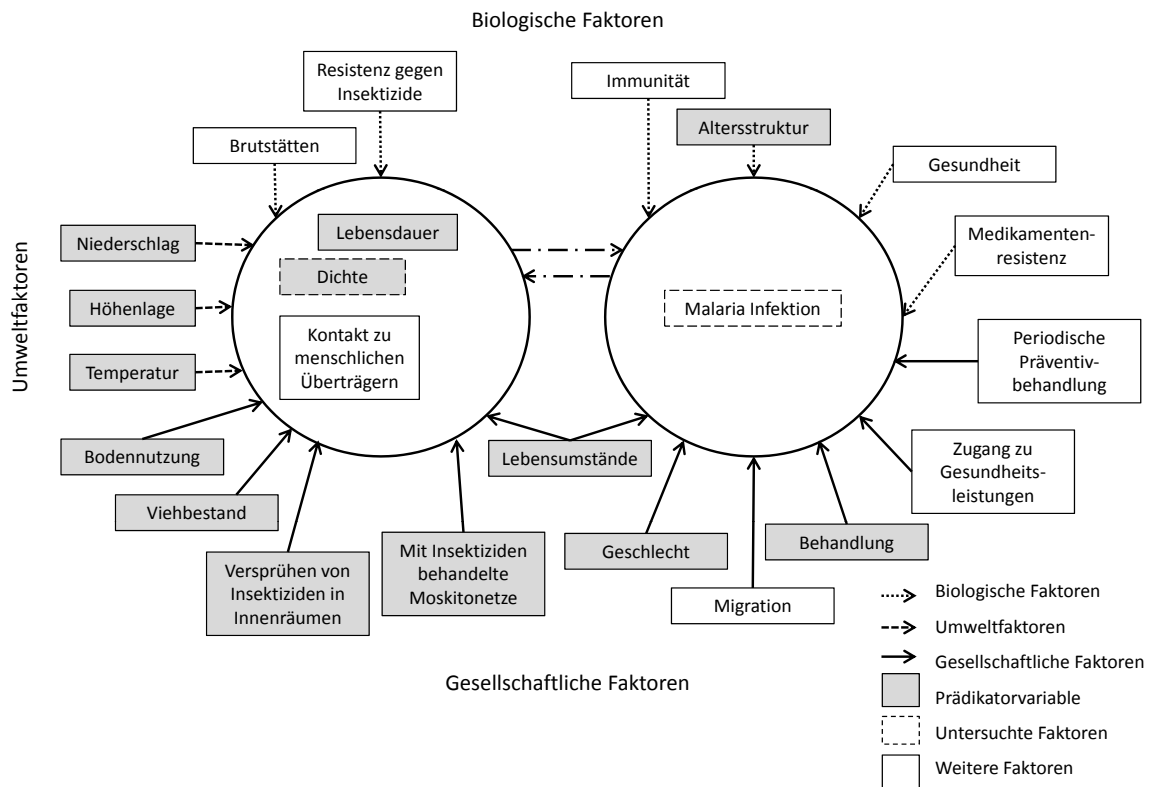


Abbildung 6.4.: Klassifikation der Einflussfaktoren auf die Entstehung einer Malaria-Epidemie (Protopopoff u. a., 2009)

sundheitszustand der Bevölkerung. Die Resistenzen und die Immunität werden wiederum durch das endemische Auftreten der Krankheit beeinflusst. Gesellschaftliche Faktoren sind unter anderem die Distanz zwischen Wohnhäusern und Brutstätten der Moskitos, Viehhaltung im Haus, Unterernährung, mobile Bevölkerung (z.B. aufgrund von Flüchtlingsbewegungen), die Bevölkerungsdichte, die Nutzung von imprägnierten Moskitonetzen, die medizinische Versorgung sowie eine Landnutzung, die das Vorhandensein von Brutstätten für die Moskitos beeinflusst. Diese Faktoren haben Einfluss auf die Infektion der Bevölkerung mit Malaria und auf den Kontakt der Moskitos mit menschlichen Überträgern. Der Kontakt der Moskitos mit menschlichen Überträgern beeinflusst wiederum die Dichte der übertragenden Moskitos positiv. Diese Faktoren werden zum Großteil auch von Checchi u. a. (2006) aufgeführt. Faktoren, die von Protopopoff u. a. (2009) als besonders einflussreich identifiziert wurden, werden als Prädiktorvariable bezeichnet.

Die Umfeldfaktoren können weiterhin anhand ihrer Prognostizierbarkeit nach Faktoren unterschieden werden, die sich im betrachteten Planungshorizont mit hoher Wahrscheinlichkeit ändern und nach Faktoren, die vermutlich keinen Änderungen unterworfen sind (Garvin und Levesque, 2006). Die meisten der Einflussfaktoren bleiben während des betrachteten Planungshorizontes konstant, lediglich die Temperatur und die Niederschlagsmenge sind während des kurzen Planungshorizontes Schwankungen unterworfen. Die Umfeldfaktoren beeinflussen dennoch das Risiko einer Malaria-Epidemie und ihrer Ausbreitung. Ein sorgfältiges Monitoring dieser Faktoren führt somit zu einer guten Einschätzung des Risikos einer weiteren Ausbreitung der Epidemie und kann dadurch dafür sorgen, dass ein proaktives anstelle eines reaktiven Handelns möglich wird.

Die Einflussfaktoren haben verschiedene Wechselwirkungen untereinander. So haben Menschen, die einen geringen sozialen Status haben, oft auch weniger Verdienstmöglichkeiten und dadurch eine schlechte medizinische Versorgung, leiden oft an Unterernährung und leben evtl. auch mit ihrem Vieh im Haus. Auch die Immunität der Bevölkerung gegen Malaria hängt von anderen Umfeldfaktoren, wie der Altersstruktur und endemischen Ausbreitung der Krankheit ab. Wird der Moskitobestand in einer Region betrachtet, hängt dieser mit der Landnutzung, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit zusammen. Moskitos breiten sich schnell in Feuchtgebieten aus, bei warmen Temperaturen und vermehrt in Regionen, in denen zum Beispiel Reisanbau betrieben wird, da dieser sehr stark bewässert wird (Checchi u. a., 2006).

Nach der Hierarchie von Protopopoff u. a. (2009) werden folgende Schlüsselfaktoren (in der Wichtigkeit absteigender Reihenfolge) für die Ausbreitung von Malaria identifiziert:

M.1 Mückendichte (Anzahl der Mücken pro Haus)

M.2 Lebensumstände der Bevölkerung

M.3 Altersstruktur der Bevölkerung

M.4 Vergangene Malaria-Behandlungen

M.5 Dichte von infizierten Mücken

M.6 Vieh im Haus

Die Dichte der Mücken, hängt wiederum von folgenden Faktoren ab:

- D.1 Regen im vergangenen Monat
- D.2 Malaria-Bekämpfung im Haus
- D.3 Mindesttemperatur im vergangenen Monat
- D.4 Mindesttemperatur im vorvergangenen Monat
- D.5 Distanz zwischen Brutstätten und Wohnhäusern
- D.6 Höhenlage der Häuser
- D.7 Regen im vorvergangenen Monat

Die Ausprägung der Schlüsselfaktoren beeinflusst besonders stark das Risiko einer weiteren Ausbreitung der Malaria-Epidemie oder die Entstehung einer solchen. Neben der Einschätzung in Bezug auf die Ausbreitung der Malaria-Epidemie, sind bei der Bestimmung von Distributionsplänen auch logistische Faktoren zu berücksichtigen. Abbildung 6.5 zeigt eine Übersicht der Distributionsfaktoren, die zu den Umfeldfaktoren

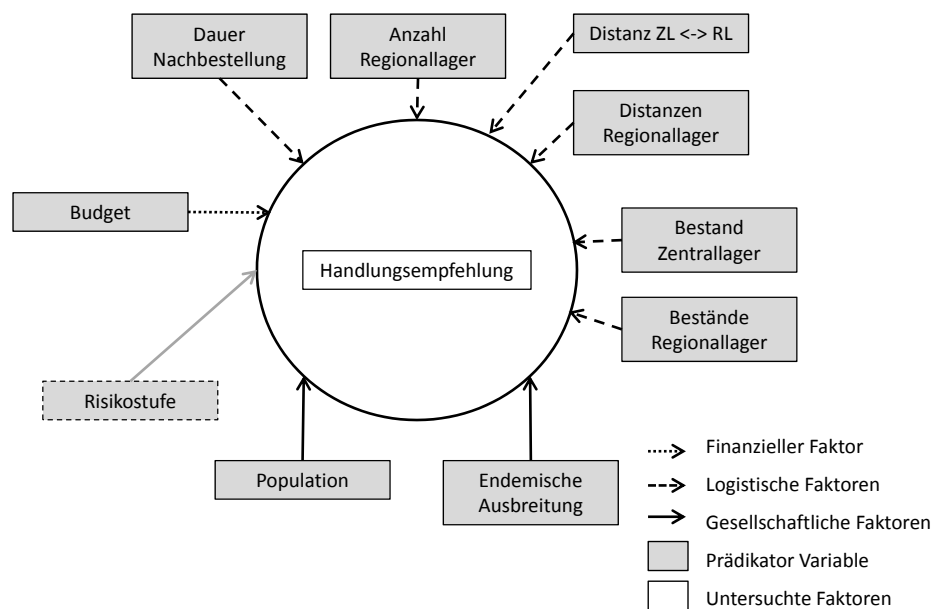


Abbildung 6.5.: Potentielle Einflussfaktoren auf die Handlungsempfehlung zur Reaktion auf eine Malaria-Epidemie

ren gehören: Neben den Beständen in den Lagern zu Beginn des Planungshorizontes sind das die Dauer, bis eine Nachbestellung eintrifft, die Distanzen zwischen den einzelnen Lagern, die Anzahl der Regionallager, das verfügbare Budget, die Größe der betroffenen Bevölkerung sowie die endemische Ausbreitung der Krankheit. Die Relevanz dieser Faktoren in Bezug auf die Distributionsplanung wird im Zuge dieser Arbeit analysiert. Dafür werden die in diesem Kapitel gebildeten Szenarien mit dem Modell *mHumLog* gelöst und die Ergebnisse werden in Abschnitt 7.6 diskutiert. Durch die Lösung der Szenarien unter verschiedenen Ausgangssituationen wird untersucht, welche Faktoren tatsächlich einen Einfluss auf die Entscheidungsfindung haben. Diese werden als Schlüsselfaktoren in Bezug auf die Distribution definiert. Auch das Ergebnis des Monitorings über Moskito-Dichte und Malaria-Infektion geht als Risikostufe in die Untersuchung mit ein und beeinflusst somit die Handlungsempfehlung an den Entscheidungsträger. Die Risikostufe gibt dabei an, wie hoch die Gefahr einer weiteren Epidemieausbreitung eingeschätzt wird. Da es sich bei der Risikostufe nicht um einen Distributionsfaktor handelt, ist die Einflussnahme auf die Handlungsempfehlung in der Abbildung 6.5 grau dargestellt. Die Menge an ACT, die nachbestellt wird, hängt schließlich von dem Risiko für weitere Epidemieausbreitungen ab. Die Distributionsfaktoren sind in der Regel konstant in dem betrachteten Zeitraum und gehören aus diesem Grund zur Beschreibung der IST-Situation. Die Faktoren Population und endemische Ausbreitung beeinflussen die benötigte Anzahl an Hilfsgütern und haben somit ebenfalls Einfluss auf die Distributionsentscheidungen. Die Handlungsalternativen, die mithilfe der Szenarien ermittelt werden sollen, werden über die Faktoren des Gestaltungsfeldes definiert, also über die Faktoren, die vom Entscheidungsträger beeinflusst werden können. Zu diesen Faktoren zählen die nachbestellte Menge und die Allokation der Hilfsgüter zwischen den Regionallagern und dem Zentrallager.

Szenario-Prognostik

In der Szenario-Prognostik werden die Schlüsselfaktoren aufbereitet. Dazu werden Merkmale identifiziert, die Einfluss auf die Schlüsselfaktoren haben. Die Schlüsselfaktoren für die Ausbreitung einer Malaria-Epidemie (Faktoren M.1 - M.6) bestehen aus einer Teilmenge der Faktoren, die die Dichte der Moskitos beeinflussen, und aus Faktoren, die für die Infektionsrate verantwortlich sind. Dabei wurden die Einflussfaktoren auf den Faktor M.1 bereits von Protopopoff u. a. (2009) untersucht: Das

Ergebnis sind die Einflussfaktoren D.1 - D.7. Schlüsselfaktoren M.2, M.3 und M.6 werden nicht näher betrachtet, da sich die zugehörigen Merkmale, wie BIP und sozialer Status, in der Kürze des betrachteten Zeitraums nicht ändern. Ebenso wenig wird sich die Geburtenrate oder die Lebenserwartung ändern (als Indikatoren für die Altersstruktur der Bevölkerung). Aus diesem Grund werden diese Faktoren zwar in der Gestaltungsfeldanalyse erfasst, nicht aber zur Generierung spezifischer Szenarien verwendet. Faktor M.4 (Vergangene Malaria-Behandlungen) hängt vom Zugang zur medizinischen Versorgung, von der Ausstattung der Gesundheitszentren mit ACT und von der endemischen Ausbreitung von Malaria ab. Die Dichte der infizierten Moskitos (M.5) hängt vor allem von der Langlebigkeit dieser sowie vom Menschenkontakt der Moskitos (also der Distanz zwischen Lebensraum und Wohnstätten) ab, aber auch von der Temperatur. Diese beeinflusst die Häufigkeit, mit der die Moskitos Nahrung aufnehmen (Protopopoff u. a., 2009).

Anhand der Schlüsselfaktoren und ihrer Merkmale werden nun Zukunftsprojektionen gebildet. Diese orientieren sich an den möglichen Entwicklungsrichtungen der Schlüsselfaktoren, also an den Ausprägungen der Merkmale. Zur einfachen Klassifizierung der Situation werden nach Protopopoff u. a. (2009) jeweils zwei mögliche Ausprägungen betrachtet. Dafür werden die Ausprägungen der Merkmale klassifiziert. So wird zum Beispiel zwischen einer durchschnittlichen Moskitoanzahl von mehr als 1,5 pro Haus und weniger unterschieden. Die Beschaffenheit der Häuser wird mit Bewertungen belegt. Die Bewertung erfolgt aufgrund der Bausubstanz (Lehm, Holz oder Stein), der Beschaffenheit des Dachs (Ziegel, Blech) und des Vorhandenseins einer separaten Küche. Auch die Altersstruktur wird in zwei Klassen unterteilt (≤ 38 Jahre und > 38) (Protopopoff u. a., 2009).

Nach Protopopoff u. a. (2009) werden anhand der Ausprägungen der Schlüsselfaktoren zwei Risikostufen zur Ausbreitung der Malaria-Epidemie unterschieden: Eine hohe und eine geringe Risikostufe. Diese werden auch in dieser Arbeit genutzt, um Zukunftsprojektionen zu bilden. Eintrittswahrscheinlichkeiten sind für die Projektionen nicht bestimmbar. Das ist aber auch nicht notwendig, da das übergeordnete Ziel dieser Arbeit die Analyse der Distributionsfaktoren ist, die unabhängig von den Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien sind. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass eines der konkreten Szenarien tatsächlich eintritt. Aus diesem Grund wird eine große Anzahl an Szenarien gelöst, um anhand der Ergebnisse den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Distributionsentscheidung zu untersuchen.

Tabelle 6.3.: Beispiel für Haupt- und Einzelszenarien

Szenario	Hauptszenario	Ausprägung
Szenario 1.1	Geringes Risiko	RL 2, Per 2
Szenario 1.2	Geringes Risiko	RL 3, Per 4
Szenario 2.1	Geringes Risiko	RL 2, 3, Per 2, 2
Szenario 2.2	Geringes Risiko	RL 2, 4, Per 2, 4
Szenario 3.1	Hohes Risiko	RL 2, 3, 4, Per 2, 3, 6
Szenario 4.1	Hohes Risiko	alle RL, Per 6, 5, 8, 2

Szenario-Bildung

Anhand der in der Szenario-Prognostik definierten Zukunftsprojektionen, werden jetzt Szenarien generiert. Dabei werden zwei verschiedene Entwicklungsrichtungen unterschieden: Zum einen werden Szenarien für ein geringes Risiko gebildet, bei denen keine, eine oder zwei Epidemieausbreitungen in verschiedenen Regionen auftreten. Zum anderen werden Projektionen für ein hohes Risiko generiert, bei denen die Epidemie sich in drei oder vier weitere Regionen ausbreitet. Es werden also zwei zu betrachtende Hauptszenarien definiert, bestehend aus dem IST-Zustand (der für alle Szenarien identisch ist) und der Risikostufe (die Hauptszenarien unterscheiden sich darin, ob sie ein hohes oder ein geringes Risiko einer weiteren Epidemieausbreitung aufweisen). Auch die Distributionsentscheidung hat Einfluss auf die Entwicklung der Situation, da die Reaktionsfähigkeit auf weitere Unterbrechungen von der am Anfang des Planungshorizontes nachbestellten Menge ACT abhängt. Für die Hauptszenarien werden dann insgesamt 58 Einzelszenarien definiert (über konkrete Ausprägungen der Ausbreitung der Epidemie in den unterschiedlichen Regionen). Die große Anzahl an Einzelszenarien stellt sicher, dass die gesamte Spannbreite an möglichen Entwicklungen abgedeckt ist. In Tabelle 6.3 ist exemplarisch ein Ausschnitt der generierten Szenarien dargestellt. Wenn die Epidemie sich in eine der Regionen ausbreitet, tritt in dieser Region die entsprechende unsichere Nachfrage auf, bzw. die sichere Nachfrage wird um den Wert der unsicheren Nachfrage erhöht. Die Nachfragewerte sind in Tabelle 6.2 gegeben. Szenario 1.1 ist zum Beispiel ein Szenario mit einer geringen Risikostufe, bei dem die Epidemie sich in Periode 2 in der Region 2 ausbreitet. Szenario 3.1 hat eine hohe Risikostufe und es treten drei Epidemieausbrüche auf, in Region 2, 3 und 4, in den Perioden 2,

3 und 6. Die Gesamtheit der Einzelszenarien ist in Anhang C.2 dargestellt. Aufgrund der vorangegangenen Analyse der IST-Situation und der Evaluation der Schlüsselfaktoren und ihrer Abhängigkeiten untereinander sind die Konsistenz und die Kohärenz der Szenarien sichergestellt. Die Gliederung in zwei unterschiedliche Hauptszenarien unterstützt die realistische Einschätzung der Situation und bewahrt den Entscheider davor, einzelnen Szenarien zu viel Gewicht zukommen zu lassen. In der Auswertung der Ergebnisse können die Einzelszenarien, die zu einem Hauptszenario gehören, zusammen analysiert werden und somit viele verschiedene mögliche Entwicklungen aggregiert betrachtet werden.

Zur Analyse der Distributionsfaktoren und ihrer Relevanz bezüglich der Allokationsentscheidungen, werden im weiteren Verlauf der Arbeit verschiedene IST-Situationen betrachtet. In diesem Kapitel wurde die Grundkonfiguration vorgestellt, also eine IST-Situation, die zu zwei verschiedenen Hauptszenarien und entsprechenden Einzelszenarien führt. Im Abschnitt 7.6 werden darüber hinaus Szenarien mit geänderten Distributionsstrukturen gelöst, um die potentiellen Einflussfaktoren auf ihre Relevanz zu prüfen. Diese unterscheiden sich in der Anzahl der Regionallager sowie in der Entfernung zwischen den Regionallagern und zum Zentrallager. Auch die Startbestände in den Lagern sowie die Nachfragedaten werden variiert.

Szenario-Transfer

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse der Szenariogenerierung anwendbar gemacht. Die Szenarien, die im Zuge dieser Arbeit generiert wurden, werden dafür mittels des Transshipment-Modells aus Kapitel 4.1 gelöst und die Ergebnisse bezüglich der Distributionsentscheidungen ausgewertet. Es wird analysiert, welche Merkmale relevant sind in Bezug auf die Entscheidungsfindung und welche nicht näher betrachtet werden müssen. Dadurch wird dem Entscheidungsträger eine vereinfachte Entscheidungsfindung in der akuten Situation ermöglicht.

Mithilfe der in Kapitel 5 eingeführten Szenariotechnik konnten in diesem Kapitel strukturiert Szenarien zur Untersuchung der Distributionsfaktoren mit dem Modell *mHumLog* erstellt werden. Im Gegensatz zu vielen Studien in der humanitären Logistik, wird in dieser Arbeit ein Fokus auf eine detaillierte und transparente Entwicklung der Szenarien gelegt. Die Szenarien sind anhand von zwei Hauptszenarien definiert worden, eines mit einem hohen und eines mit einem niedrigen Risiko für weitere Epi-

demieausbreitungen. Die 58 Einzelszenarien werden im folgenden Kapitel mit dem Modell *mHumLog* gelöst und anschließend werden die Einflussfaktoren nochmals analysiert, um Schlüsselfaktoren zu ermitteln.

7. Lösungen der Szenarien mit dem Modell *mHumLog*

Die 58 in Kapitel 6.4 erstellten Szenarien werden mit dem Modell *mHumLog* sowohl mit der Methode der gewichteten Summe als auch mit der *Constraint* Methode gelöst. Die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt und einem Referenzmodell, welches keine Unsicherheiten in der Nachfrage berücksichtigt, gegenübergestellt. Das Referenzmodell stellt dabei eine Untergrenze der operationalen Kosten dar sowie eine obere Grenze der unbefriedigten Nachfrage. Es dient also der Wiedergabe der Situation unter der Annahme, dass zukünftige Risiken nicht berücksichtigt werden und ein simpler „*wait-and-see*“-Ansatz verfolgt wird. Zusätzlich werden die Szenarien mit einem Modell gelöst, welches keine Unsicherheiten berücksichtigt und darüber hinaus perfekte Informationen über die Entwicklung in den zukünftigen Perioden voraussetzt. Dieses Modell wird „perfekte Information“ genannt. Die Ergebnisse, die mit diesem Modell erzeugt werden, dienen ebenfalls zur Einordnung der mit den beiden in Kapitel 4 vorgestellten Lösungsmethoden bestimmten Lösungen.

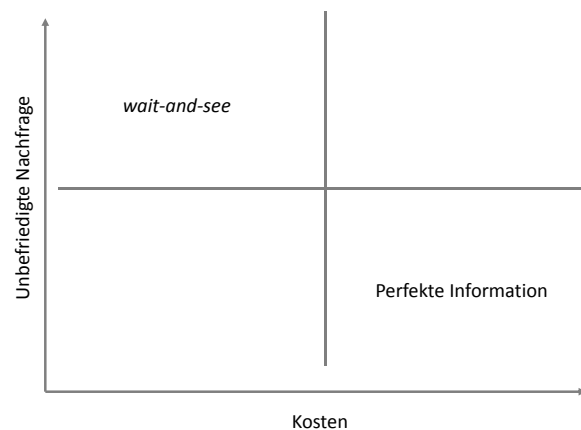


Abbildung 7.1.: Einordnung der beiden Referenzmethoden

Die beiden Referenzmethoden sind in Abbildung 7.1 in Bezug auf die resultierende unbefriedigte Nachfrage und die Kosten qualitativ eingeordnet. Auch die mit den hier entwickelten Methoden erzielten Ergebnisse können in der Grafik eingeordnet werden. In der Regel werden die Ergebnisse höhere Kosten aufweisen, als die Ergebnisse mit

der *wait-and-see* Methode, jedoch maximal so hohe wie die Ergebnisse unter perfekter Informationen. Auf der anderen Seite wird die unbefriedigte Nachfrage höher sein, als unter perfekten Informationen erreicht werden kann, aber geringer als mit der *wait-and-see* Methode. Vor der detaillierten Ergebnisdiskussion werden kurz Spezifika in der Umsetzung der beiden Lösungsmethoden in Bezug auf verwendeter Hard- und Software erläutert und die Laufzeiten werden evaluiert und verglichen.

7.1. Technische Umsetzung der Lösungsmethoden

Die Methode der gewichteten Summe und das mathematische Modell *mHumLog* wurden mit C# in Microsoft Visual Studio 2008 umgesetzt. Zur Lösung des Modells wurde IBM ILOG Cplex 12.1 genutzt. Die Optimierungssoftware wurde über die Callable Library eingebunden und innerhalb des Programms wiederholt aufgerufen, um die rollierende Lösung des Modells zu gewährleisten. Der Computer, auf dem die Szenarien gelöst wurden, hat eine 64-Bit Architektur sowie 2 Prozessoren mit 2,27 GHz und insgesamt acht Prozessorkernen. Der Computer verfügt über 24 GB Arbeitsspeicher, die während der Optimierungsläufe komplett zur Verfügung standen.

Die *Constraint* Methode wurde im IBM ILOG Cplex Optimization Studio 12.2 umgesetzt. Dieses Programm verfügt über eine eigene mathematische Programmiersprache (die *Optimization Programming Language* (OPL)) und über eine Skriptsprache (OPL Script), mit der sowohl die rollierende Planung als auch die Lösungsauswahl umgesetzt werden konnten. Die Lösung der Szenarien wurde auf einem Computer mit einer 64-Bit Architektur und 2 Prozessoren mit 3,1 GHz und jeweils 16 Prozessorkernen durchgeführt. Insgesamt hat der Computer 128 GB Arbeitsspeicher, die allerdings nicht immer voll verfügbar waren, da parallel weitere Rechnungen auf dem Testrechner liefen. Dem Optimierungsprogramm wurden 100 GB Arbeitsspeicher zugeteilt.

Die Lösungen mit der Methode der gewichteten Summe nahmen deutlich weniger Zeit in Anspruch, als die mit der *Constraint* Methode. Beide Methoden wiesen jedoch deutliche Variationen in den Lösungszeiten auf, die von den Parameterbelegungen abhängig waren. Die Lösungen der Szenarien mit der gewichteten Summe dauerten zwischen wenigen Sekunden und 30 Minuten, wohingegen die Lösung der Szenarien mit der *Constraint* Methode bis zu 30 Stunden in Anspruch nehmen konnte. Einige Szenarien konnten mit der *Constraint* Methode aufgrund von Arbeitsspeichermangel überhaupt nicht gelöst werden. Aus diesem Grund wurde für die Lösung dieser Szenarien

rien ein relativer Zielfunktions-Gap eingeführt (Linderoth und Ralphs, 2006). Dieser sorgt dafür, dass Lösungen, die nicht mindestens um diesen Prozentsatz besser als die bereits gefundene ganzzahlige Lösung sind, nicht weiter betrachtet werden. Somit kann die gefundene Lösung um eben diesen Prozentsatz vom Optimum abweichen. Aufgrund der Zielsetzung, eine Entscheidungsunterstützung durch die Lösung von zahlreichen Szenarien zu schaffen, wurde die Einführung eines Zielfunktionsgaps als vertretbare Maßnahme zur Lösungsfindung herangezogen. Aufgrund der Unsicherheiten in den Daten bei Lösung des Modells ist eine exakte Lösung ohnehin nicht ermittelbar. Trotz der Einführung des Zielfunktions-Gaps nahm die Lösung der Szenarien zwischen 30 Minuten und zehn Stunden in Anspruch. Das hängt damit zusammen, dass das Modell für jede Stufe in der rollierenden Planung einmal für jeden Grid Point (bis zum Abbruchkriterium) gelöst werden muss. Die Anzahl der *Grid Points* lag bei der Lösung der Szenarien bei 10. Für jede Lösung des Modells in der rollierenden Planung wurde das Modell also mit bis zu 10 verschiedenen *Grid Points* gelöst. Wurde das in Abschnitt 4.4.3 definierte Abbruchkriterium vorher erreicht, war die Anzahl der *Grid Points*, für die das Modell gelöst wurde, entsprechend geringer.

7.2. Methode der gewichteten Summe

Die Methode der gewichteten Summe erfordert eine ausführliche Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der zu verwendenden Gewichtungsfaktoren (eine detaillierte Erläuterung der Methode ist in Abschnitt 4.4 gegeben). Diese Analyse muss nach jeder Parameteränderung erneut durchgeführt werden, da auch vermeintlich kleine Änderungen in den Daten bedeutende Auswirkungen auf die Qualität der Lösungen haben können. Die Strafkosten für die sichere Nachfrage werden im Vergleich zu den operationalen Kosten auf sehr hohe Werte gesetzt, um eine deutliche Priorisierung der Versorgung der Bevölkerung zu realisieren (siehe auch Abschnitt 4.4.1). Die operationalen Kosten sind im Zuge der Szenariogenerierung bereits erläutert worden. Die Strafkosten für die unbefriedigte unsichere Nachfrage werden dagegen im Zuge der durchzuführenden Sensitivitätsanalyse variiert, um geeignete Werte zu bestimmen. Sie werden dabei zwischen den Werten 0,5 GE und 4 GE pro nicht befriedigter Nachfrageeinheit ACT variiert. Diese Kosten fallen jeweils für unsichere Nachfrage an, die erst in der aktuellen Periode aufgetreten ist und unbefriedigt bleibt. Für Nachfrage, die über einen

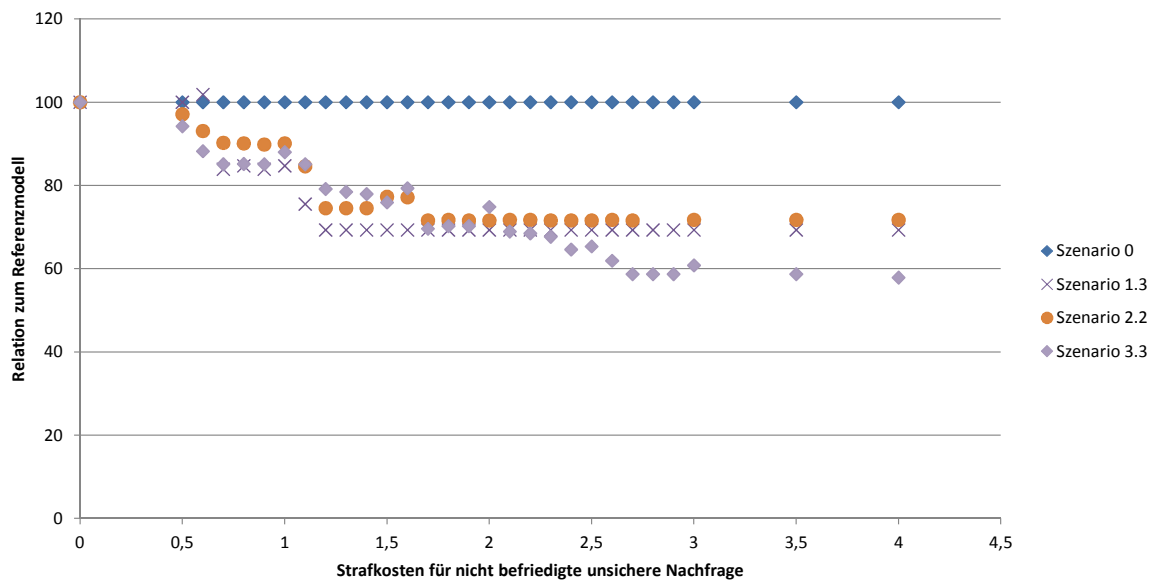


Abbildung 7.2.: Unbefriedigte Nachfrage in Relation zum Referenzmodell (100 entspricht dem Referenzmodell)

längeren Zeitraum unbefriedigt bleibt, werden die Strafkosten um 0,5 GE je Periode, in der die Nachfrage unbefriedigt bleibt, erhöht.

Abbildung 7.2 zeigt den Verlauf der unbefriedigten Nachfrage für vier ausgewählte Szenarien und 29 Strafkostensätze jeweils in Relation zum Referenzmodell. In Abbildung 7.3 sind die entsprechenden operationalen Kosten für die verschiedenen Strafkostensätze dargestellt. Es wird deutlich, dass die Berücksichtigung von Unsicherheiten nur dann zu einer Verringerung der unbefriedigten Nachfrage führt, wenn es zu einer weiteren Ausbreitung der Epidemie kommt. In Szenario 0, in dem keine weiteren Epidemie-Ausbreitungen eintreten, haben die Strafkosten für unbefriedigte unsichere Nachfrage keine Auswirkung auf die tatsächlich unbefriedigte Nachfrage. Die Kosten erhöhen sich für dieses Szenario hingegen deutlich mit steigenden Strafkosten. Die für die Befriedigung der unsicheren Nachfrage nachbestellten Bestände liegen im Lager und erzeugen dort sowie in der Beschaffung Kosten, werden aber nicht benötigt. Eine ähnliche Entwicklung ist für das Szenario mit nur einer geringen Ausbreitung der Epidemie zu beobachten (Szenario 1.3). Hier kann die unbefriedigte Nachfrage zwar bis zu einem bestimmten Punkt verringert werden. Die Kosten steigen dafür deutlich an, wenn die Strafkosten zu hoch angesetzt werden. Für eine geringe Risikostufe empfehlen sich also bei der vorliegenden Ausgangssituation Strafkosten, die den Wert

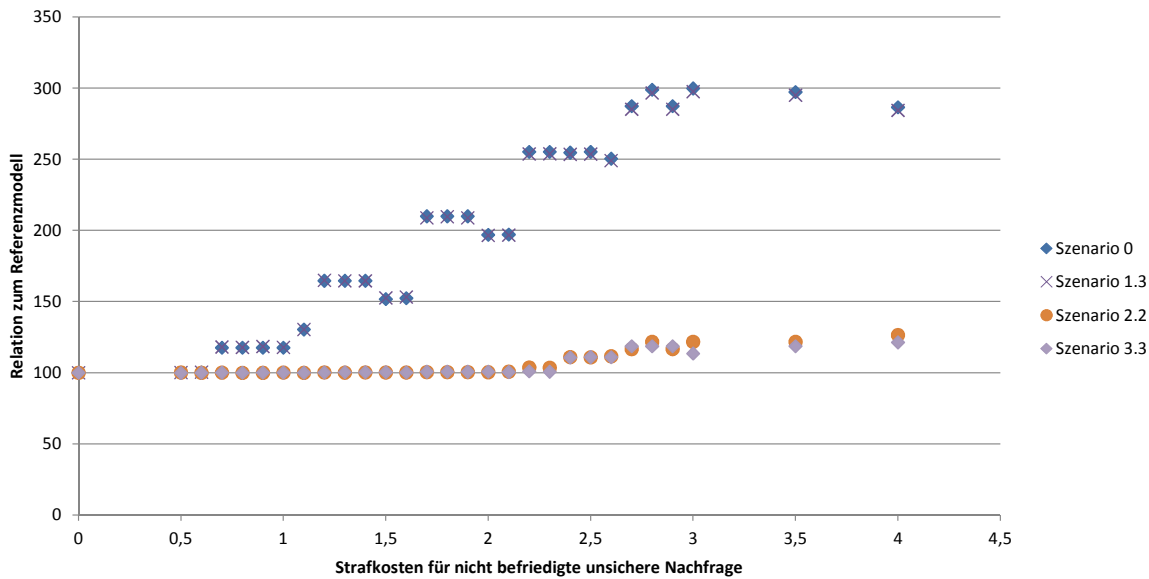


Abbildung 7.3.: Operationale Kosten in Relation zum Referenzmodell (100 entspricht dem Referenzmodell)

1,5 nicht überschreiten. Bei Szenario 1.3 verringert sich die unbefriedigte Nachfrage schon ab einem Strafkostensatz von 1,2 nicht weiter. Andere Szenarien mit einer geringen Risikostufe zeigen hier aber noch Verbesserungen. Die Ergebnisse der Szenarien 2.2 und 3.3 verbessern sich dagegen mit weiter steigenden Strafkosten. Szenario 2.2 erreicht die minimal mögliche unbefriedigte Nachfrage bei einem Strafkostensatz von 1,7 und bei Szenario 3.3 verringern sich die Werte weiter bis zu Strafkosten von 4,0. Die Senkung der unbefriedigten Nachfrage ist jedoch ab einem Wert von 2,5 nur noch marginal. Die operationalen Kosten verhalten sich sehr ähnlich für diese beiden Szenarien. Sie steigen im Vergleich zum Referenzmodell erst bei einem Strafkostensatz von 2,4 an und auch dann nur gering bis zu einem Strafkostensatz von 4,0. Die Anwendung eines Strafkostensatzes von 2,5 verspricht gute Ergebnisse für die Szenarien mit einer hohen Risikostufe, da die unbefriedigte Nachfrage bei weiterer Erhöhung der Strafkosten nur noch geringfügig sinkt und die Kosten nur wenig höher sind als bei Lösung der Szenarien mit dem Referenzmodell. Aufgrund der geringen Veränderungen ab dem Strafkostensatz von 3,0 wurde die Sensitivitätsanalyse ab diesem Wert in 0,5er - Schritten durchgeführt.

Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es, einen geeigneten Strafkostensatz zum Lösen aller Szenarien zu bestimmen. In diesem Fall werden drei verschiedene Strafkostensätze

gewählt, da, wie oben festgestellt, je nach Risikostufe andere Strafkosten zu guten Ergebnissen führen. Neben dem Referenzmodell werden die Szenarien mit Strafkosten von 1,0; 1,5 und 2,5 gelöst. Im Folgenden werden die Ergebnisse für ausgewählte Szenarien exemplarisch dargestellt, die Ergebnisse aller Szenarien befinden sich im Anhang D.3.

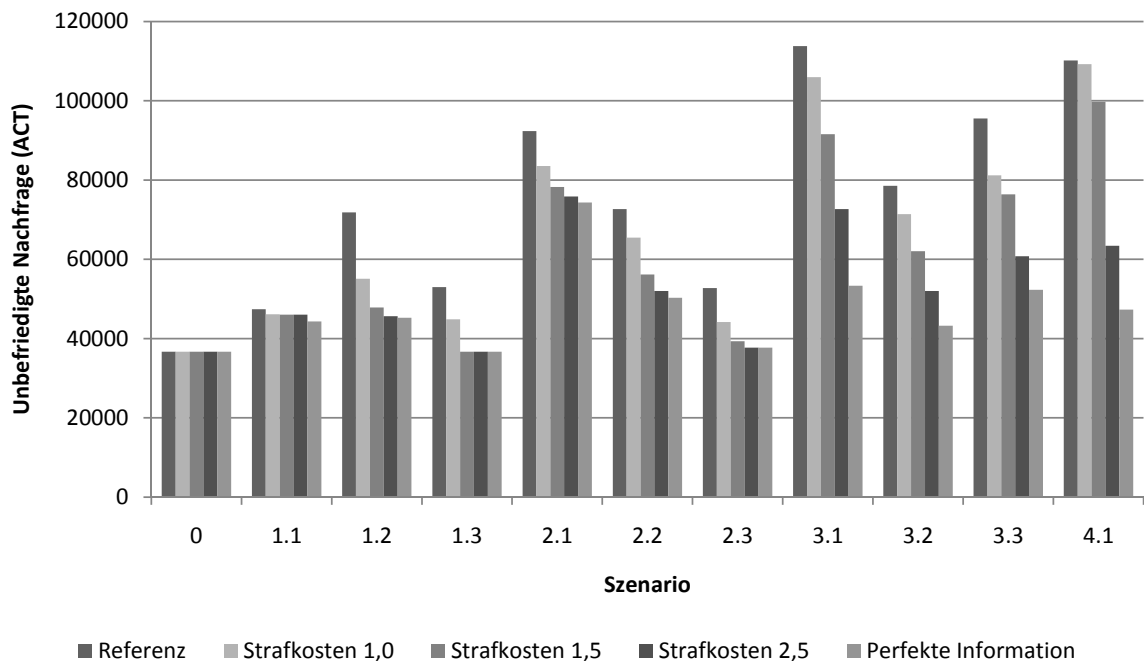


Abbildung 7.4.: Unbefriedigte Nachfrage für verschiedene Szenarien und ausgewählte Strafkostensätze

In Abbildung 7.4 ist die unbefriedigte sichere Nachfrage für 11 Szenarien und die drei ausgewählten Strafkostensätze dargestellt. Vergleichend werden die Lösungen der Szenarien ohne die Berücksichtigung von Unsicherheiten (Referenz) und mit perfekter Information abgebildet. Alle Ergebnisse dieser beiden Modelle sind im Anhang D.1 (Referenz Modell) bzw. D.2 (Perfekte Information) dargestellt. Die unbefriedigte Nachfrage für Szenario 0 nimmt für alle Modellvarianten den gleichen Wert an. Da in diesem Szenario keine weitere Ausbreitung der Epidemie erfolgt, führt eine Berücksichtigung zukünftiger Risiken nicht zu einem besseren Ergebnis in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage. Auch für Szenario 1.1 ist die Auswirkung minimal, da dieses Szenario, mit einer Ausbreitung der Epidemie in der relativ kleinen Region 2, keinen großen Effekt hat. In den anderen beiden Szenarien mit nur einer weiteren Ausbreitung der Epidemie, 1.2 und 1.3, sind die Folgen größer, da hier dichter bevölkerte Regio-

nen betroffen sind. Die Erhöhung der Strafkosten von 1,5 auf 2,5 hat jedoch keine deutliche Verbesserung der Lösung in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage zur Folge. Deutlich wird hier, dass die Ergebnisse mit perfekter Information nicht wesentlich besser sind, als die mit den höheren Strafkosten. Diese Strafkosten reichen also aus, um das minimal erreichbare Ergebnis zu erzielen. Das gleiche gilt für die Szenarien mit zwei weiteren Ausbreitungen der Epidemie. Erst in den Szenarien, in denen drei oder vier Regionen von der Epidemieausbreitung betroffen sind, haben die Strafkosten von 2,5 einen deutlichen positiven Effekt auf die unbefriedigte Nachfrage. In diesen Szenarien können die Ergebnisse mit perfekter Information auch von den Modellen mit hohen Strafkosten nicht mehr erreicht werden, sind allerdings, zumindest im Fall von Szenario 3.2 und 3.3, auch nicht weit von diesen entfernt.

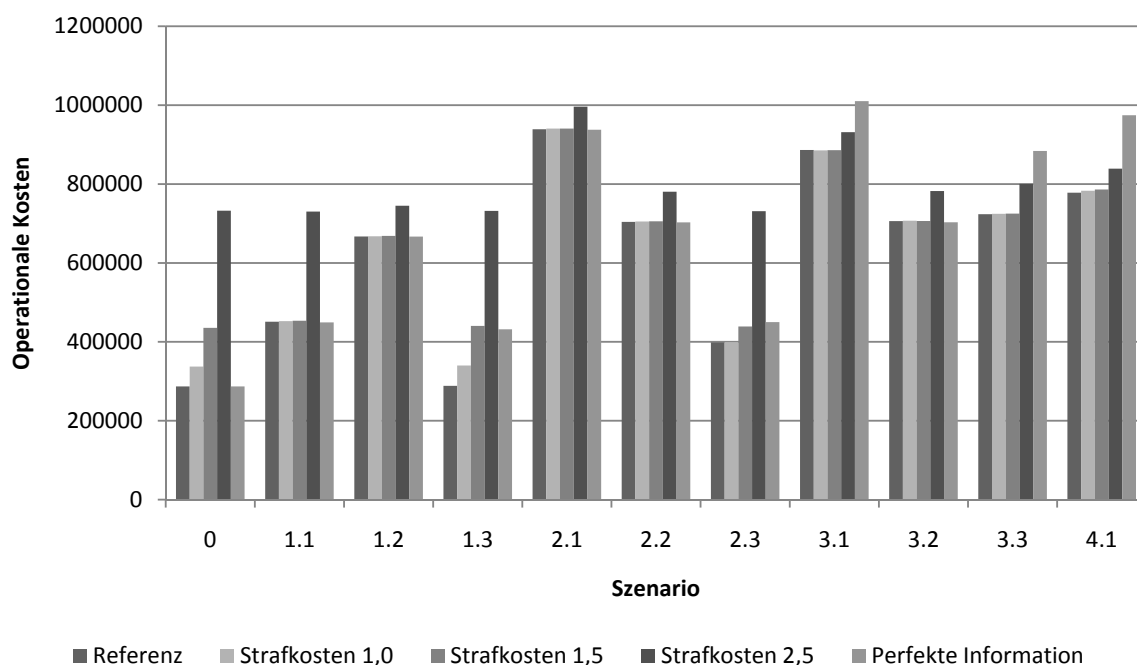


Abbildung 7.5.: Operationale Kosten für verschiedene Szenarien und ausgewählte Strafkostensätze

Die operationalen Kosten verhalten sich gegenläufig zur unbefriedigten Nachfrage. Aufgrund der Sicherheitsbestände, die angelegt werden, um auf zukünftige Nachfrageerhöhungen reagieren zu können, steigen sie bei Erhöhung der Strafkosten an. Allerdings können die Kostensteigerungen bei moderaten Strafkostensätzen gering gehalten werden. Nur in Szenario 0 und 1.3 haben auch schon geringe Strafkostensätze deutliche Auswirkungen auf die Kosten. In Szenario 1.3 breitet sich die Epidemie erst in der

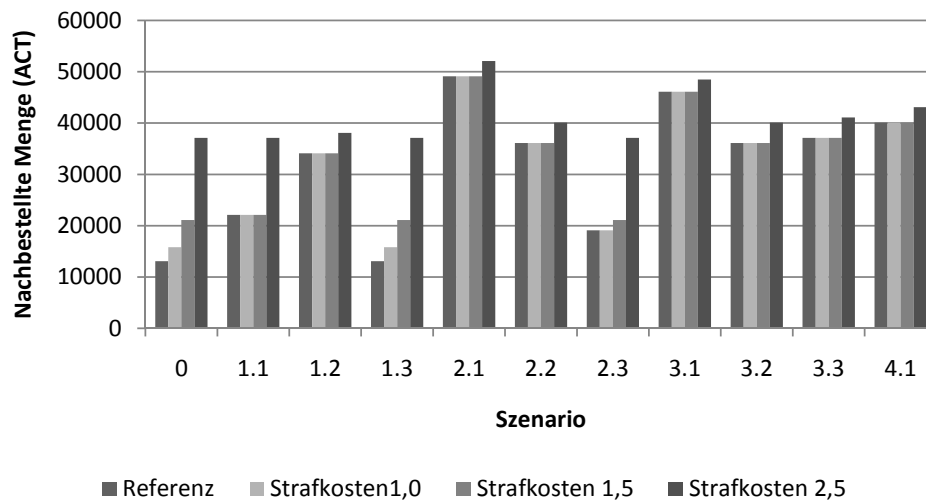


Abbildung 7.6.: Nachbestellte Menge an ACT für verschiedene Szenarien und ausgewählte Strafkostensätze

siebten Periode in Region 4 aus. Zu diesem späten Zeitpunkt kann keine Nachbestellung mehr erfolgen. Demnach sind die Kosten für die Modellvariante ohne Strafkosten für dieses Szenario geringer. An den operationalen Kosten, die mit dem Modell mit perfekter Information erzeugt werden, wird deutlich, dass die Kosten mit den moderaten Strafkostensätzen am unteren Limit liegen: Auch wenn die Informationen über Epidemieausbreitungen im Vorherein bekannt sind, können, unter der Voraussetzung, dass die unbefriedigte Nachfrage minimiert werden soll, die operationalen Kosten nicht deutlich verringert werden. In den anderen Szenarien wird, auch wenn die Risiken nicht im Vorherein berücksichtigt werden, noch auf weitere Ausbreitungen der Epidemie reagiert und es werden Medikamente nachbestellt, so dass auch bei der Lösung mit dem Referenzmodell Kosten für Bestellung und Transport anfallen. Das erklärt die guten Ergebnisse für viele Szenarien mit den moderaten Strafkostensätzen im Vergleich zum Referenzmodell. Bei allen Szenarien ist in den Lösungen mit einem Strafkostensatz von 2,5 ein deutlicher Anstieg der Kosten zu beobachten. Für die ersten sieben Szenarien sind die Strafkosten von 2,5 also zu hoch in Relation zur unbefriedigten Nachfrage, die im Vergleich zu den niedrigeren Strafkosten nur geringfügig sinkt. Für die letzten vier Szenarien in einer höheren Risikostufe kann der Entscheidungsträger die Ergebnisse mit diesem höheren Strafkostensatz nutzen, vorausgesetzt, er hat ausreichend Budget zur Verfügung, um sie umzusetzen. Die Menge der nachbestellten Güter (Abbildung 7.6) verhält sich sehr ähnlich zu den Gesamtkosten (Abbildung 7.5).

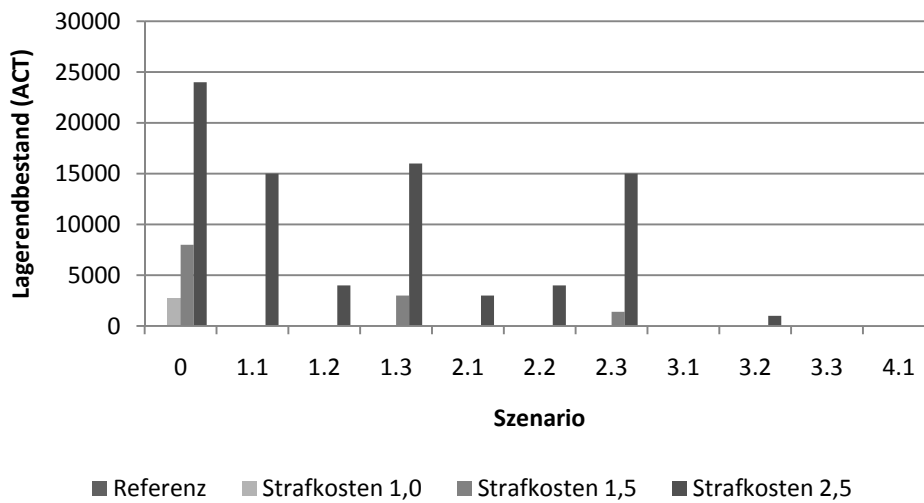


Abbildung 7.7.: Gesamtbestand an ACT in den Lagern am Ende des Planungshorizontes

Dies liegt daran, dass jede Nachbestellung Kosten verursacht: Nicht nur die Lieferkosten, sondern auch die Lagerhaltungs- und Transportkosten steigen, wenn sich mehr Güter im Distributionsnetzwerk befinden. Die Menge der nachbestellten Güter ist, ebenso wie die operationalen Kosten, für die Modelle mit Strafkosten von 1,0 und für das Referenzmodell in fast allen Szenarien ähnlich. Auch das Modell mit Strafkosten von 1,5 erzeugt selten höhere Nachbestellungen. Werden die Strafkosten weiter erhöht (auf 2,5 oder mehr), steigt die nachbestellte Menge jedoch an. Dieser Effekt lässt sich auch im Endbestand der Lager beobachten (Abbildung 7.7). Bei der Lösung der Szenarien mit dem Referenzmodell bleiben keine Endbestände in den Lagern bestehen. Auch die Lösungen mit den geringen und moderaten Strafkostensätzen weisen nur geringe Endbestände in den Lagern auf. Unter Berücksichtigung der guten Ergebnisse in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage deutet dies darauf hin, dass diese Modelle für die meisten Szenarien einen guten Kompromiss zwischen Kostenminimierung und Reaktionsfähigkeit auf zukünftige Epidemieausbreitungen bilden. Das Modell mit einem Strafkostensatz von 2,5 weist dagegen in den Szenarien der niedrigen Risikostufen sehr hohe Endbestände in den Lagern auf, wodurch abermals verdeutlicht wird, dass dieser Strafkostensatz nicht geeignet zur Lösung von Planungsproblemen unter geringer Unsicherheit ist. Zwar können die Bestände zur Befriedigung von Nachfrage genutzt werden, die nach dem Planungshorizont auftritt. Es entstehen jedoch Mehrkosten für die lange Lagerhaltung.

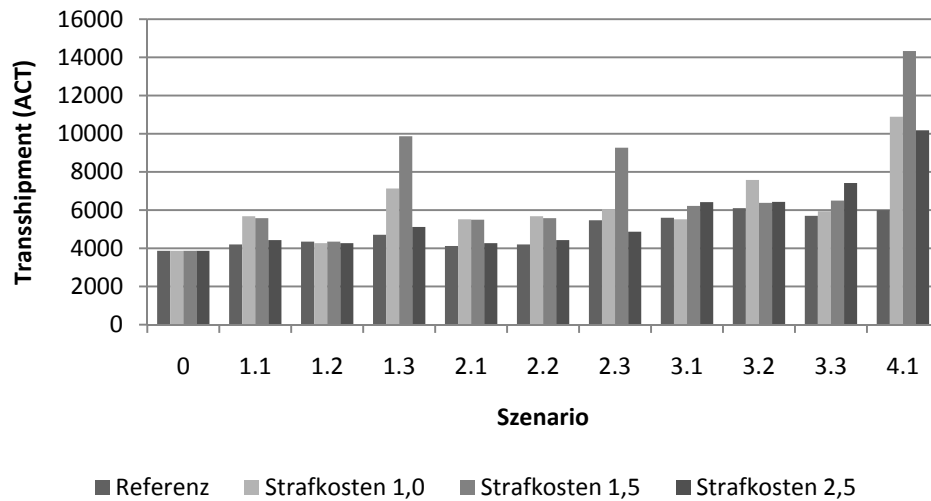


Abbildung 7.8.: Transportierte Menge an ACT zwischen den regionalen Lagern

In der Abbildung 7.8 sind die umverteilten Mengen je Szenario aggregiert über alle Perioden dargestellt. Es wird deutlich, dass in den meisten Lösungen keine großen Umverteilungen stattfinden. Bei detaillierterer Betrachtung bildet die erste Periode eine Ausnahme: Es wird alles, was nicht zur Bedarfsbefriedigung im eigenen Lager in der ersten Periode benötigt wird, zum Regionallager 1 transportiert, um dort auf den Ausbruch der Epidemie reagieren zu können. Diese Menge von 3870 Einheiten ACT wird in jedem Szenario und mit jeder Modellvariante umverteilt. Darüber hinaus finden in den Szenarien, in denen sich die Epidemie weiter ausbreitet, weitere Umverteilungen in geringem Ausmaß statt. Die Szenarien mit einer oder zwei weiteren Epidemieausbreitungen weisen für die geringen und mittleren Strafkosten größere Umverteilungsmengen auf, als für das Referenzmodell und für das Modell mit den hohen Strafkosten. Die geringe Transshipmentmenge bei Lösung des Referenzmodells lässt sich mit der Hilfsgüterknappheit erklären, die vorherrscht, wenn Unsicherheiten in der Planung nicht berücksichtigt werden. Nachbestellungen finden hier erst statt, wenn eine weitere Ausbreitung der Epidemie eingetreten ist und dann ist bereits bekannt, in welches Lager die Güter transportiert werden müssen. Im Gegensatz dazu besteht bei der Vorpositionierung, wie bereits in Kapitel 2.6 beschrieben, immer die Gefahr, dass Kosten für Lagerhaltung und Umverteilung anfallen. Das Modell mit den hohen Strafkosten hat auf der anderen Seite eine so große Menge an Gütern in allen Regionallagern vorpositioniert, dass die Umverteilung in den meisten Szenarien geringer ausfallen kann. Die Ergebnisse der Szenarien bei Lösung unter perfekten In-

formationen werden in den Abbildungen 7.6 bis 7.8 nicht aufgeführt. Die Ergebnisse sind wenig überraschend: Es wird genauso viel nachbestellt wie nachgefragt wird, somit liegt am Ende des Planungshorizontes nichts mehr in den Lagern und umverteilt wird lediglich, um den erhöhten Bedarf zu Beginn des Planungshorizontes zu decken.

Mit der relativ einfach umzusetzenden Methode der gewichteten Summe können für die betrachteten Szenarien gute Lösungen in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage gefunden werden. Nach einer ausführlichen Sensitivitätsanalyse sind passende Strafkostensätze gefunden und angewendet worden, um die Modelle zu lösen. Problematisch bleibt das Ermitteln dieser Strafkostensätze, da unklar ist, welche Änderungen der Strafkosten zu neuen effizienten Lösungen führen. Trotzdem eignet sich die Methode der gewichteten Summe gut, um eine erste Abschätzung des Lösungsraums zu bekommen und auch, um in kurzer Zeit erste Kompromisslösungen zu ermitteln.

7.3. *Constraint Methode*

Die Lösungen des Modells mit der *Constraint Methode* sind für drei verschiedene kritische Werte dargestellt. Der kritische Wert definiert bei der *Constraint Methode* das Abbruchkriterium: Wird dieser Wert unterschritten, werden keine weitere *Grid Points* bestimmt und die Lösung, mit der weiter gerechnet wird, ist gefunden (Eine ausführliche Erläuterung der *Constraint Methode* ist in Abschnitt 4.4.3 zu finden). Auch hier wird das Referenzmodell und das Modell mit den perfekten Informationen als Vergleich herangezogen. Die Szenarien, für welche die Ergebnisse im Folgenden exemplarisch dargestellt werden, sind identisch zu denen im vorangegangenen Abschnitt. Die Ergebnisse aller Szenarien befinden sich im Anhang D.4. Die 58 Szenarien wurden bei einem kritischen Wert von 0,8 und 1,0 mit einem Gap von 0,2% gelöst, bzw. mit einem Gap von 0,25% und 0,3% bei einem kritischen Wert von 1,0 für die Szenarien, die schwer zu lösen waren. Bei einem kritischen Wert von 1,2 wurde der relative Zielfunktions-Gap auf einen Wert von 0,2 bis zu 0,4% gesetzt. Abbildung 7.9 zeigt die unbefriedigte sichere Nachfrage für die 11 ausgewählten Szenarien und drei ausgewählte kritische Werte. Gegenüber dem Referenzmodell kann die unbefriedigte Nachfrage mit der *Constraint Methode* mit allen kritischen Werten gesenkt werden. Allerdings ist auch mit dieser Lösungsmethode wieder eine Analyse der vorliegenden Risikostufe notwendig, um einen angemessenen kritischen Wert auszuwählen. Die Szenarien der niedrigen Risikostufe werden mit einem kritischen Wert von 1,2 ebenso gut gelöst wie

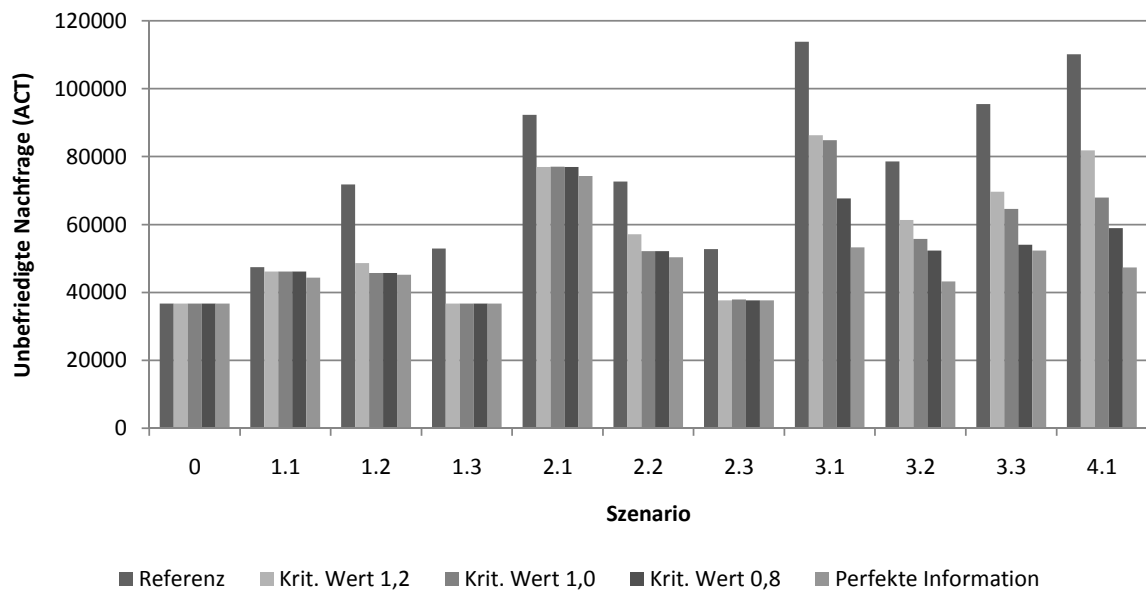


Abbildung 7.9.: Unbefriedigte Nachfrage für verschiedene Varianten der *Constraint* Methode

mit einem kritischen Wert von 0,8 und erreichen fast das Minimum an unbefriedigter Nachfrage, wie sich im Vergleich zu den Lösungen der Szenarien unter Annahme perfekter Informationen zeigt. Noch geringere kritische Werte führen in keinem der dargestellten Szenarien zu besseren Ergebnissen bezüglich der unbefriedigten Nachfrage. Für die Szenarien, in denen drei oder vier weitere Regionen von der Epidemie betroffen sind, verringert sich die unbefriedigte Nachfrage mit dem kritischen Wert von 0,8 nochmals. Hier kann also ein geringerer kritischer Wert ausgewählt werden. Vor allem die Ergebnisse mit dem kritischen Wert von 1,0 sind vielversprechend für die Szenarien der höheren Risikostufe, da sich hier auch die operationalen Kosten nicht maßgeblich erhöhen. Die operationalen Kosten bei Lösung der Szenarien mit der *Constraint* Methode sind in Abbildung 7.10 dargestellt. Für die Szenarien 0 und 1.3 treten deutlich höhere Kosten auf, wenn das Modell mit der *Constraint* Methode gelöst wird im Vergleich zum Referenzmodell oder der Lösung unter perfekten Informationen. Das liegt an den zu hohen Sicherheitsbeständen, im Verhältnis zu den geringen Ausbreitungen der Epidemie in diesen Szenarien. Das wird auch an den Ergebnissen mit perfekter Information deutlich. Hier können die Kosten deutlich geringer gehalten werden, was auf geringere Nachbestellungen schließen lässt. Die Szenarien 1.1 und 1.2 weisen auch höhere Kosten auf als nötig, um die Nachfrage möglichst gut zu befrie-

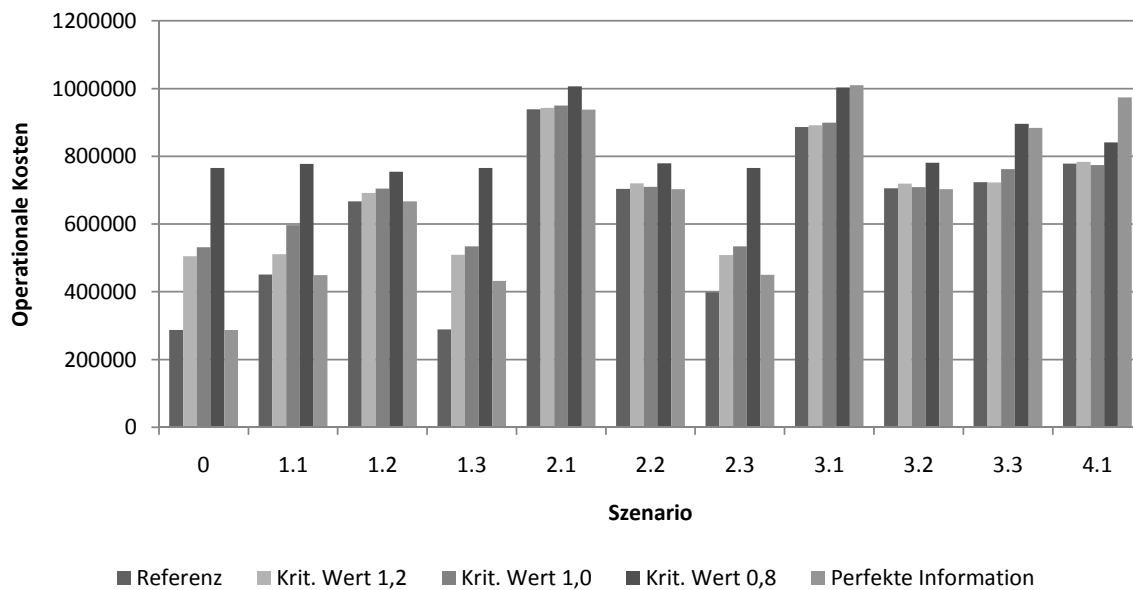


Abbildung 7.10.: Operationale Kosten für verschiedene Varianten der *Constraint Methode*

digen. Allerdings ist hier der Unterschied nur für das Modell mit einem kritischen Wert von 0,8 sehr groß. Auch die meisten anderen Szenarien weisen höhere Kosten auf bei der Lösung mit einem kritischen Wert von 0,8, im Vergleich zum Referenzmodell. Je größer die Auswirkungen der Epidemie, desto geringer ist der Unterschied in den Kosten. In den Szenarien mit drei oder vier weiteren Epidemieausbrüchen sind die Kosten der Lösungen mit einem kritischen Wert von 1,0 oder 1,2 kaum höher als mit dem Referenzmodell. Auch verglichen mit dem Modell, welches perfekte Informationen voraussetzt, sind die Kosten mit einem kritischen Wert von 1,2 oder 1,0 nicht mehr höher oder sogar geringer. Dies liegt daran, dass bei perfekter Information die gesamte Nachfrage befriedigt werden kann, da sie im Voraus bekannt ist. In den anderen Modellen ist dies nicht immer möglich.

Wie bei der Methode der gewichteten Summe, schwanken die operationalen Kosten abhängig von den nachbestellten Mengen des betrachteten Hilfsgutes (Abbildung 7.11). Die Höhe der Nachbestellungen spiegelt sich auch im Lagerbestand am Ende des Planungshorizontes wider (Abbildung 7.12). Vor allem die Lösungen mit einem kritischen Wert von 0,8 erzeugen einen erhöhten Lagerbestand, der am Ende des Planungshorizontes in den Depots verbleibt. Lediglich in den Szenarien mit vielen Epidemieausbreitungen werden die angeschafften Sicherheitsbestände vollständig benötigt.

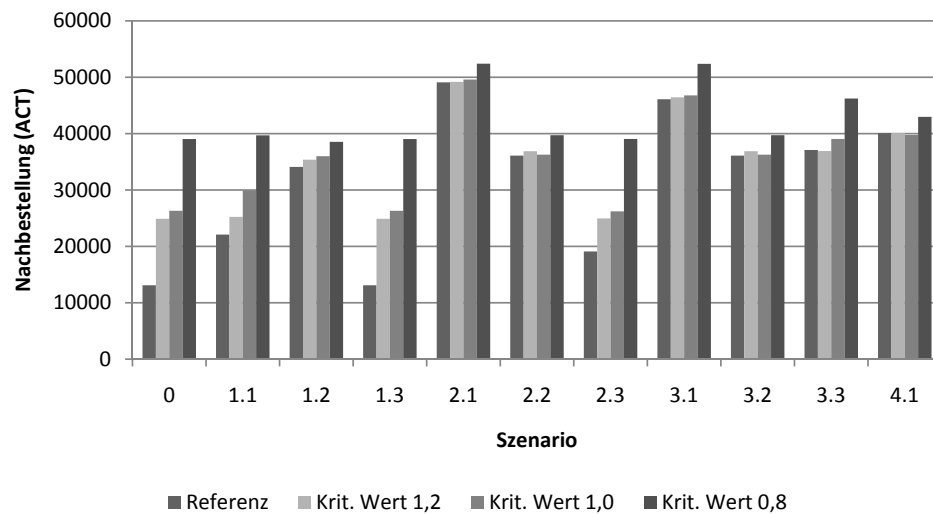


Abbildung 7.11.: Nachbestellte Menge für verschiedene Varianten der *Constraint* Methode

Auch in den Durchläufen mit höheren kritischen Werten wird für die ersten Szenarien ein zu hoher Sicherheitsbestand angelegt. Dieser ist jedoch bei weitem nicht so hoch wie bei einem kritischen Wert von 0,8. Die Transshipmentmengen sind bei Lösung der Szenarien mit der *Constraint* Methode ebenfalls relativ gering (Abbildung 7.13). Mindestens 3870 Einheiten ACT werden in der ersten Periode zu Lager 1 transportiert. Darüber hinaus wird bei der *Constraint* Methode etwas mehr zwischen den

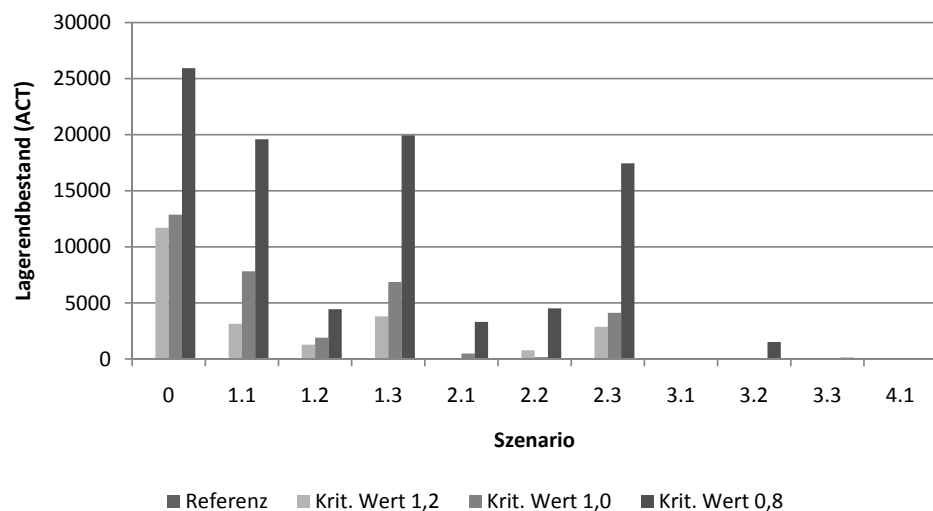


Abbildung 7.12.: Lagerbestand am Ende des Planungshorizontes für verschiedene Varianten der *Constraint* Methode

Regionallagern transportiert. Das liegt an der Formulierung des Modells: Die Zielfunktion beinhaltet nur die Minimierung der unbefriedigten Nachfrage. Die operationalen Kosten werden dabei durch die *Grid Points*, die zwischen dem minimal und maximal möglichem Budget definiert werden, begrenzt. Solange diese Begrenzung eingehalten wird, besteht also ein bestimmter Spielraum für die operationalen Kosten. Durch einen geringeren Abstand zwischen den *Grid Points*, also eine größere Anzahl dieser, wären diese Ungenauigkeiten zu minimieren. Der Rechenaufwand ist jedoch für die Szenarien schon mit der gewählten Anzahl an *Grid Points* so hoch, dass ein Zielfunktions-Gap eingeführt werden musste. Somit würde eine Erhöhung der Anzahl an *Grid Points* einhergehend mit einer notwendigen Erhöhung des Zielfunktions-Gaps nicht zu besseren Ergebnissen führen. Denn das primäre Ziel bleibt die Befriedigung der Nachfrage und nicht die Kostensenkung. Die Transshipmentmengen bleiben ohnehin verhältnismäßig gering, so dass auch die Auswirkungen auf die Kosten nicht stark ins Gewicht fallen.

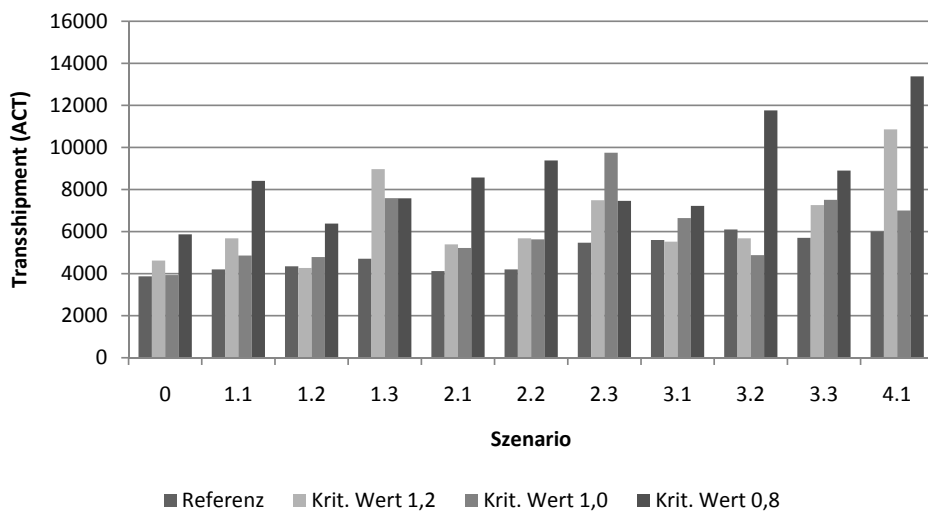


Abbildung 7.13.: Transshipmentmengen für verschiedene Varianten der *Constraint* Methode

7.4. Gegenüberstellung der Ergebnisse und Diskussion

Für den Vergleich der Lösung des Modells *mHumLog* mit den zwei Lösungsmethoden werden exemplarisch fünf Szenarien ausgewählt, deren Ergebnisse einander gegenübergestellt werden. Darunter ist das Szenario 0 sowie die Szenarien 1.1, 2.2, 3.1 und 4.1. Wie in den Abschnitten zuvor werden die Ergebnisse auch hier wieder für drei unter-

schiedliche kritische Werte der *Constraint* Methode und drei Strafkostensätze bei der Methode der gewichteten Summe betrachtet. Die unbefriedigte Nachfrage, die mit den unterschiedlichen Lösungsmethoden resultiert, ist in Abbildung 7.14 dargestellt.

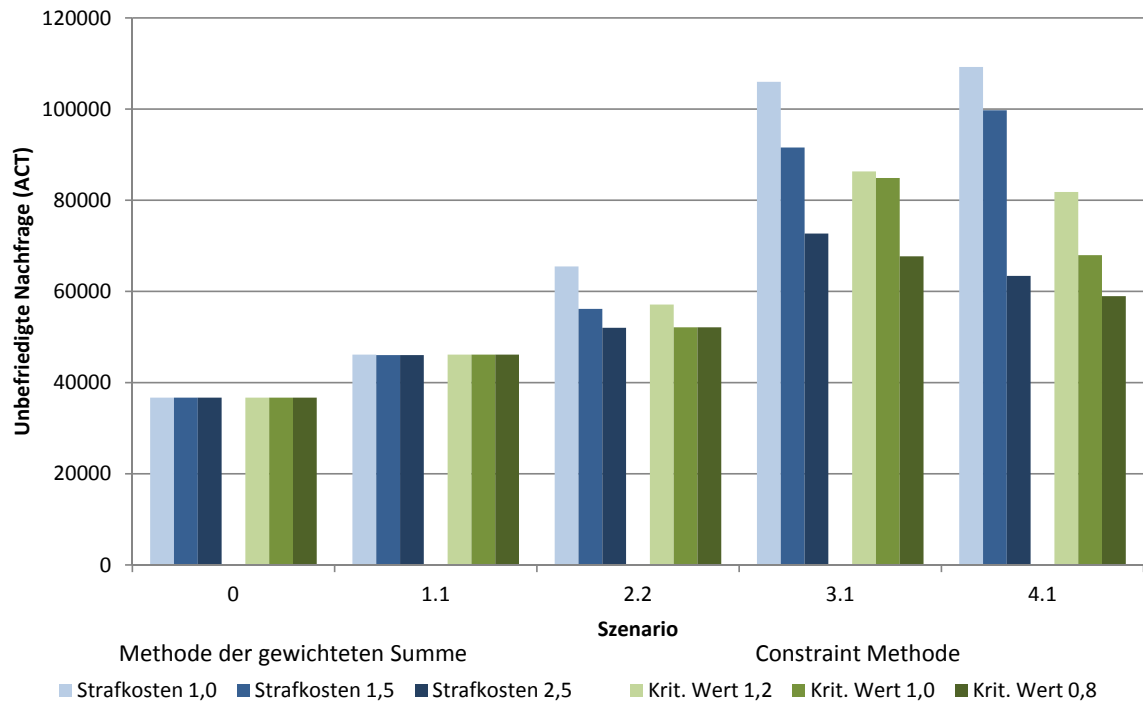


Abbildung 7.14.: Gegenüberstellung der unbefriedigten Nachfrage für beide Lösungsmethoden und ausgewählte Szenarien

Die Betrachtung der unbefriedigten Nachfrage für das Szenario 0 ist wenig aussagekräftig. Die Menge an ACT, die nicht befriedigt wird, ist für alle Modellvarianten gleich hoch und resultiert aus dem Ausbruch der Epidemie in Region 1. Auch im Szenario 1.1 sind keine Unterschiede in der Menge der unbefriedigten Nachfrage zu erkennen. Die Modellvarianten mit geringen Strafkosten oder hohem kritischem Wert sind also ausreichend. In den letzten drei Szenarien wird deutlich, dass die Methode der gewichteten Summe mit geringen Strafkosten weniger Nachfrage befriedigen kann als die drei Varianten der *Constraint* Methode. Die moderaten Strafkosten erzeugen für das Szenario 2.2 noch ähnlich gute Werte, können die Nachfrage in den Szenarien 3.1 und 4.1 jedoch auch nicht in dem Umfang befriedigen, wie die Varianten der *Constraint* Methode. Lediglich der Strafkostensatz von 2,5 erzeugt vergleichbare Ergebnisse in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage. Die Ergebnisse mit der *Constraint* Methode und einem kritischen Wert von 0,8 können als untere Grenze der unbefriedigten

Nachfrage angesehen werden, und zwar ohne deutlich höhere Kosten zu erzeugen, als mit der gewichteten Summe. Eine Gegenüberstellung der Kosten ist in Abbildung 7.15 gegeben.

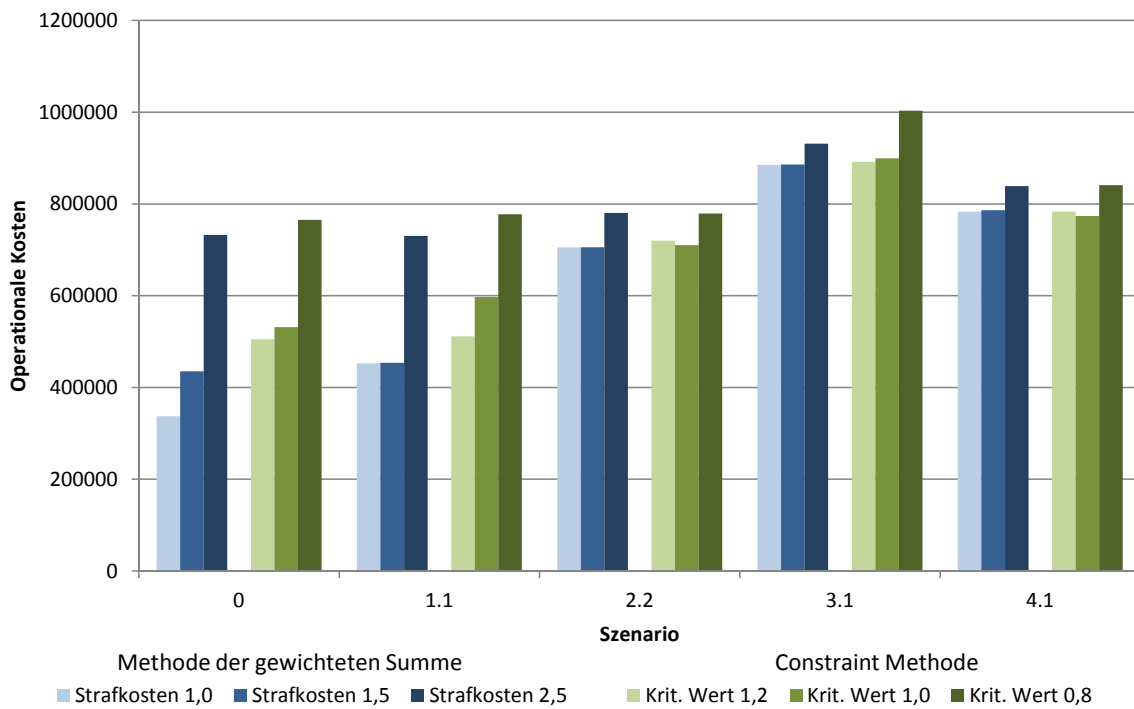


Abbildung 7.15.: Gegenüberstellung der operationalen Kosten für beide Lösungsmethoden und ausgewählte Szenarien

Die operationalen Kosten können für die Szenarien mit geringem Risiko (Szenarien 0 und 1.1) mit der Methode der gewichteten Summe geringer gehalten werden im Vergleich zur *Constraint* Methode. Ab dem Szenario 2.2 sind die Ergebnisse der beiden Methoden ähnlich, abhängig von den Parametern, mit denen sie gelöst werden. Lediglich die Kosten für das Szenario 3.1 mit der *Constraint* Methode und einem kritischen Wert von 0,8 sind höher, als bei der Methode der gewichteten Summe mit Strafkosten von 2,5. Jedoch war hier die unbefriedigte Nachfrage auch geringer. Die Qualität der Ergebnisse mit den zwei Lösungsmethoden ist also vergleichbar. Dabei erfüllt die *Constraint* Methode das primäre Ziel der Minimierung der unbefriedigten Nachfrage etwas besser, mit in vielen Szenarien nicht deutlich höheren Kosten.

7.5. Diskussion zur Robustheit der vorliegenden Lösungen

Die aktuellen Umweltbedingungen sind in der Situation, in der sich der Entscheidungsträger befindet, bekannt. Die Hilfsaktion ist bereits an diese Umweltbedingungen angepasst. Auch der Teil der Nachfrage, der für die tägliche Versorgung der Menschen in der betrachteten Region benötigt wird, ist bekannt. Lediglich die Ausprägung der Nachfrage in zukünftigen Perioden ist zum Teil unbekannt. Die Unsicherheit wird durch die Möglichkeit einer weiteren Verbreitung der Epidemie im betrachteten Gebiet verursacht. Diese Form der Unsicherheit über zukünftige Entwicklungen der Situation führt dazu, dass keine hohe Optimalitätsrobustheit erzielt werden kann (eine Definition der Robustheitsbegriffe ist in Abschnitt 5.4 gegeben). Optimal kann ein Plan nur sein, wenn vorher bekannt ist, wo eine Nachfrageerhöhung eintritt und dieser durch eine Bestandserhöhung begegnet werden kann. Die Pläne können jedoch aufgrund der rollierenden Planung sehr gut an aktualisierte Informationsstände angepasst werden. Diese Flexibilität führt zu einer zulässigkeitsrobusten Lösung. Es kann nicht vorkommen, dass Restriktionen verletzt werden, was durch die Formulierung von *mHumLog* sichergestellt ist. Auch bei sehr hoher unbefriedigter Nachfrage und sehr hohen Kosten bleiben die Lösungen zulässig. Es bleibt offen, ob diese Lösungen auch in der Praxis zulässig sind: Die operationalen Kosten sind bei der Methode der gewichteten Summe nicht nach oben begrenzt. Wenn in der akuten Situation das entsprechende Budget nicht vorhanden ist, kann die mit dem Modell ermittelte Lösung nicht umgesetzt werden. Mathematisch betrachtet ist es jedoch nicht möglich Pläne zu erzeugen, die einige der formulierten Restriktionen verletzen. Die rollierende Planung und die geforderte Flexibilität führen zu einer geringen Stabilität der Pläne, da aktualisierte Informationen dynamische Änderungen am bisherigen Plan zur Folge haben. Charles u. a. (2010) betonen die Bedeutung eben dieser Flexibilität bei unsicheren Umweltbedingungen zur Sicherstellung der Nachfragebefriedigung in operativen Fragestellungen.

Die Transshipmentmengen, die bei den Ergebnissen mit beiden Lösungsmethoden relativ gering sind, zeigen, dass trotz der rollierenden Planung keine gravierenden Anpassungen der Pläne notwendig sind. Eine Darstellung der durchschnittlichen nachbestellten Mengen an ACT in den 11 ausgewählten Szenarien ist in Abbildung 7.16 für die Lösung der gewichteten Summe und in Abbildung 7.17 für die Lösungen mit der *Constraint* Methode gegeben. Die letzte Nachbestellung findet spätestens in Periode 5 statt, da alles, was nach dieser Periode nachbestellt würde, nicht mehr im Planungs-

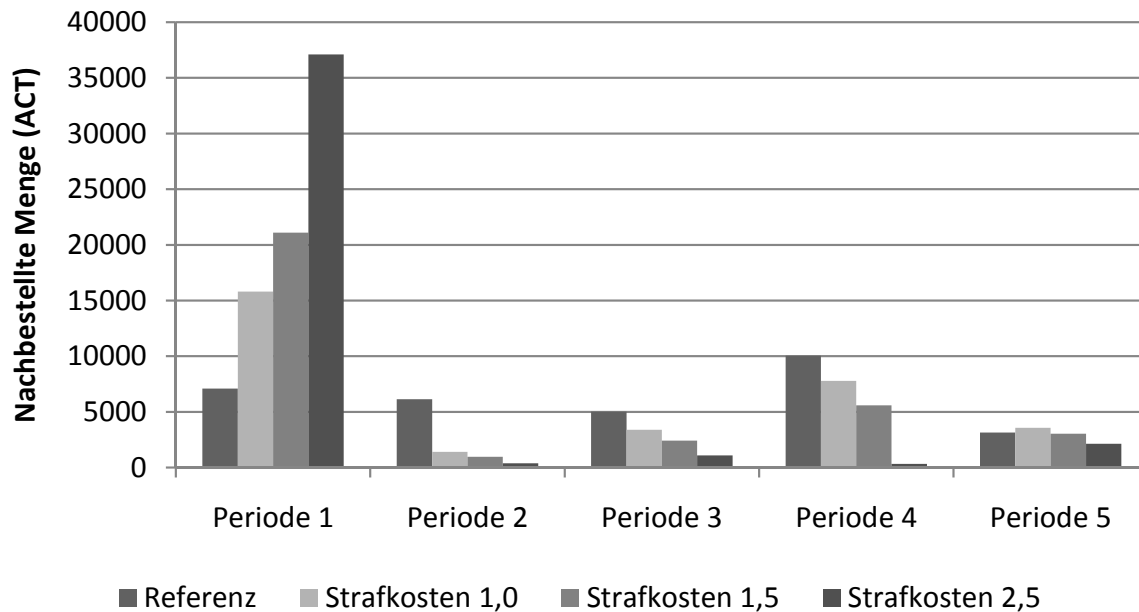


Abbildung 7.16.: Nachbestellungen pro Periode gemittelt über alle Szenarien bei Lösung mit der gewichteten Summe

zeitraum bei der betroffenen Bevölkerung ankommen würde. Die Lösungen beider Methoden verhalten sich im Mittel ähnlich. Bei den Lösungen mit der *Constraint* Methode wird zu Beginn des Planungshorizontes etwas mehr nachbestellt. Teilweise wird diese Nachbestellung in Periode 4 bei der Methode der gewichteten Summe nachgeholt. Auf der anderen Seite wird in der Periode 5 bei Lösung des Modells mit der *Constraint* Methode wieder etwas mehr nachbestellt. Ein Vergleich der Lösungen ist vor allem zwischen den Ergebnissen mit einem hohen kritischen Wert oder einem geringen Strafkostensatz und denen mit einem geringen kritischen Faktor oder einem hohen Strafkostensatz aussagekräftig. Erstere Parameterausprägungen führen dazu, dass bei Bekanntwerden neuer Epidemieverbreitungen in späteren Perioden noch größere Mengen nachbestellt werden müssen. Diese sind geringer als bei Lösung der Szenarien mit dem Referenzmodell, dennoch sind die Lösungen dieser Modellvarianten weniger stabil und robust, vergleicht man sie mit den Lösungen mit niedrigem kritischem Wert oder hohen Strafkostensätzen. Der Entscheidungsträger kann diese Flexibilität jedoch auch zu seinem Vorteil nutzen, da er somit das Risiko gering hält, zu hohe Sicherheitsbestände anzulegen. Die hohe Flexibilität der Pläne hat auf der anderen Seite auch wieder einen positiven Einfluss auf die Zulässigkeitsrobustheit. Sie sorgt dafür, dass Pläne auch bei großem Anpassungsbedarf zulässig bleiben. Der Entscheidungsträger

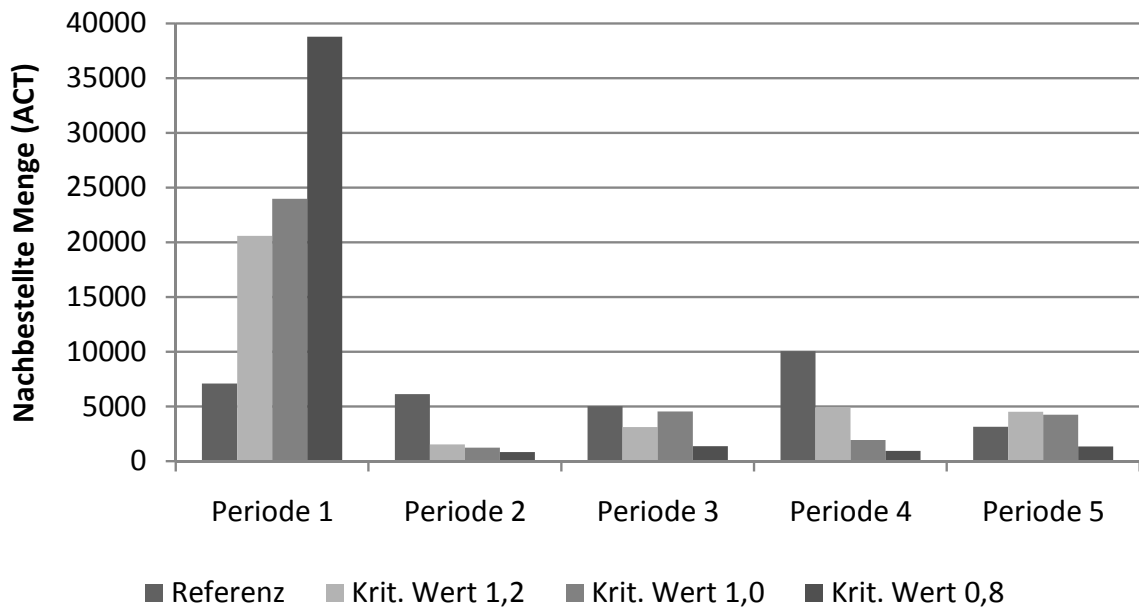


Abbildung 7.17.: Nachbestellung pro Periode gemittelt über alle Szenarien bei Lösung mit der *Constraint* Methode

muss demnach vor allem basierend auf dem verfügbaren Budget und durch eine gute Einschätzung der Risikostufe in der aktuellen Situation Distributionspläne ermitteln. Zur Unterstützung dieser Entscheidungen soll im folgenden Abschnitt der Einfluss verschiedener Distributionsfaktoren auf die Pläne untersucht und ausgewertet werden.

7.6. Ergebnisanalyse zur Bewertung von Einflussfaktoren auf Entscheidungen in *Overlapping Disasters*

Nachdem die Ergebnisse der Lösung der Szenarien mit dem Modell *mHumLog* ausführlich diskutiert wurden, werden im folgenden Abschnitt detailliertere Analysen der Einflussfaktoren durchgeführt, um Schlüsselfaktoren zu ermitteln, die zur Entscheidungsfindung herangezogen werden müssen. Darüber hinaus werden die Handlungsalternativen anhand der Qualitätskriterien, die in Kapitel 5.4 eingeführt wurden, bewertet. Dafür werden nur die Ergebnisse der *Constraint* Methode betrachtet, um die Analyse übersichtlicher zu gestalten. Die beiden Lösungsmethoden haben ähnlich gute Ergebnisse erzeugt, allerdings kommt die *Constraint* Methode ohne eine ausführliche Sensitivitätsanalyse bei Veränderungen der Parameter aus, was die folgenden

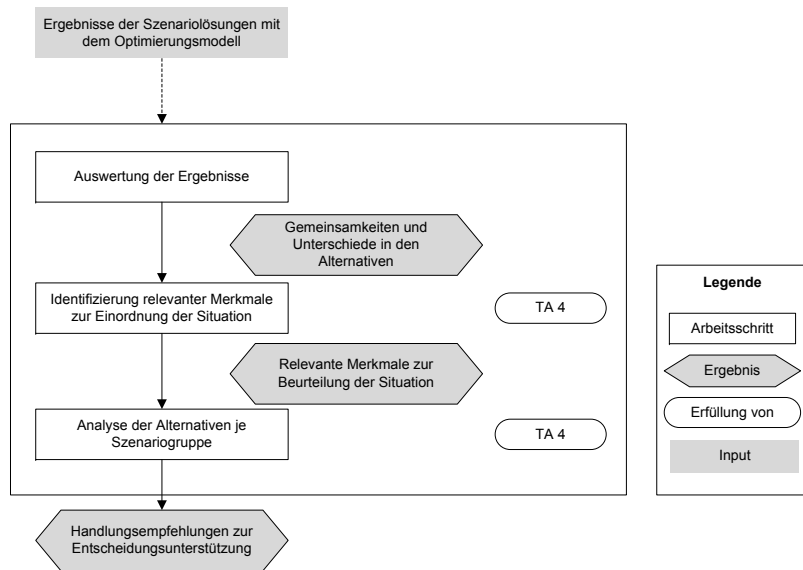


Abbildung 7.18.: Vorgehen zur Analyse der Ergebnisse der Szenarien bei Lösung mit dem Modell *mHumLog*

Analysen deutlich vereinfacht. Die Unsicherheiten, mit denen der Entscheidungsträger vor Ort konfrontiert ist, sind nicht quantifizierbar. Die verschiedenen Szenarien treten nicht mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf. Außerdem sind die meisten Unsicherheiten extern begründet, da sie durch zukünftige unbekannte Entwicklungen auftreten. Die externen Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der aktuellen Situation in der Zukunft wurden über die Generierung und Lösung von Szenarien adressiert und müssen auch in der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Die Ergebnisse aus der multikriteriellen Optimierung werden dafür ausgewertet und analysiert. Anschließend werden aus den Ergebnissen Handlungsempfehlungen abgeleitet. Der Entscheidungsträger kann dann in der akuten Entscheidungssituation eine der vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen auswählen. Die Vorgehensweise in diesem Abschnitt ist in Abbildung 7.18 schrittweise dargestellt. Zuerst werden die Ergebnisse ausgewertet, die aus der Lösung der Szenarien mit dem Modell *mHumLog* hervorgegangen sind, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede dieser Handlungsalternativen in Bezug auf unterschiedliche Szenarien zu ermitteln. Dafür werden neben der Grundkonfiguration, deren Ergebnisse eingangs in diesem Kapitel präsentiert wurden, Szenarien mit anderer Datenbasis gelöst, zum Beispiel mit längeren Transportzeiten oder weniger Startbestand in den Lagern. Damit wird untersucht, welche der Distributionsfaktoren

relevant für die zu treffenden Entscheidungen sind, und welche nicht. Durch die Erreichung der jeweiligen Ergebnisse wird der Teilaspekt 4, also die Bereitstellung einer Entscheidungsunterstützung, erfüllt (vgl. Abschnitt 2.6). Die Arbeitsschritte, die zum Erreichen der Ergebnisse führen, werden aufbauend auf den Resultaten aus der multikriteriellen Optimierung der Szenarien im Folgenden durchgeführt. Die abschließende Bewertung und Auswahl der Handlungsalternativen muss der Entscheidungsträger mithilfe der Entscheidungsunterstützung selbst durchführen.

7.6.1. Ermittlung von relevanten Distributionsfaktoren durch detaillierte Ergebnisanalyse

In der akuten Entscheidungssituation muss der Entscheidungsträger eine gute Entscheidung in sehr kurzer Zeit treffen, ohne aufwändige Analysen durchzuführen. Bereits in Abbildung 6.5 wurden potenzielle Einflussfaktoren für die Bestimmung einer guten Handlungsalternative dargestellt. Im Folgenden wird untersucht, inwieweit diese Faktoren zu den Schlüsselfaktoren gehören, also tatsächlich einen Einfluss auf die Bewertung einer Handlungsalternative haben. Eine Handlungsalternative ist das Ergebnis des Modells *mHumLog* mit einem konkreten kritischen Wert in Bezug auf die nachzubestellende Menge Hilfsgüter und deren Verteilung.

In Abbildung 7.19 sind die in Abschnitt 6.4 ermittelten Faktoren und ihre Abhängigkeiten untereinander dargestellt. Die Population und die endemische Ausbreitung von Malaria (vgl. Abbildung 6.5) sorgen für die Höhe der sicheren Nachfrage in dem betrachteten Gebiet. Diese wird direkt vom gesamten Lagerbestand, der zum Zeitpunkt der Entscheidung in den Regionallagern sowie im Zentrallager vorhanden ist, subtrahiert, da ihr Auftreten bekannt ist. Die Zeit für das Eintreffen einer Nachbestellung aus Abbildung 6.5 geht ebenso wie die Distanzen zwischen den Lagern vor Ort in die Transportzeiten ein. Die Risikostufe bezeichnet das jeweilige Hauptszenario und hat dadurch Einfluss auf das konkrete Szenario. Das Risiko einer Epidemieausbreitung und die Faktoren der Distributionsstruktur sind unabhängig von der entsprechenden Alternative, wohingegen die Menge an nachbestellten Hilfsgütern sowie ihre Positionierung im Netzwerk abhängige Variablen sind: Die Handlungsalternativen unterscheiden sich gerade bezüglich der nachbestellten Menge an Hilfsgütern sowie darin, wo diese gelagert werden. Die verschiedenen Alternativen entstehen durch die Lösung der Szenarien mit dem Modell *mHumLog*. Für jeden kritischen Wert gibt es ein Ergebnis und

somit eine Handlungsalternative. Die konkrete Ausprägung des Einzelszenarios ist im Moment der Entscheidungsfindung noch unbekannt. Aus diesem Grund ist die Risikostufe entscheidend für die Menge an nachbestellten Gütern und deren Umverteilung, und nicht das Einzelszenario. Für die Einschätzung des Risikos wird ein Monitoring der relevanten Faktoren für eine Malaria-Epidemie vorausgesetzt. Hier könnte in der Abbildung 7.19 eine Stufe vorgeschaltet werden, die die Einflussfaktoren der Risikostufe beinhaltet. Die potentiellen Einflussfaktoren auf die Ausbreitung einer Epidemie wurden ebenfalls bereits in Abschnitt 6.4 ermittelt.

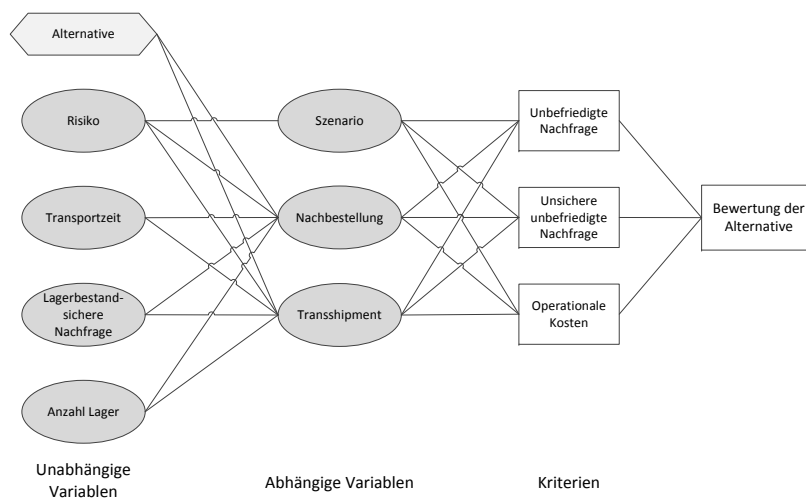


Abbildung 7.19.: Abhängigkeitsstruktur der Einflussfaktoren in Bezug auf die Distributionsentscheidung

Sowohl die Menge der nachbestellten Hilfsgüter als auch die Verteilung dieser im Distributionsnetzwerk und das konkrete Einzelszenario haben Einfluss auf die Qualität einer Handlungsalternative. Die Kriterien zur Bewertung der Alternative sind wie im Modell *mHumLog* definiert: Der Entscheidungsträger möchte die unbefriedigte Nachfrage minimieren und dabei die Kosten möglichst gering halten. Der Einfluss der Faktoren auf diese Kriterien ist in Abbildung 7.19 dargestellt. Die generierten Alternativen sind direkt miteinander vergleichbar und auch die Priorisierung der Kriterien ist eindeutig: Zuerst ist die unbefriedigte Nachfrage zu minimieren, anschließend das Risiko zukünftiger Engpässe und erst dann werden die operationalen Kosten minimiert. Aus diesen Kriterien setzt sich die Bewertung der Alternative zusammen, die anschließend vom Entscheidungsträger aufgrund seiner Erfahrungen beurteilt wird.

Tabelle 7.1.: Durchschnittliche Ergebnisse in den Hauptszenarien
(Grundkonfiguration)

	Referenz	KW 1,2	KW 1,0	KW 0,8
Geringes Risiko	26671 \ 4417	31636 \ 6014	32946 \ 5967	41073 \ 7664
Hohes Risiko	39850 \ 5850	40083 \ 7330	40468 \ 6508	45320 \ 10315

Der Entscheidungsträger muss in der akuten Situation über die Menge an Hilfsgütern, die nachbestellt werden soll entscheiden, sowie darüber, ob die Hilfsgüter im Zentrallager verbleiben oder in die Regionallager verteilt werden. Ausgehend von den Ergebnissen des Modells *mHumLog* für die verschiedenen Szenarien gibt es vier Handlungsstränge, die verfolgt werden können. Ersterer resultiert aus den Ergebnissen, die mit dem Referenzmodell generiert wurden. Die rein reaktive Handlungsweise ist jedoch nur bei absoluter Budgetknappheit in Betracht zu ziehen, da sie in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage sehr schlechte Ergebnisse erzeugt. Die Lösungen mit dem kritischen Wert von 1,2 und 1,0 sind für die Szenarien der Grundkonfiguration ähnlich. Für andere Ausgangssituationen (also z.B. mit längeren Transportzeiten oder höherem Lagerbestand) erzeugen sie jedoch verschiedene Ergebnisse (wie in Tabellen 7.1 bis 7.5 dargestellt). Ein vierter Handlungsstrang sind die Ergebnisse mit dem kritischen Wert von 0,8. Die Nachbestellungen und Umverteilungen sind zwar mit diesem kritischen Wert deutlich höher und damit auch teurer, erzielen aber für einige Szenarien deutlich bessere Ergebnisse in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage. In Kapitel 6.4 wurden zwei unterschiedliche Hauptszenarien gebildet, solche mit einem hohen Risiko einer weiteren Epidemieausbreitung und solche mit einem niedrigen Risiko. Die Szenarien mit einem geringen Risiko zeigen keine weitere Senkung der unbefriedigten Nachfrage bei einem kritischen Wert von 0,8. Hier könnte die Handlungsempfehlung an den Ergebnissen des Modells mit einem kritischen Wert von 1,0 oder 1,2 angelehnt werden. Dagegen kann die unbefriedigte Nachfrage bei den Szenarien mit einem hohen Risiko der Epidemieausbreitung durch Anwendung des Modells mit einem kritischen Wert von 0,8 deutlich gesenkt werden.

Durch die Bildung von Durchschnittswerten über alle der ausgewählten Szenarien des jeweiligen Hauptszenarios werden die Ergebnisse in Tabelle 7.1 generiert. Die ersten Werte geben jeweils die durchschnittlichen Nachbestellungen in den zwei Hauptszenarien aggregiert über den gesamten Planungshorizont an. KW steht dabei für den ent-

Tabelle 7.2.: Durchschnittliche Ergebnisse bei erhöhtem Lagerbestand

	Referenz	KW 1,2	KW 1,0	KW 0,8
Geringes Risiko	6243 \ 10019	9527 \ 15436	12477 \ 14116	15796 \ 12263
Hohes Risiko	14650 \ 12878	15508 \ 18400	16808 \ 17803	19443 \ 17645

sprechenden kritischen Wert, mit dem das Modell *mHumLog* gelöst wurde. Der jeweils zweite Wert in Tabelle 7.1 bezieht sich auf die Umverteilung der Hilfsgüter zwischen den Lagern, aggregiert über alle Perioden. Auch diese Daten sind durchschnittlich über alle Ausprägungen der zwei Hauptszenarien angegeben. Es wird jedoch deutlich, dass in Bezug auf die Umverteilung der Hilfsgüter keine klare Differenzierung in der Handlungsempfehlung gegeben werden kann. Schon in der Auswertung der Ergebnisse in Abschnitt 7.3 wurde deutlich, dass die Menge der umverteilten Hilfsgüter unterschiedlich ist. Vor allem wurde aber deutlich, dass insgesamt wenig umverteilt wird. Die Handlungsempfehlung würde hier in jedem Fall lauten, den Großteil der Hilfsgüter, die nicht direkt benötigt werden, im Zentrallager zu belassen. Von dort aus können sie bei Bedarf in die Regionallager transportiert werden. Ein kleiner Teil sollte, vor allem in Situationen mit einem hohen Risiko für eine weitere Epidemieausbreitung, in den regionalen Lagern gehalten werden, um von dort aus schneller reagieren zu können.

Zur Untersuchung der Distributionsfaktoren müssen nun die Ergebnisse für unterschiedliche Ausgangssituationen betrachtet werden. Dadurch kann ermittelt werden, welche Distributionsfaktoren tatsächlich einen Einfluss auf die Handlungsempfehlung haben und welche nur einen sehr geringen oder keinen Einfluss haben. In Tabelle 7.2 sind die Ergebnisse der Szenarien mit einem erhöhten Lagerbestand gegeben. Der Lagerbestand war für diese Rechnungen doppelt so hoch wie in der Grundkonfiguration. Die nachbestellten Mengen sind dadurch geringer. Dafür wird ein größerer Teil des ACT umverteilt.

Ist der Lagerbestand in den Regionallagern geringer (die Hälfte der Grundkonfiguration), muss eine größere Menge an Hilfsgütern nachbestellt werden, um die Nachfrage decken zu können. Die durchschnittlichen Mengen für die beiden Hauptszenarien sind in Tabelle 7.3 angegeben. Es ist bei dieser Konfiguration auffällig, dass die drei ursprünglich gewählten kritischen Werte fast identische Ergebnisse erzeugen. Um weitere Teile der effizienten Front beurteilen zu können, wurde das Modell darüber hinaus mit einem kritischen Wert von 0,6 gelöst. Die Ergebnisse mit diesem kritischen Wert weisen

Tabelle 7.3.: Durchschnittliche Ergebnisse bei geringerem Lagerbestand

	Referenz	KW 1,2	KW 1,0	KW 0,8	KW 0,6
Geringes Risiko	39271 \ 2280	44710 \ 2596	44544 \ 2624	44806 \ 2596	56666 \ 4633
Hohes Risiko	52450 \ 2195	54038 \ 1760	54038 \ 1760	53643 \ 2225	59360 \ 6870

Tabelle 7.4.: Durchschnittliche Ergebnisse bei vier Regionallagern

	Referenz	KW 1,2	KW 1,0	KW 0,8
Geringes Risiko	31729 \ 3813	35133 \ 4351	39698 \ 4700	43776 \ 7371
Hohes Risiko	45433 \ 4060	46753 \ 4753	46780 \ 6043	48283 \ 5705

deutlich höhere Nachbestellungen auf, begleitet von höheren operationalen Kosten und geringerer unbefriedigter Nachfrage. Die umverteilten Mengen ACT sind sehr niedrig. Wird der kritische Wert auf 0,6 gesetzt, wird deutlich mehr umverteilt, was ein Zeichen dafür ist, dass mehr Hilfsgüter dezentral in den Regionallagern positioniert werden (aufgrund der höheren Verfügbarkeit an Hilfsgütern im gesamten Netzwerk).

Die Tabelle 7.4 gibt die Nachbestellungen und die Umverteilungen für eine Situation mit vier (statt wie bisher fünf) Regionallagern in einem dementsprechend kleineren Gebiet an. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur geringfügig von denen der Grundkonfiguration. Das ist naheliegend, weil mit dem Regionallager auch ein Teil des Bedarfs weggefallen ist und somit die Ausgangssituationen vergleichbar sind. Die umverteilten Mengen sind allerdings geringer; auch das ist naheliegend, wenn ein Lager und die zugehörige Nachfrage wegfällt.

Für die Ergebnisse aus Tabelle 7.5 wurden die Transportzeiten zwischen Zentrallager und Regionallagern auf drei Tage gesetzt. Die Nachbestellung ändert sich dadurch im Vergleich zur Grundkonfiguration nur minimal. Die Ergebnisse der Szenarien unter hohem Risiko weisen etwas geringere Mengen an nachbestellten Hilfsgütern auf, als die der Grundkonfiguration, was daran liegen kann, dass auf sehr spät eintretende Epidemieausbreitungen im Planungshorizont nicht mehr reagiert werden kann. Das verzerrt die Ergebnisse auch in den anderen Konfigurationen geringfügig. Die längeren Transportzeiten verstärken diesen Effekt noch.

Aus den Ergebnissen zur Umverteilung der Hilfsgüter und zur Nachbestellung geht hervor, dass die Anzahl der Lager keinen Einfluss auf die grundsätzliche Handlungs-

Tabelle 7.5.: Durchschnittliche Ergebnisse bei längeren Transportzeiten

	Referenz	KW 1,2	KW 1,0	KW 0,8
Geringes Risiko	25814 \ 4883	32267 \ 6571	32967 \ 6027	40766 \ 5310
Hohes Risiko	35350 \ 4708	36365 \ 6413	38805 \ 7678	41640 \ 8568

empfehlung hat. Ebenso beeinflusst eine Verlängerung der Transportzeit zwischen Zentrallager und Regionallagern die Menge der nachbestellten Hilfsgüter nicht wesentlich. Dementsprechend verkleinert sich die Anzahl der Einflussfaktoren und ihrer Abhängigkeiten, die in Abbildung 7.19 dargestellt wurde. In Abbildung 7.20 ist das Resultat für die Alternative, die mit dem kritischen Wert von 1,2 erzeugt wird, gezeigt. Die Abbildung zeigt die Risikostufe und die Anfangsbestände in den Lagern als relevante Einflussfaktoren auf die Qualität einer Handlungsalternative. Die Werte in Abbildung 7.20 stammen aus der Tabelle 7.1. Es handelt sich um die Durchschnittswerte der Grundkonfiguration unter der Annahme einer hohen Risikostufe. Die Einschätzung der Risikostufe muss der Entscheidungsträger einmal für die gesamte Situation treffen. Veränderbar sind dann nur die von der Alternative abhängigen Variablen, also die Nachbestellungen und die Umverteilungen.

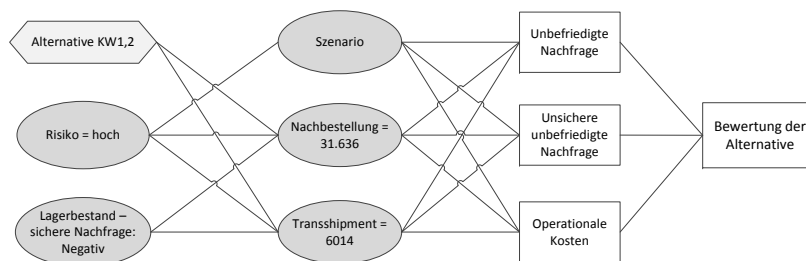


Abbildung 7.20.: Abhängigkeitsstruktur für die Alternative KW 1,2

Die Konzentration auf die Distributionsfaktoren, die tatsächlich relevant für die Entscheidung sind, unterstützt den Entscheidungsträger bei der Entscheidungsfindung. Die endgültige Bewertung einer Alternative muss trotzdem vom Entscheidungsträger vorgenommen werden, anhand seiner Erfahrungswerte und des verfügbaren Budgets. Die Strukturierung des Problems und das Aufzeigen der Abhängigkeiten zwischen den Einflussfaktoren kann ihn aber dabei unterstützen. Im Folgenden werden darüber hinaus verschiedene Qualitätskriterien für die Handlungsalternativen bestimmt. Diese können ebenfalls unterstützend bei der Entscheidungsfindung wirken, da sie das Risiko

bei Auswahl einer Handlungsalternative aufzeigen und dem Entscheidungsträger die Bandbreite der möglichen Ergebnisse verdeutlichen.

7.6.2. Bewertung der Handlungsalternativen für die Szenariogruppen

Zur Bewertung der Handlungsalternativen werden die Indikatoren von Comes (2011), die in Abschnitt 5.4 eingeführt werden, jeweils für die unbefriedigte sichere Nachfrage und die Logistikkosten, die bei Auswahl der jeweiligen Handlungsalternative entstehen, herangezogen:

- Es wird der *Worst Case* für jede der Handlungsalternativen betrachtet,
- außerdem die Differenz zwischen dem besten und dem schlechtesten Ergebnis für jedes Hauptszenario sowie
- der Vergleich mit einem Benchmark (hier die Lösung unter Annahme perfekter Information) und
- das Bedauern, also der Vergleich zu den anderen Handlungsalternativen.

Zur Bestimmung der Indikatoren werden die vier Handlungsalternativen jeweils über alle Einzelszenarien der beiden Hauptszenarien betrachtet und ausgewertet. Die Bewertungskriterien sind die unbefriedigte sichere Nachfrage und die operationalen Kosten. Da die unsichere Nachfrage nicht tatsächlich auftritt und weitere Epidemieausbreitungen in der jeweiligen Periode über eine Erhöhung der sicheren Nachfrage abgebildet werden, wird dieses Kriterium nicht näher betrachtet. Durch die Vielzahl an Einzelszenarien ist eine große Bandbreite an möglichen Entwicklungsrichtungen der Nachfrage abgedeckt und durch die Gruppierung der Szenarien anhand der Risikostufe hat die unsichere Nachfrage dennoch einen Einfluss auf die Bewertung. Die Ergebnisse in Bezug auf den *Worst Case* sind in Tabelle 7.6 für die Szenarien mit einer geringen und mit einer hohen Risikostufe gegeben. Es wurde für jeden kritischen Wert und das Referenzmodell das jeweils schlechteste Ergebnis in Bezug auf die Kosten und die unbefriedigte Nachfrage ermittelt. An den Ergebnissen wird deutlich, dass der *Worst Case* in Bezug auf die operationalen Kosten für alle Alternativen relativ dicht beieinander liegt. Für die Ergebnisse mit einem kritischen Wert von 0,8 liegt er um etwas mehr als 7% über dem des Referenzmodells bei Szenarien mit geringem Risiko. Bei Szenarien mit hohem Risiko liegt der *Worst Case* für alle Alternativen ebenfalls sehr

Tabelle 7.6.: *Worst Case*-Szenario der verschiedenen Handlungsalternativen

<i>Geringes Risiko</i>		Referenz	KW 1,2	KW 1,0	KW 0,8
Unbefriedigte sichere Nachfrage		92330	76950	77050	76970
Logistikkosten		938902	942863	950295	1006656
<i>Hohes Risiko</i>					
Unbefriedigte sichere Nachfrage		121940	104840	93220	80480
Logistikkosten		1174848	1183858	1202798	1179597

dicht beieinander. Im Gegensatz dazu beträgt der *Worst Case* in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage für das Referenzmodell ca. 20% mehr als für die Ergebnisse mit einem kritischen Wert von 0,8 bei Betrachtung der Szenarien mit geringem Risiko. Bei Lösung der Szenarien mit hohem Risiko mit dem Referenzmodell sind es sogar rund 50% mehr. Dieses Ergebnis bestätigt das Priorisieren der unbefriedigten Nachfrage bei der Bewertung der Handlungsalternativen.

Tabelle 7.7.: Differenz zwischen möglichen Ergebnissen der verschiedenen Handlungsalternativen

<i>Geringes Risiko</i>		Referenz	KW 1,2	KW 1,0	KW 0,8
Unbefriedigte sichere Nachfrage		55620	40240	40340	40260
Logistikkosten		651963	508780	420776	293678
<i>Hohes Risiko</i>					
Unbefriedigte sichere Nachfrage		51820	65380	55710	43770
Logistikkosten		886838	709805	668382	462330

Des Weiteren wird der *Worst Case* mit dem bestmöglichen Ergebnis für jede Handlungsalternative verglichen und über die Bildung der Differenz dieser Werte die Spannweite der Ergebnisse festgehalten. In Tabelle 7.7 ist diese Spannweite für die Szenarien mit geringer und hoher Risikostufe angegeben. Bei Betrachtung der Szenarien mit geringem Risiko ist das beste Ergebnis in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage für alle

Tabelle 7.8.: Differenz der Ergebnisse zu den Ergebnissen unter perfekter Information

<i>Geringes Risiko</i>		Referenz	KW 1,2	KW 1,0	KW 0,8
Unbefriedigte Nachfrage	sichere	17446	3563	1256	892
Logistikkosten		-42267	30428	70156	224137
<i>Hohes Risiko</i>					
Unbefriedigte Nachfrage	sichere	45408	20888	12380	4223
Logistikkosten		-173921	-136394	-119215	-17803

Werte identisch und repräsentiert das Ergebnis von Szenario 0, also des Szenarios ohne weitere Epidemieausbreitungen.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass die Spannbreite der Lösungen kleiner wird, je geringer der kritische Wert ist. Das wird vor allem in Bezug auf die operationalen Kosten deutlich. Dieses Ergebnis ist schlüssig, da zukünftige Unsicherheiten bei geringerem kritischem Wert in höherem Maße berücksichtigt werden. Auf der einen Seite sorgt das dafür, dass die operationalen Kosten auch im Fall von nur geringer Epidemieausbreitung erhöht sind und der Unterschied zum *Worst Case* somit nicht mehr so groß ist. Auf der anderen Seite ist der *Worst Case* für die Ergebnisse mit einem kritischen Wert von 0,8 in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage deutlich niedriger als zum Beispiel für das Referenzmodell (siehe Tabelle 7.6). Auch in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage ist die Spannbreite bei kleinerem kritischem Wert somit geringer. Bei den Szenarien mit geringem Risiko ist die Spannbreite der unbefriedigten Nachfrage bei allen drei kritischen Werten nahezu gleichbleibend. Das passt zu dem Ergebnis, dass bei diesen Szenarien die unbefriedigte Nachfrage durch ein Senken des kritischen Wertes nicht weiter minimiert werden kann (vgl. Abschnitt 7.3). Dieses Bewertungskriterium sagt nichts über die Qualität der Lösung aus, es spiegelt lediglich die Variabilität der Ergebnisse wieder. Der Entscheidungsträger kann diese Information nutzen, um eine Einschätzung über seine Planungssicherheit bei Auswahl einer bestimmten Alternative zu erhalten. Die Spannbreite ist damit auch ein Indikator für die Ergebnisrobustheit einer Alternative: Umso geringer die Spannbreite ist, umso zuverlässiger wird ein bestimmtes Ergebnis bei Auswahl einer Alternative erreicht.

Als Benchmark werden die Ergebnisse des Modells unter perfekter Information gewählt. Der Vergleich mit dem Benchmark könnte für jedes der Szenarien durchgeführt werden, diese Informationen würden aber sehr unübersichtlich, so dass hier die durchschnittlichen Werte über alle Szenarien der zwei Risikostufen betrachtet werden. Die Ergebnisse für die Szenarien mit geringem und mit hohem Risiko sind in Tabelle 7.8 dargestellt. Es wird deutlich, dass bei den Szenarien unter geringem Risiko der kritische Wert von 0,8 zu gering ist, wenn man im Vergleich dazu die Ergebnisse mit einem kritischen Wert von 1,0 betrachtet. Die unbefriedigte Nachfrage kann im Vergleich zum Benchmark (also den Ergebnissen unter perfekter Information) nur noch geringfügig verringert werden. Die Differenz zum Benchmark in den operationalen Kosten wird jedoch nochmals deutlich größer. Für die Szenarien mit einem hohen Risiko erzielt das Modell mit einem kritischen Wert von 0,8 sowohl in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage als auch auf die Kosten Ergebnisse, die von denen unter perfekter Information nicht deutlich abweichen. Für diese Gruppe an Szenarien lohnt es sich also, den kritischen Wert geringer zu wählen.

Die negativen Einträge bedeuten, dass die Kosten für diese Rechnungen geringer waren, als bei den Ergebnissen mit der perfekten Information. Für die Szenarien mit einem geringen Risiko ist das nur beim Referenzmodell der Fall und bei den Ergebnissen mit einem hohen Risiko gilt dies für alle Modelle. Die geringeren Kosten entstehen dadurch, dass zu dem Zeitpunkt, wo sie bekannt wird, nicht mehr die gesamte Nachfrage innerhalb des betrachteten Planungshorizontes befriedigt werden kann. Im Modell mit perfekter Information ist vorher bekannt, welche Mengen ACT benötigt werden, um die gesamte Nachfrage zu befriedigen.

Das Bedauern kann nur in Bezug auf die einzelnen Kriterien ausgedrückt werden, da in multikriteriellen Entscheidungsproblemen mit konkurrierenden Zielen bezüglich der verschiedenen Kriterien unterschiedliche Alternativen optimal sind. Dadurch findet der Vergleich mit einer Alternative statt, die in der Form nicht umsetzbar wäre, da sie zusammengesetzt ist aus den besten Ergebnissen für jedes Kriterium (der sogenannte Idealzielpunkt, vgl. Kapitel 3). Darüber hinaus werden hier wieder die Durchschnittswerte über alle Szenarien betrachtet. Die Ergebnisse dieses Indikators, d.h. die Differenzen zum jeweils besten Wert, sind in Tabelle 7.9 angegeben. Für die beste Alternative ergibt sich jeweils der Wert 0. Auch diese Ergebnisse machen deutlich, dass für das geringe Risiko der Unterschied zwischen einem kritischen Wert von 1,0 und 0,8 kaum einen Mehrwert in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage bringt,

Tabelle 7.9.: Ergebnisse im Vergleich zur besten Alternative für jedes Kriterium

<i>Geringes Risiko</i>		Referenz	KW 1,2	KW 1,0	KW 0,8
Unbefriedigte Nachfrage	sichere	13870	1317	30	0
Logistikkosten		0	107977	135719	301783
<i>Hohes Risiko</i>					
Unbefriedigte Nachfrage	sichere	44085	15753	9353	0
Logistikkosten		0	7124	13871	108055

dafür aber deutlich erhöhte Kosten. Bei den Szenarien mit einem hohen Risiko kann dagegen die unbefriedigte Nachfrage noch deutlich minimiert werden. Im Vergleich zur besten Alternative (in Bezug auf die operationalen Kosten sind das die Ergebnisse des Referenzmodells) steigen die Kosten aber noch einmal deutlich an.

Die Bewertung mit den vier Indikatoren ergibt für alle Alternativen, je nach Risikostufe, die gleiche Rangfolge in Bezug auf die unbefriedigte Nachfrage. Wichtig sind jedoch auch die Betrachtung der Höhe der Verbesserung, die bei kleineren kritischen Werten eintritt, und die Betrachtung der Logistikkosten und ihrer Steigerung. Um einen Informationsverlust zu vermeiden, werden die Kriterien nicht gewichtet und zu einem Wert aggregiert, wie es in der Entscheidungstheorie oft durchgeführt wird¹. Aufgrund der geringen Anzahl an Kriterien und Alternativen kann der Entscheidungsträger die Ausprägung der Kriterien für die verschiedenen Alternativen direkt präsentiert bekommen.

Mithilfe dieser Indikatoren wird dem Entscheidungsträger eine Auswahl der Handlungsalternative in seiner akuten Situation ermöglicht. Die Bewertungen der Handlungsalternativen in den verschiedenen Risikostufen werden ihm präsentiert und er kann sich anhand seiner Erfahrungswerte und des verfügbaren Budgets für eine der Alternativen entscheiden. Anhand der oben eingeführten Indikatoren kann zusammengefasst werden, dass der Entscheidungsträger bei einer geringen Risikoeinschätzung den Ergebnissen mit einem kritischen Wert von 1,2 oder 1,0 folgen sollte. Auch die Er-

¹Methoden, bei denen Kriterien gewichtet zusammengefasst werden, sind zum Beispiel der *Analytic Hierarchy Process* oder die Nutzwertanalyse. Eine Einführung in diese Methoden ist in Belton und Stewart (2002) zu finden.

gebnisse des Referenzmodells können bei Budgetknappheit eine Alternative in diesem Hauptszenario darstellen, wenn der entsprechende Bestand an Hilfsgütern proaktiv aufgebaut wird. Bei einem hohen Risiko sind die Ergebnisse mit einem kritischen Wert von 0,8 vorzuziehen, wenn das Budget für ihre Umsetzung ausreicht.

8. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Fragestellungen zur Distributionsplanung in der humanitären Logistik betrachtet. Bei einer Untersuchung der wissenschaftlichen Literatur zu Fragestellungen aus der humanitären Logistik wurde festgestellt, dass Situationen, die im Nachgang an eine akute Katastrophe in Gebieten mit geschwächter Infrastruktur auftreten, bisher kaum untersucht wurden. Gerade wenn eine Hilfsaktion in dieser späten Phase des Katastrophenmanagements unterbrochen wird und nicht weiter laufen kann wie geplant, entstehen Situationen, die in der Literatur bisher kaum Beachtung fanden. Diese Situationen werden als *Overlapping Disasters* bezeichnet. Das Forschungsfeld wurde, nach einer Einführung in relevante Bereiche der humanitären Logistik sowie einer Abgrenzung gegenüber der kommerziellen Logistik, weiter eingegrenzt. Eine Schwierigkeit in dieser späten Phase des Katastrophenmanagements ist es handlungsfähig zu bleiben, obwohl die Ressourcen knapp sind. Die Zielsetzung, die Versorgung der Bevölkerung zu optimieren und das mit möglichst geringen finanziellen Mitteln, führte zu der Anforderung Kompromisslösungen zu generieren. Zunächst wurden daher Zielsetzungen in der wissenschaftlichen Literatur zur Lösung humanitärer Fragestellungen untersucht, sowie Methoden zur Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme. Anschließend wurde ein multikriterielles Optimierungsmodell zur Unterstützung von Lagerhaltungs- und Distributionsentscheidungen in *Overlapping Disaster* Situationen entwickelt. Mithilfe des Modells wurde eine große Anzahl an Szenarien gelöst, die vorab mit der Szenariotechnik entwickelt wurden. Die Analyse der Ergebnisse führte zu der Formulierung von Handlungsempfehlungen in Bezug auf Lagerhaltungsentscheidungen in der beschriebenen Situation.

Die Szenarien bilden eine Situation in Burundi, einem Land in Zentralafrika, ab, in der sich eine Malaria-Epidemie ausbreitet. Die medizinische Versorgung ist in Burundi mangelhaft. Darüber hinaus ist die Infrastruktur in Folge eines vergangenen Bürgerkrieges in weiten Teilen des Landes noch nicht wieder funktionsfähig. In den betrachteten Regionen im Norden Burundis traten wiederholt Malaria-Epidemien auf, die zwar gut zu behandeln sind, oftmals aber zu spät erkannt wurden, so dass sie zum Zeitpunkt

des Einschreitens schon relativ weit fortgeschritten waren. Dadurch werden Entscheidungen bezüglich der Allokation und Nachbestellung von Medikamenten erforderlich. Situationen dieser Art weisen eine große Unsicherheit auf, obwohl die Rahmenbedingungen, also das Beschaffungsnetzwerk, sowie die Gegebenheiten vor Ort aufgrund bereits laufender Hilfsaktionen bekannt sind. Die Budgetknappheit führt zudem dazu, dass nicht beliebig große Mengen an Medikamenten nachbestellt und verteilt werden können.

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Ergebnisse der Szenariolösungen mit dem Modell *mHumLog* detailliert erläutert und analysiert wurden, wird nachfolgend noch einmal auf die eingangs definierten Teilaspekte und die Erkenntnisse eingegangen, die durch ihre Bearbeitung gewonnen wurden.

8.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Den Unsicherheiten in der vorliegenden Situation, und damit dem ersten Teilaspekt, wurde durch die Berücksichtigung von Nachfragewerten, die mit einer nicht bestimm- baren Wahrscheinlichkeit in der Zukunft auftreten, begegnet (die Teilaspekte wurden in Abschnitt 2.6 definiert). In der aktuellen Situation ist die Entwicklung der Nach- fragesituation nicht bekannt. Nichtsdestotrotz ist aufgrund vergangener vergleichbarer Fälle sowie durch die Analyse von Populationsdaten bekannt, wie groß die Nachfra- ge bei Ausbreitung einer Epidemie in etwa ist. Diese Informationen werden genutzt, um möglichst gut vorzubeugen. Die Lösungen der Szenarien mit dem Modell *mHum- Log* haben gezeigt, dass die Berücksichtigung dieser unsicheren Nachfragewerte zu einer deutlich besseren Befriedigung der tatsächlich auftretenden Nachfrage führt, im Gegensatz zu einer rein reaktiven Handlungsweise. In vielen Szenarien kommen die Ergebnisse des Modells sogar an die Lösungen heran, die unter Annahme perfekter Information (also unter Bekannt sein des eintretenden Szenarios) erreicht wurden.

Durch die Definition mehrfacher Zielsetzungen in dem Modell *mHumLog* wird ein Kompromiss gefunden zwischen einer möglichst guten Vorbereitung auf mögliche zu- künftige Epidemieausbreitungen und der Minimierung von Logistikkosten. Ein solcher Kompromiss wurde in Teilaspekt 2 gefordert. Es wurde deutlich, dass eine Berück- sichtigung unsicherer Nachfragewerte die Kosten in vielen Szenarien kaum oder gar nicht erhöht, die Versorgung der Bevölkerung jedoch deutlich verbessert. Es wurden zwei Methoden zur Lösung des multikriteriellen Optimierungsmodells umgesetzt. Die

Methode der gewichteten Summe überzeugt vor allem durch die einfache Umsetzung und die Lösbarkeit der Modelle in einer relativ kurzen Zeit. Auf der anderen Seite muss hier eine ausführliche Sensitivitätsanalyse stattfinden, um gute Gewichtungsfaktoren zu ermitteln. Die *Constraint* Methode benötigt mehr Rechenzeit und -kapazität, um die Szenarien zu lösen. Sie erzielt jedoch ohne eine intensive Analyse der Parameter Ergebnisse, die zum Teil nah an den Lösungen unter Annahme perfekter Information liegen. Die Erfüllung des Teilaspekts 3 ergibt sich für die einzelnen Szenarien aus den Lösungen mit dem mathematischen Modell. Die Lösungen definieren die Mengen, die nachbestellt werden sollen, sowie die Verteilung der Hilfsgüter im Netzwerk. In der akuten Situation hat der Entscheidungsträger jedoch keine Zeit und auch nicht die Möglichkeiten, eine mathematische Optimierung durchzuführen, bevor er Distributionspläne macht. Darüber hinaus ist die Ausprägung des konkreten Szenarios unbekannt und die finanziellen Mittel sind in der Regel knapp, was die Entscheidungsfindung abermals erschwert. Durch die Analyse der Distributionsfaktoren in Kapitel 7 wurde erkannt, dass die Qualität der Entscheidung vor allem von der Risikostufe und von dem bereits in den Lagern vorhandenen Hilfsgütermengen im Vergleich zur sicheren Nachfrage abhängt. Weitere Distributionsfaktoren können unberücksichtigt bleiben. Die Risikostufe ergibt sich aus den von Protopopoff u. a. (2009) definierten Faktoren, die in Malaria-Epidemie gefährdeten Gebieten grundsätzlich nachgehalten werden sollten. Die Menge an Hilfsgütern in den Lagern kann der Entscheidungsträger in der akuten Entscheidung schnell abschätzen und die sichere Nachfrage in den Regionen ist ohnehin bekannt, da die Hilfsaktion bereits etabliert ist. Es wurden drei Handlungsalternativen aufgezeigt: Der Entscheidungsträger kann den Empfehlungen der *Constraint* Methode mit einem kritischen Wert von 1,2 folgen oder denen mit einem kritischen Wert von 0,8. Auch die Lösung mit dem Referenzmodell kann eine Alternative bei absoluter Budgetknappheit und einer niedrigen Risikostufe sein, wenn die Nachbestellungen proaktiv erfolgen und nicht erst, nachdem sich die Epidemie schon weiter ausgebreitet hat. Damit ist auch der letzte Teilaspekt, eine einfach anzuwendende Entscheidungsunterstützung, erfüllt. Die in Abschnitt 2.6 definierten Ziele wurden damit vollständig erreicht.

8.2. Limitationen der vorliegenden Arbeit

Verschiedene Einschränkungen mussten vorgenommen werden, um den Untersuchungsgegenstand im Rahmen dieser Arbeit abbilden zu können. Generell bildet die hier untersuchte Forschungsfrage nur einen kleinen Ausschnitt einer Hilfsaktion ab. Die Analyse der Unterbrechung einer Hilfsaktion in ihrer Gesamtheit umfasst weitere Aspekte neben der Nachbestellung und Umverteilung der Hilfsgüter.

Das Modell wurde bisher nur für eine Ausgangssituation, das Auftreten einer Malaria-Epidemie in Burundi, angewendet. Grundsätzlich können mit dem Modell *mHumLog* auch andere Situationen analysiert werden, die die Unterbrechung einer Hilfsaktion zur Folge haben. So könnten beispielsweise die Verbreitung anderer Krankheiten oder auch die Abbildung sehr unsicherer Nachfragesituationen ausgelöst durch Flüchtlingsströme abgebildet werden. Aufgrund der notwendigerweise intensiven Beschäftigung mit der Situation vor Ort zur Modellierung der Ausgangssituation und zur Erstellung der Szenarien war die Betrachtung anderer Fragestellungen im Zuge dieser Arbeit nicht möglich. Das mathematische Modell ist jedoch in seiner Struktur so allgemein formuliert, dass es ohne aufwendige Anpassungen auch für andere Ausgangssituationen anwendbar ist.

Eine weitere Einschränkung musste in Bezug auf die Datenbasis vorgenommen werden. Aufgrund der oftmals chaotischen Zustände in humanitären Hilfsprojekten ist es kaum möglich realistische Daten zu erhalten. Auch Gespräche mit humanitären Logistikern haben gezeigt, dass exakte Daten, wie sie für ein Optimierungsmodell nötig wären, kaum erhoben werden können. Die Logistiker wissen bestenfalls, ob eine Lieferung angekommen ist oder nicht, wenn sie überhaupt eine Rückmeldung aus der betroffenen Region bekommen. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit Annahmen getroffen, basierend auf den tatsächlichen Gegebenheiten vor Ort und mithilfe von humanitären Logistikern, die in Burundi tätig waren. Der Anwendungsfall bezieht sich jedoch nicht auf eine tatsächliche Epidemie in Burundi und das Modell konnte auch nicht an einem realen Projekt getestet werden.

Abschließend muss erwähnt werden, dass das Modell mit deterministischen Transportzeiten, -kapazitäten und Nachfragewerten gelöst wurde. Nach Gesprächen mit humanitären Logistikern aus der Wissenschaft und Praxis müssten diese Werte stochastisch modelliert werden, um ein realistisches Bild zu zeichnen. Selbst in Fragestellungen aus der Wiederherstellungsphase sind die Unsicherheiten noch so groß, dass

die Annahme eines deterministischen Distributionsnetzwerkes eine Vereinfachung der tatsächlichen Situation darstellt. Da das hier aufgestellte Modell eine erste Annäherung an das bisher kaum untersuchte Forschungsfeld der *Overlapping Disaster* ist, wurde vorerst darauf verzichtet, stochastische Werte zu berücksichtigen. Durch das Lösen zahlreicher Szenarien wurde in den Nachfragewerten eine gewisse Unsicherheit abgebildet, das Distributionsnetzwerk wurde jedoch als deterministisch angenommen.

8.3. Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen

Ein Teil der weiterführenden Forschungsthemen ergibt sich direkt aus den Grenzen der vorliegenden Arbeit, die im vorangegangenen Abschnitt aufgeführt wurden. So würde zum Beispiel die Berücksichtigung stochastischer Distributionsfaktoren interessante Erkenntnisse liefern. Auf der anderen Seite würde die Lösbarkeit der Modelle, die ohnehin schon sehr zeitaufwendig ist, abermals erschwert. An dieser Stelle könnten die Lösungsmethoden ein weiterer Ansatz sein, die Forschungsarbeit fortzuführen. Neben den exakten Lösungsmethoden wurden auch heuristische Methoden zur Lösung multikriterieller Modelle erwähnt. Die Entwicklung einer solchen Lösungsmethode für das Modell *mHumLog* könnte die Lösung der Szenarien deutlich beschleunigen. Als Benchmark für die Ergebnisse der Heuristik könnten die Ergebnisse mit den beiden hier eingesetzten Lösungsmethoden dienen.

Das mathematische Modell *mHumLog* kann ohne großen Aufwand zur Betrachtung mehrerer Hilfsgüter erweitert werden. Dies würde auf der anderen Seite abermals den Rechenaufwand erhöhen, in vielen Fragestellungen ist die gemeinsame Betrachtung von Hilfsgütern, die in einer Region benötigt werden, jedoch erforderlich, damit die Ergebnisse des Modells anwendbar sind.

In Bezug auf das mathematische Modell könnte darüber hinaus der Planungshorizont erweitert werden. So wäre es zum Beispiel möglich, keinen fixen Zeithorizont zu betrachten, sondern diesen bei jeder neuen Unterbrechung der Hilfsaktion wieder zu erweitern. Das würde verhindern, dass am Ende des Planungshorizontes Bedarf nicht mehr befriedigt werden kann, weil die Lieferung innerhalb des betrachteten Zeitraums nicht am Nachfrageort ankommen kann. Natürlich würde auch diese Erweiterung die Laufzeit der Modelle erhöhen. Stadtler (2000) äußert in seiner Arbeit die Idee, weiter in der Zukunft liegende Nachfragewerte lediglich abzuschätzen und in die Planung einfließen zu lassen, wohingegen die nächsten Perioden exakt geplant werden. Eine solche

Vorgehensweise kann dazu führen, dass das Modell trotz eines rollierenden Planungshorizontes, der weiter in die Zukunft reicht, gut lösbar bleibt.

Es wäre auch interessant, eine gesamtheitliche Betrachtung der *Overlapping Disasters* vorzunehmen. Diese würde nicht nur die Verteilung der Hilfsgüter betrachten, sondern auch andere Fragestellungen, die sich aus der Unterbrechung einer Hilfsaktion ergeben. Es kann zum Beispiel notwendig sein, die weitere Planung der Hilfsaktion zu überdenken, und auch die konkrete Verteilung der Hilfsgüter vor Ort bis zu den betroffenen Menschen ebenso wie die Beschaffung könnten analysiert werden.

Abschließend können auch strategische Untersuchungen von *Overlapping Disaster* Situationen interessant sein. Diese könnten helfen, schon vor dem ersten Auftreten einer Unterbrechung der Hilfsaktion eventuelle Störungen mit einzubeziehen und auch hier schon ein proaktives Handeln zu ermöglichen. Eine solche Betrachtung ist jedoch nur in sehr unsicheren Umfeldern zu empfehlen, da die Kosten sonst den Nutzen übersteigen.

Durch die strategische Betrachtung, das Einbetten der Lagerhaltungsentscheidung in einen ganzheitlichen Kontext und die Analyse verschiedener Arten von *Overlapping Disaster* Situationen können Auswirkungen von Veränderungen der Ausgangssituation auf die Handlungsempfehlungen untersucht werden. Ein interessantes Forschungsfeld wäre in dem Zuge die Entwicklung von allgemein anwendbaren Handlungsempfehlungen für verschiedene *Overlapping Disaster* Situationen, die auf die akute Situation angepasst werden können, ohne ein erneutes Lösen des Modells *mHumLog* notwendig werden zu lassen. Damit könnten humanitäre Logistiker schnell und einfach in ihrer Arbeit unterstützt werden.

Es gibt also noch viele lohnende Forschungsfelder im Bereich von *Overlapping Disasters* und auch die weiterführende Arbeit mit dem Modell *mHumLog* verspricht interessante Erkenntnisse. Wichtig ist dabei, den Fokus nicht nur auf die theoretischen Analysen zu richten, sondern auch vermehrt auf den Bedarf von humanitären Logistikern an einfach anwendbarer Unterstützung in Krisensituationen.

Anhang A.

Humanitäre Hilfe in der wissenschaftlichen Literatur

A.1. Definitionen der Katastrophenmanagement-Phasen

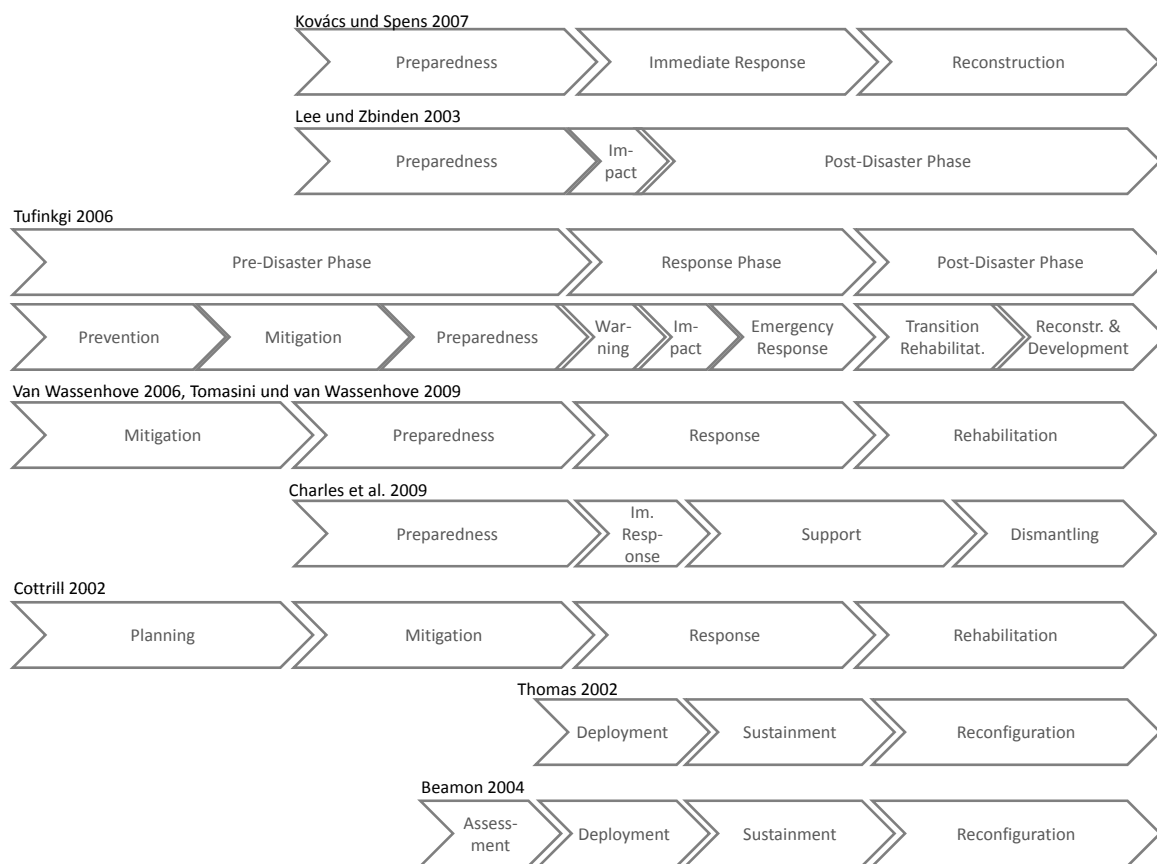


Abbildung A.1.: Die Katastrophenmanagement-Phasen nach verschiedenen Autoren

A.2. Zielsetzungen in der humanitären Logistik

Tabelle A.1.: Zielsetzungen in multikriteriellen Modellen in der humanitären Logistik

Zielkriterium	Quelle
Operationale Kosten	Haghani und Oh (1996); Barbarosoğlu u. a. (2002); Barbarosoğlu und Arda (2004); Clark und Culkin (2013); Chang u. a. (2007); Mete und Zabinsky (2007); Sheu (2007); Tzeng u. a. (2007); Doerner u. a. (2009); Mete und Zabinsky (2010); Ortuño u. a. (2011); Rawls und Turnquist (2010); Vitoriano u. a. (2011); Holguín-Veras u. a.; Bozorgi-Amiri u. a. (2013); Rawls und Turnquist (2011); Consuelos Salas u. a. (2012); Rawls und Turnquist (2012)
Nachfrage	Haghani und Oh (1996); Fiedrich u. a. (2000); Viswanath und Peeta (2003); Barbarosoğlu und Arda (2004); Clark und Culkin (2013); Chang u. a. (2007); Mete und Zabinsky (2007); Sheu (2007); Yi und Özdamar (2007); Yan und Shih (2009); Mete und Zabinsky (2010); Ortuño u. a. (2011); Rawls und Turnquist (2010); Bozorgi-Amiri u. a. (2013); Lin u. a. (2011); Rawls und Turnquist (2011); Consuelos Salas u. a. (2012); Rawls und Turnquist (2012)
Transportzeit	Fiedrich u. a. (2000); Viswanath und Peeta (2003); Mete und Zabinsky (2007); Nolz u. a. (2007); Tzeng u. a. (2007); Mete und Zabinsky (2010); Ortuño u. a. (2011); Lin u. a. (2011)
Zuverlässigkeit	Fiedrich u. a. (2000); Doerner u. a. (2009); Ortuño u. a. (2011); Vitoriano u. a. (2011); Bozorgi-Amiri u. a. (2013)
Fairness	Drezner u. a. (2006); Nolz u. a. (2007); Tzeng u. a. (2007); Yan und Shih (2009); Ortuño u. a. (2011); Vitoriano u. a. (2011); Lin u. a. (2011); Rawls und Turnquist (2011)
Entfernung	Drezner u. a. (2006); Nolz u. a. (2007); Doerner u. a. (2009); Rawls und Turnquist (2011)
Gesamtdauer	Fiedrich u. a. (2000); Barbarosoğlu u. a. (2002); Yan und Shih (2009); Vitoriano u. a. (2011)

A.3. Szenarien in der humanitären Logistik

	<i>Verwendung realer Daten</i>	<i>Anzahl Szenarien</i>	<i>Erdbeben</i>	<i>Hurricane</i>	<i>Flut</i>	<i>Sonstige</i>
Barbarosoğlu und Arda (2004)		8	X			
Balçık und Beamon (2008)	X	286	X			
Bozorgi-Amiri u. a. (2013)	X	4	X			
Consuelos Salas u. a. (2012)		60		X		
Chang u. a. (2007)		3			X	
Falasca und Zobel (2011)		9				X
Jia u. a. (2007)		3				X
Martel u. a. (2013)		50				X
Mete und Zabinsky (2007)		6	X			
Mete und Zabinsky (2010)		6	X			
Rawls und Turnquist (2010, 2011)		51		X		
Rawls und Turnquist (2012)		33		X		
Salmerón und Apte (2010)		5			X	
Sheu (2007)	X	9	X			
Sherali u. a. (1991)		6		X		
Taskin und Lodree (2010)		6		X		
De Treville u. a. (2006)	X	7				X
Tamura u. a. (2000)		3	X			
Uribe-Sánchez u. a. (2011)	X	2				X
Yi und Özdamar (2007)		2	X			
Zhu u. a. (2008)		6	X			

Tabelle A.2.: Szenarien in quantitativen Modellen zur Lösung von Fragestellungen in der humanitären Logistik

	<i>Optimierung über Wahrscheinlichkeiten</i>	<i>Stochastische Programmierung</i>	<i>Ergebnisvergleich</i>	<i>Entscheidungsbaum</i>	<i>Simulation</i>
Barbarosoğlu und Arda (2004)	X				
Balçık und Beamon (2008)	X				
Bozorgi-Amiri u. a. (2013)	X	X			
Consuelos Salas u. a. (2012)		X			
Chang u. a. (2007)		X			
Falasca und Zobel (2011)		X			
Jia u. a. (2007)			X		
Martel u. a. (2013)		X			
Mete und Zabinsky (2007)	X				
Mete und Zabinsky (2010)	X				
Rawls und Turnquist (2010, 2011)		X			
Rawls und Turnquist (2012)		X			
Salmerón und Apte (2010)		X			
Sheu (2007)			X		
Sherali u. a. (1991)			X		
Taskin und Lodree (2010)		X			
De Treville u. a. (2006)					
Tamura u. a. (2000)				X	
Uribe-Sánchez u. a. (2011)					X
Yi und Özdamar (2007)	X				
Zhu u. a. (2008)	X				

Tabelle A.3.: Methoden zur Lösung der Szenarien zu Fragestellungen in der humanitären Logistik

Anhang B.

Karten - Afrika und Burundi

B.1. Afrika - Übersicht Staaten



Abbildung B.1.: Übersichtskarte von Afrika mit Ländergrenzen (Aktion Deutschland hilft)

B.2. Burundi und seine Provinzen

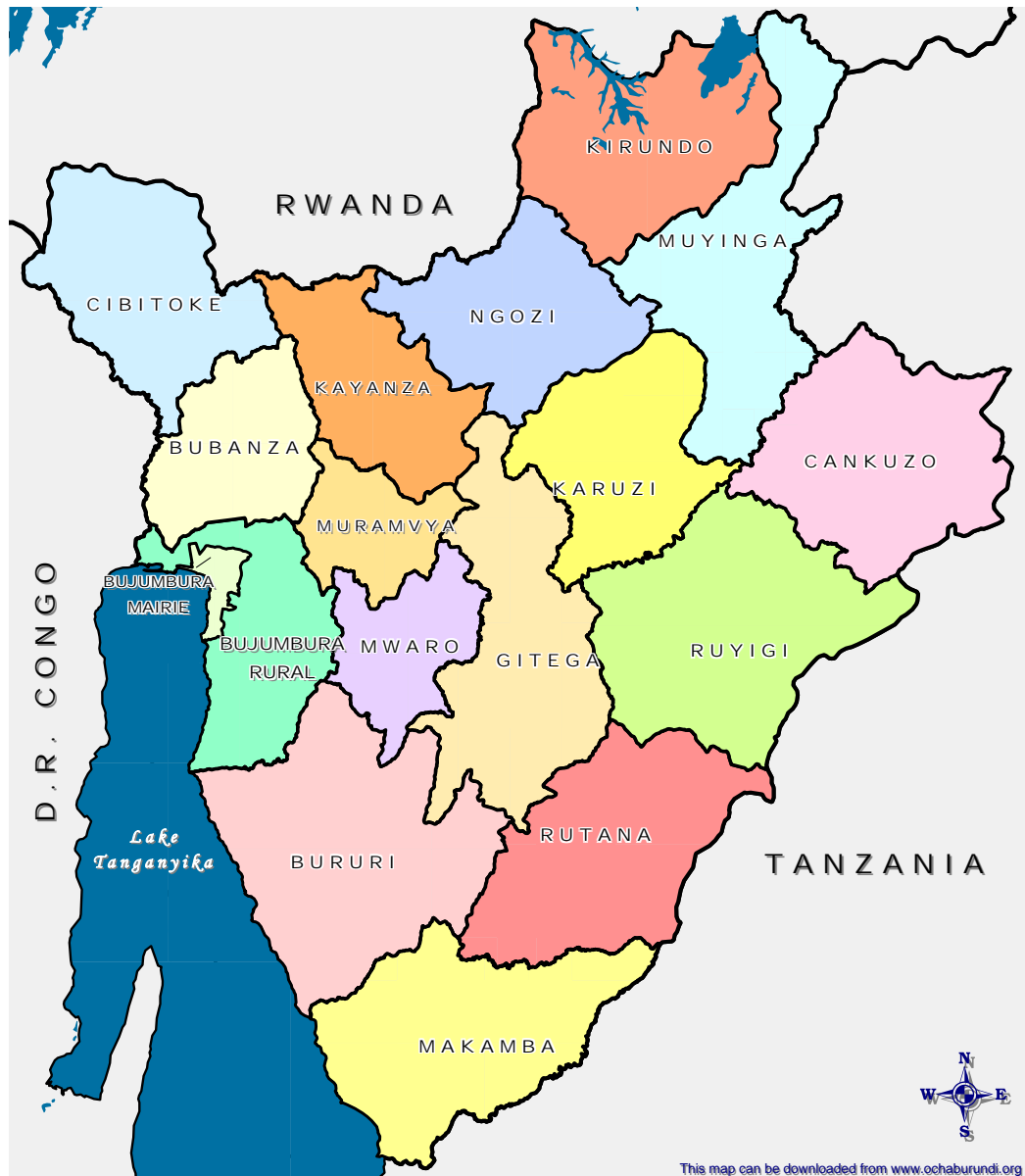


Abbildung B.2.: Übersichtskarte von Burundi und den 17 Provinzen (Office for the Coordination of Humanitarian Affairs - Burundi, 2004)

Anhang C.

Vollständiger Datensatz des Anwendungsbeispiels

C.1. Beschreibung der Ist-Situation

Regionallager: Kayanza 1 (RL 1), Ngozi 1 (RL 2), Ngozi 2 (RL 3), Karuzi 1 (RL 4), Kayanza 2 (RL 5)

Planungshorizont: 10 Perioden (entspricht 10 Tagen)

Tabelle C.1.: Nachfragedaten in den Regionallagern (RL) in Einheiten ACT

Lager/Periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RL 1	19.100	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000	2000
RL 2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
RL 3	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
RL 4	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
RL 5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle C.2.: Unsichere Nachfrage in den Regionallagern (RL) in Einheiten ACT

Lager/Periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RL 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RL 2	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
RL 3	0	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
RL 4	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
RL 5	0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Transportkosten (pro Einheit ACT): 2 GE

Fixe Transportkosten (pro Fahrzeug): 200 GE

Transportzeit: 2 Perioden

Transportkapazität: 2500 Einheiten ACT

Transshipmentkosten (pro Einheit ACT): 1 GE

Fixe Transshipmentkosten (pro Fahrzeug): 200 GE

Transshipmentzeit: 1 Periode

Transshipmentkapazität: 2500 Einheiten ACT

Kosten für die Nachbestellung (pro Einheit ACT): 16 GE

Fixe Nachbestellungskosten (pro Bestellung): 400 GE

Lieferzeit: 3 Perioden

Lagerhaltungskosten: 0,1 GE

Startbestand im Zentrallager: 20.000 Einheiten ACT

Startbestand in den Regionallagern: 0 Einheiten (RL 1), 1000 Einheiten (RL 2), 800 Einheiten (RL 3), 1500 Einheiten (RL 4), 1000 Einheiten (RL 5)

Tabelle C.3.: Strafkosten für unbefriedigte sichere Nachfrage (pro Einheit ACT)

Lager/# Pe- rioden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RL 1	90	140	190	240	290	340	390	440	490	540
RL 2	90	140	190	240	290	340	390	440	490	540
RL 3	90	140	190	240	290	340	390	440	490	540
RL 4	90	140	190	240	290	340	390	440	490	540
RL 5	90	140	190	240	290	340	390	440	490	540

Tabelle C.4.: Strafkosten für unbefriedigte unsichere Nachfrage (pro Einheit ACT)

Lager/# Pe- rioden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RL 1	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
RL 2	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
RL 3	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
RL 4	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
RL 5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5

C.2. Alle Haupt- und Einzelszenarien

Szenario	Hauptszenario	RL	Periode
1.1	Geringes Risiko	RL 2	Per 2
1.2	Geringes Risiko	RL 3	Per 4
1.3	Geringes Risiko	RL 4	Per 7
1.4	Geringes Risiko	RL 5	Per 3
1.5	Geringes Risiko	RL 2	Per 4
1.6	Geringes Risiko	RL 3	Per 5
1.7	Geringes Risiko	RL 4	Per 3
1.8	Geringes Risiko	RL 5	Per 6
1.9	Geringes Risiko	RL 2	Per 8
1.10	Geringes Risiko	RL 3	Per 2
1.11	Geringes Risiko	RL 4	Per 2
1.12	Geringes Risiko	RL 5	Per 4
1.13	Geringes Risiko	RL 2	Per 6
1.14	Geringes Risiko	RL 3	Per 7
1.15	Geringes Risiko	RL 4	Per 5
1.16	Geringes Risiko	RL 5	Per 2
1.17	Geringes Risiko	RL 2	Per 5
1.18	Geringes Risiko	RL 3	Per 4
1.19	Geringes Risiko	RL 4	Per 9
1.20	Geringes Risiko	RL 5	Per 9

2.1	Geringes Risiko	RL 2, 3	Per 2, 2
2.2	Geringes Risiko	RL 2, 4	Per 2, 4
2.3	Geringes Risiko	RL 2, 5	Per 5, 8
2.4	Geringes Risiko	RL 3, 5	Per 4, 3
2.5	Geringes Risiko	RL 4, 5	Per 2, 3
2.6	Geringes Risiko	RL 2, 3	Per 6, 2
2.7	Geringes Risiko	RL 2, 4	Per 2, 5
2.8	Geringes Risiko	RL 2, 5	Per 4, 3
2.9	Geringes Risiko	RL 2, 4	Per 9, 3
2.10	Geringes Risiko	RL 3, 5	Per 5, 5
2.11	Geringes Risiko	RL 4, 5	Per 7, 3
2.12	Geringes Risiko	RL 2, 3	Per 2, 7
2.13	Geringes Risiko	RL 2, 4	Per 7, 5
2.14	Geringes Risiko	RL 2, 5	Per 3, 9
2.15	Geringes Risiko	RL 3, 4	Per 8, 2
2.16	Geringes Risiko	RL 3, 5	Per 8, 5
2.17	Geringes Risiko	RL 4, 5	Per 3, 2
3.1	Hohes Risiko	RL 2, 3, 4	Per 2, 3, 6
3.2	Hohes Risiko	RL 2, 4, 5	Per 2, 4, 8
3.3	Hohes Risiko	RL 2, 3, 5	Per 7, 3, 6
3.4	Hohes Risiko	RL 3, 4, 5	Per 6, 3, 2
3.5	Hohes Risiko	RL 2, 3, 4	Per 4, 2, 6
3.6	Hohes Risiko	RL 2, 4, 5	Per 4, 3, 3
3.7	Hohes Risiko	RL 2, 3, 5	Per 2, 7, 5
3.8	Hohes Risiko	RL 3, 4, 5	Per 5, 3, 2
3.9	Hohes Risiko	RL 2, 3, 4	Per 2, 4, 6
3.10	Hohes Risiko	RL 2, 4, 5	Per 5, 9, 2
3.11	Hohes Risiko	RL 2, 3, 5	Per 4, 2, 9
3.12	Hohes Risiko	RL 3, 4, 5	Per 6, 2, 4
3.13	Hohes Risiko	RL 2, 3, 5	Per 5, 7, 9
3.14	Hohes Risiko	RL 3, 4, 5	Per 8, 7, 5
3.15	Hohes Risiko	RL 2, 3, 4	Per 9, 5, 6

3.16	Hohes Risiko	RL 2, 4, 5	Per 8, 6, 7
4.1	Hohes Risiko	alle RL	Per 6, 5, 8, 2
4.2	Hohes Risiko	alle RL	Per 3, 2, 4, 9
4.3	Hohes Risiko	alle RL	Per 7, 8, 9, 9
4.4	Hohes Risiko	alle RL	Per 7, 6, 3, 2

Anhang D.

Ergebnisse der Szenarien

Im Folgenden werden die Ergebnisse für alle berechneten Szenarien in Kürze dargestellt. Beginnend mit den Ergebnissen des Referenzmodells. Anschließend folgen die Ergebnisse des Modells unter perfekten Informationen und die Ergebnisse mit der Methode der gewichteten Summe sowie mit der *Constraint* Methode.

D.1. Referenzmodell

Tabelle D.1.: Ergebnisse aller Szenarien mit dem Referenzmodell

Szenario	Unbefriedigte Nachfrage	operationale Kosten
0	36710	286939
1.1	47410	451166
1.2	71840	667034
1.3	52970	288521
1.4	46600	433437
1.5	46560	414556
1.6	76810	617109
1.7	61550	578227
1.8	46730	288732
1.9	42080	288396
1.10	77430	776494
1.11	62360	614061
1.12	46560	414556
1.13	46730	288732

1.14	63180	288131
1.15	61530	509029
1.16	47410	451166
1.17	46730	399081
1.18	75840	667884
1.19	42560	288426
1.20	39610	288476
2.1	92330	938902
2.2	72660	704091
2.3	52730	398681
2.4	90940	812821
2.5	74620	758327
2.6	90500	778273
2.7	69230	668148
2.8	60940	560271
2.9	64450	579227
2.10	91410	724709
2.11	62870	433626
2.12	73080	454217
2.13	71530	508829
2.14	49500	434437
2.15	71280	614633
2.16	64730	398481
2.17	73170	740177
3.1	113810	886400
3.2	78560	705991
3.3	95510	723500
3.4	112380	739798
3.5	119270	902968
3.6	91090	848906
3.7	85240	560758
3.8	112380	1065798

3.9	115730	830148
3.10	61320	559857
3.11	93000	904298
3.12	113730	740898
3.13	79730	398481
3.14	84730	398281
3.15	109210	615909
3.16	77530	288681
4.1	110150	778200
4.2	121940	1174848
4.3	70120	288010
4.4	86990	752500

D.2. Perfekte Information

Tabelle D.2.: Ergebnisse aller Szenarien unter der Annahme perfekter Information

Szenario	Unbefriedigte Nachfrage	operationale Kosten
0	36710	286939
1.1	44320	449420
1.2	45230	666927
1.3	36710	431804
1.4	41230	431311
1.5	39230	413561
1.6	39710	612941
1.7	46320	576150
1.8	36710	377459
1.9	36710	341359
1.10	64320	775336
1.11	54320	612350

1.12	39230	413561
1.13	36710	377459
1.14	36710	504541
1.15	38710	504204
1.16	44320	449420
1.17	37710	395609
1.18	45230	666927
1.19	36710	359419
1.20	36710	323179
2.1	74320	937656
2.2	50320	702870
2.3	37710	450079
2.4	50230	811463
2.5	60320	757070
2.6	64320	865856
2.7	46320	666670
2.8	44230	558131
2.9	46320	612390
2.10	40710	721611
2.11	41230	576361
2.12	44320	666972
2.13	38710	576724
2.14	41230	467551
2.15	54320	775252
2.16	37710	558761
2.17	56320	738870
3.1	53320	1010106
3.2	43230	703081
3.3	52320	883976
3.4	56320	1010222
3.5	67320	1082828
3.6	55320	847590

3.7	45320	775492
3.8	59320	1064622
3.9	53320	1010222
3.10	45320	630435
3.11	67320	938296
3.12	57320	1010422
3.13	37710	649451
3.14	37710	703426
3.15	39710	829981
3.16	36710	594944
4.1	47320	974357
4.2	76320	1209346
4.3	36710	631096
4.4	56320	1082742

D.3. Methode der gewichteten Summe

Tabelle D.3.: Ergebnisse aller Szenarien mit der Methode der gewichteten Summe

Szenario	Strafkosten	Unbefriedigte Nachfrage	operationale Kosten
0	1	36710	337419
	1,5	36710	435439
	2,5	36710	732439
1.1	1	46130	452430
	1,5	46030	453610
	2,5	46030	730275
1.2	1	55080	667496
	1,5	47850	668634
	2,5	45630	745091
1.3	1	44870	340039

	1,5	39710	440339
	2,5	36710	731964
1.4	1	42340	433521
	1,5	42080	434715
	2,5	42030	693571
1.5	1	39710	414436
	1,5	39710	434671
	2,5	39710	693871
1.6	1	65160	619144
	1,5	46960	621765
	2,5	39710	696479
1.7	1	50450	578262
	1,5	47980	578200
	2,5	48080	691960
1.8	1	38070	299091
	1,5	36710	437439
	2,5	36710	696239
1.9	1	37220	299459
	1,5	36710	437039
	2,5	36710	694939
1.10	1	70880	777537
	1,5	66070	777111
	2,5	66150	853448
1.11	1	56080	614474
	1,5	55930	614740
	2,5	56080	712560
1.12	1	39710	414436
	1,5	39610	434671
	2,5	39610	693571
1.13	1	38040	299061
	1,5	36710	438339
	2,5	36710	695807
1.14	1	48080	300921

	1,5	36710	438639
	2,5	36710	695371
1.15	1	51720	508655
	1,5	40110	512689
	2,5	38710	696507
1.16	1	46130	451311
	1,5	46030	452465
	2,5	46030	700030
1.17	1	41040	398851
	1,5	38310	438909
	2,5	37710	696207
1.18	1	59460	667161
	1,5	47770	668755
	2,5	45710	744171
1.19	1	38560	299739
	1,5	36710	436739
	2,5	36710	695039
1.20	1	37350	298671
	1,5	36710	435239
	2,5	36710	695239
2.1	1	83550	940696
	1,5	78230	940644
	2,5	75870	996168
2.2	1	65480	705165
	1,5	56170	705524
	2,5	52030	780575
2.3	1	44180	399228
	1,5	40710	438959
	2,5	37710	731139
2.4	1	77570	812884
	1,5	60930	812640
	2,5	51030	869811
2.5	1	70330	758570

	1,5	61730	758320
	2,5	61880	836706
2.6	1	78950	778884
	1,5	69740	779008
	2,5	67150	855548
2.7	1	69600	672318
	1,5	61140	669136
	2,5	48130	750376
2.8	1	50840	560151
	1,5	45080	560615
	2,5	45030	691171
2.9	1	51350	578778
	1,5	48880	578716
	2,5	48080	692860
2.10	1	79500	726574
	1,5	56100	728173
	2,5	40710	784079
2.11	1	49800	434353
	1,5	47340	436945
	2,5	42030	695771
2.12	1	59800	453718
	1,5	58000	455542
	2,5	46130	697264
2.13	1	57620	509455
	1,5	42680	511743
	2,5	38710	697607
2.14	1	43240	434072
	1,5	42980	435535
	2,5	42340	693331
2.15	1	64800	615206
	1,5	64490	618052
	2,5	56080	726124
2.16	1	49990	399670

	1,5	40270	442145
	2,5	37710	692039
2.17	1	68870	739970
	1,5	58440	740171
	2,5	57980	816421
3.1	1	105970	885320
	1,5	91570	885820
	2,5	72690	931542
3.2	1	71380	707065
	1,5	62070	706434
	2,5	52030	782275
3.3	1	81190	724540
	1,5	76370	725172
	2,5	60790	800442
3.4	1	91580	739441
	1,5	86720	743227
	2,5	61800	816887
3.5	1	102720	903811
	1,5	86640	904535
	2,5	75020	955411
3.6	1	77720	848859
	1,5	64030	848575
	2,5	57190	905466
3.7	1	72800	562518
	1,5	67600	563206
	2,5	47130	696721
3.8	1	106580	1065441
	1,5	101720	1070375
	2,5	70480	1069180
3.9	1	102530	830591
	1,5	84800	832567
	2,5	59340	889576
3.10	1	56800	562518

	1,5	53200	562018
	2,5	47130	695476
3.11	1	84450	904795
	1,5	70250	905201
	2,5	69150	955359
3.12	1	99850	740741
	1,5	86050	744508
	2,5	66800	818689
3.13	1	58470	401115
	1,5	44690	440152
	2,5	37710	693539
3.14	1	60210	399094
	1,5	48600	444183
	2,5	37710	693939
3.15	1	85560	618279
	1,5	61100	619183
	2,5	40610	692849
3.16	1	52720	301655
	1,5	40880	440851
	2,5	36710	697239
4.1	1	109230	783039
	1,5	99730	786255
	2,5	63400	838988
4.2	1	114550	1175175
	1,5	101940	1175473
	2,5	82700	1175710
4.3	1	49060	301450
	1,5	39560	440348
	2,5	36710	692139
4.4	1	97580	739641
	1,5	92720	743227
	2,5	65700	818877

D.4. *Constraint* Methode

Tabelle D.4.: Ergebnisse aller Szenarien mit der *Constraint* Methode

Szenario	Kritischer Wert	Unbefriedigte Nachfrage	operationale Kosten
0	KW12	36710	505159
	KW10	36710	531521
	KW08	36710	765535
1.1	KW12	46130	511345
	KW10	46130	597102
	KW08	46130	777463
1.2	KW12	48620	691620
	KW10	45710	704762
	KW08	45710	754506
1.3	KW12	36710	508814
	KW10	36710	533883
	KW08	36710	765674
1.4	KW12	42030	533184
	KW10	42030	640344
	KW08	42130	789177
1.5	KW12	39710	476531
	KW10	39710	546071
	KW08	39710	762547
1.6	KW12	49590	666432
	KW10	41410	646726
	KW08	39710	767394
1.7	KW12	47930	608135
	KW10	48810	600443
	KW08	48080	793898
1.8	KW12	36710	472168
	KW10	36710	533556
	KW08	36710	765032
1.9	KW12	36710	472467

	KW10	36710	532537
	KW08	36710	764835
1.10	KW12	69490	790487
	KW10	67070	812520
	KW08	67070	842495
1.11	KW12	55930	646303
	KW10	55930	717004
	KW08	56080	851508
1.12	KW12	39610	434083
	KW10	39610	529519
	KW08	39710	719524
1.13	KW12	36710	473367
	KW10	36710	533837
	KW08	36710	714229
1.14	KW12	36710	475559
	KW10	36710	535067
	KW08	36710	712978
1.15	KW12	40400	535799
	KW10	38710	533027
	KW08	38710	715747
1.16	KW12	46030	479548
	KW10	46030	608802
	KW08	46130	765836
1.17	KW12	38420	473220
	KW10	37890	533257
	KW08	37710	766008
1.18	KW12	52500	672555
	KW10	45630	664261
	KW08	45630	782208
1.19	KW12	36710	471586
	KW10	36710	531321
	KW08	36710	765335
1.20	KW12	36710	470800

	KW10	36710	531726
	KW08	36710	765435
2.1	KW12	76950	942863
	KW10	77050	950295
	KW08	76970	1006656
2.2	KW12	57120	719765
	KW10	52130	710271
	KW08	52130	779096
2.3	KW12	37710	508442
	KW10	37890	534057
	KW08	37710	765708
2.4	KW12	64590	816894
	KW10	51030	836707
	KW08	51130	880343
2.5	KW12	65960	794849
	KW10	61730	802743
	KW08	61980	856695
2.6	KW12	71970	790747
	KW10	67070	812378
	KW08	67070	842694
2.7	KW12	59450	701553
	KW10	50060	708283
	KW08	48130	779916
2.8	KW12	45030	608040
	KW10	45030	645890
	KW08	45130	799034
2.9	KW12	49110	608857
	KW10	49710	601491
	KW08	48080	793798
2.10	KW12	61150	737809
	KW10	48240	765962
	KW08	40710	767785
2.11	KW12	42030	535390

	KW10	42030	643297
	KW08	42130	790687
2.12	KW12	51190	521712
	KW10	46130	600546
	KW08	46130	780646
2.13	KW12	45060	535199
	KW10	38710	532845
	KW08	38710	767127
2.14	KW12	42130	501650
	KW10	42850	531925
	KW08	42130	772807
2.15	KW12	58210	648427
	KW10	55930	718504
	KW08	56080	851208
2.16	KW12	40970	475970
	KW10	38270	535806
	KW08	37710	764213
2.17	KW12	58900	753091
	KW10	57730	751776
	KW08	57980	825552
3.1	KW12	79660	891783
	KW10	81890	899527
	KW08	63970	1003151
3.2	KW12	59240	719477
	KW10	52960	709379
	KW08	52310	781156
3.3	KW12	66460	723031
	KW10	60780	762047
	KW08	54070	896304
3.4	KW12	80990	752482
	KW10	78220	752177
	KW08	63620	824358
3.5	KW12	97310	916226

	KW10	74960	907635
	KW08	74910	957929
3.6	KW12	72070	860590
	KW10	59420	860000
	KW08	56980	902797
3.7	KW12	65390	585088
	KW10	53280	600474
	KW08	47130	779646
3.8	KW12	95990	1057900
	KW10	93220	1105337
	KW08	71570	1068883
3.9	KW12	88330	844410
	KW10	74080	859373
	KW08	55220	899214
3.10	KW12	52570	605016
	KW10	47630	609567
	KW08	47130	766239
3.11	KW12	80000	915928
	KW10	70780	910433
	KW08	70070	959647
3.12	KW12	90000	756280
	KW10	71800	768887
	KW08	60830	844314
3.13	KW12	44540	474053
	KW10	39590	535392
	KW08	37710	764631
3.14	KW12	47600	475745
	KW10	43040	535301
	KW08	37710	766971
3.15	KW12	67150	663551
	KW10	52680	641398
	KW08	40610	769944
3.16	KW12	41610	477544

	KW10	37510	538035
	KW08	36710	717267
4.1	KW12	81820	783461
	KW10	65950	773784
	KW08	54000	840863
4.2	KW12	104840	1183858
	KW10	92210	1202798
	KW08	80480	1179597
4.3	KW12	39460	475846
	KW10	37610	534416
	KW08	36710	763335
4.4	KW12	86990	752500
	KW10	84250	752371
	KW08	66970	800338

Literaturverzeichnis

- [Ackoff 1956] ACKOFF, Russell L.: The Development of Operations Research as a Science. In: *The Journal of the Operations Research Society of America* 4 (1956), Nr. 3, S. 265–295
- [action medeor 2013] ACTION MEDEOR: *Der Medikamentenvertrieb*. Available from: <http://medeor.de/de/medikamente-medizinprodukte/produkte/der-medikamentenvertrieb.html> Accessed 27 August 2013. 2013
- [Aktion Deutschland hilft] AKTION DEUTSCHLAND HILFT: *Afrika Karte*. Available from: http://media.aktion-deutschland-hilft.de/fileadmin/fm-dam/bilder/fachthemen/Naturkatastrophen___Humanitaere_Katastrophen/_AFRIKA-politisch.jpg, Accessed 31 Januar 2013
- [Altay und Green III 2006] ALTAY, Nezhil ; GREEN III, Walter G.: OR/MS research in disaster operations management. In: *European Journal of Operational Research* 175 (2006), Nr. 1, S. 475–493
- [Amadou u. a. 2010] AMADOU, Halimatou ; BABIZE, Valerie ; BAUMEL, Aurélie ; BERGSTRAND, Niklas: MSF Activity Report 2010 / Médecins Sans Frontières. 2010. – Forschungsbericht
- [Amuasi u. a. 2011] AMUASI, John H. ; DIAP, Graciela ; BLAY-NGUAH, Samuel ; BOAKYE, Isaac ; KARIKARI, Patrick E. ; DISMAS, Baza ; KARENZO, Jeanne ; NSABIYUMVA, Lievin ; LOUIE, Karly S. ; KIECHEL, Jean-René: Access to artesunate-amodiaquine, quinine and other anti-malarials: policy and markets in Burundi. In: *Malaria Journal* 10 (2011), Nr. 34, S. 1–9
- [Andersson Granberg und Värbrand 2007] ANDERSSON GRANBERG, Tobias ; VÄRBRAND, Peter: Decision support tools for ambulance dispatch and relocation. In: *Journal of the Operational Research Society* 58 (2007), Nr. 2, S. 195–201

- [Archibald 2007] ARCHIBALD, Thomas W.: Modelling replenishment and transshipment decisions in periodic review multilocation inventory systems. In: *Journal of the Operational Research Society* 58 (2007), Nr. 7, S. 948–956
- [Archibald u. a. 2010] ARCHIBALD, Thomas W. ; BLACK, Daniel P. ; GLAZEBROOK, Kevin D.: The use of simple calibrations of individual locations in making transshipment decisions in a multi-location inventory network. In: *Journal of the Operational Research Society* 61 (2010), Nr. 2, S. 294–305
- [Arminas 2005] ARMINAS, David: *Supply lessons of tsunami aid*. Supply Management, Available from: <http://www.supplymanagement.com/analysis/features/2005/supply-lessons-of-tsunami-aid/> Accessed 7 September 2014. Januar 2005
- [Axsäter 1990] AXSÄTER, Sven: Modelling Emergency Lateral Transshipments in Inventory Systems. In: *Management Science* 36 (1990), Nr. 11, S. 1329–1338
- [Baker 1977] BAKER, Kenneth R.: An Experimental Study of the Effectiveness of Rolling Schedules in Production Planning. In: *Decision Sciences* 8 (1977), Nr. 1, S. 19–27
- [Baker und Peterson 1979] BAKER, Kenneth R. ; PETERSON, David W.: An Analytic Framework for Evaluating Rolling Schedules. In: *Management Science* 25 (1979), Nr. 4, S. 341–351
- [Balaisyte u. a. 2011] BALAISYTE, Jurgita ; PEDRAZA MARTINEZ, Alfonso J. ; STAPLETON, Orla ; VAN WASSENHOVE, Luk N.: *Responding to the Haiti Earthquake Disaster: One Year On*. Available from: <http://www.insead.edu/facultyresearch/centres/isic/humanitarian/HaitiOneYearOn.cfm>. Accessed 12 März 2011. January 2011
- [Balçık und Beamon 2008] BALÇIK, B. ; BEAMON, B. M.: Facility location in humanitarian relief. In: *International Journal of Logistics: Research and Applications* 11 (2008), Nr. 2, S. 101–121
- [Balçık u. a. 2010] BALÇIK, Burcu ; BEAMON, Benita M. ; KREJCI, Caroline C. ; MURAMATSU, Kyle M. ; RAMIREZ, Magaly: Coordination in humanitarian relief chains: Practices, challenges and opportunities. In: *International Journal of Production Economics* 126 (2010), Nr. 1, S. 22–34

- [Balçık u. a. 2008] BALÇIK, Burcu ; BEAMON, Benita M. ; SMILOWITZ, Karen: Last Mile Distribution in Humanitarian Relief. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations* 12 (2008), Nr. 2, S. 51–63
- [Barbarosoğlu und Arda 2004] BARBAROSOĞLU, Gülay ; ARDA, Yasemin: A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. In: *Journal of the Operational Research Society* 55 (2004), Nr. 1, S. 43–53
- [Barbarosoğlu u. a. 2002] BARBAROSOĞLU, Gülay ; ÖZDAMAR, Linet ; ÇEVİK, Ahmet: An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. In: *European Journal of Operational Research* 140 (2002), Nr. 1, S. 118–133
- [Batta und Mannur 1990] BATTA, Rajan ; MANNUR, Narasimha R.: Covering-location models for emergency situations that require multiple response units. In: *Management Science* 36 (1990), Nr. 1, S. 16–23
- [Beamon 2004] BEAMON, Benita M.: Humanitarian Relief Chains: Issues and Challenges. In: *Proceedings of the 34th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 2004
- [Beamon und Kotleba 2006] BEAMON, Benita M. ; KOTLEBA, Stephen A.: Inventory modelling for complex emergencies in humanitarian relief operations. In: *International Journal of Logistics: Research and Applications* 9 (2006), Nr. 1, S. 1–18
- [Bell 1982] BELL, David E.: Regret in Decision Making under Uncertainty. In: *Operations Research* 30 (1982), Nr. 5, S. 961–981
- [Belton und Hodgkin 1999] BELTON, Valerie ; HODGKIN, Julie: Facilitators, decision makers, D.I.Y. users: Is intelligent multicriteria decision support for all feasible or desirable? In: *European Journal of Operational Research* 113 (1999), Nr. 2, S. 247–260
- [Belton und Stewart 2002] BELTON, Valerie ; STEWART, Theodor J.: *Multiple Criteria Decision Analysis - An Integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002

- [Ben-Tal u. a. 2011] BEN-TAL, Aharon ; CHUNG, Byung D. ; MANDALA, Supreet R. ; YAO, Tao: Robust optimization for emergency logistics planning: Risk mitigation in humanitarian relief supply chains. In: *Transportation Research Part B* 45 (2011), Nr. 8, S. 1177–1189
- [Benayoun u. a. 1971] BENAYOUN, Raphaël ; DE MONTGOLFIER, Jean ; TERGNY, Jean ; LARITCHEV, Oleg: Linear Programming with Multiple Objective Functions: Step Method (STEM). In: *Mathematical Programming* 1 (1971), Nr. 1, S. 366–375
- [Bertrand und Bookbinder 1998] BERTRAND, Louise P. ; BOOKBINDER, James H.: Stock Redistribution in Two-Echelon Logistics Systems. In: *The Journal of the Operational Research Society* 49 (1998), Nr. 9, S. 966–975
- [Bertsimas und Thiele 2006] BERTSIMAS, Dimitris ; THIELE, Aurélie: A Robust Optimization Approach to Inventory Theory. In: *Operations Research* 54 (2006), Nr. 1, S. 150–168
- [Besiou u. a. 2010] BESIYOU, Maria ; STAPLETON, Orla ; VAN WASSENHOVE, Luk N.: *Exploring the Known and the Unknown: Future Possibilities of System Dynamics for Humanitarian Operations*. INSEAD Working Paper No 2010/74/TOM/ISIC. 2010
- [Beyer und Sendhoff 2007] BEYER, Hans-Georg ; SENDHOFF, Bernhard: Robust optimization - A comprehensive survey. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 196 (2007), Nr. 33-34, S. 3190–3218
- [Boyd und Vandenberghe 2004] BOYD, Stephen ; VANDENBERGHE, Lieven: *Convex Optimization*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004
- [Bozorgi-Amiri u. a. 2013] BOZORGI-AMIRI, Ali ; JABALAMELI, Mohammad S. ; MIRZAPOUR AL-E-HASHEM, Seyed Mohammad J.: A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. In: *OR Spectrum* 34 (2013), Nr. 4, S. 905–933
- [Brans und Vincke 1985] BRANS, Jean-Pierre ; VINCKE, Philippe: A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). In: *Management Science* 31 (1985), Nr. 6, S. 647–656

- [Brauers und Weber 1986] BRAUERS, Jutta ; WEBER, Martin: Szenarioanalyse als Hilfsmittel der strategischen Planung: Methodenvergleich und Darstellung einer neuen Methode. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 56 (1986), Nr. 7, S. 631–652
- [Börjeson u. a. 2005] BÖRJESON, Lena ; HÖJER, Mattias ; DREBORG, Karl-Henrik ; EKVALL, Tomas ; FINNVEDEN, Göran: *Towards a user's guide to scenarios - a report on scenario types and scenario techniques*. ISSN 1652-5442, TRITA-INFRA-FMS 2005:3, version 1.1b. November 2005
- [Buchanan-Smith und Maxwell 1994] BUCHANAN-SMITH, Margaret ; MAXWELL, Simon: Linking Relief and Development: An Introduction and Overview. In: *IDS Bulletin* 25 (1994), Nr. 4, S. 1–19
- [Bunn und Salo 1993] BUNN, Derek W. ; SALO, Ahti A.: Forecasting with scenarios. In: *European Journal of Operational Research* 68 (1993), Nr. 3, S. 291–303
- [Caramia und Dell'Olmo 2008] CARAMIA, Massimiliano ; DELL'OLMO, Paolo: *Multi-objective Management in Freight Logistics - Increasing Capacity, Service Level and Safety with Optimization Algorithms*. Springer London, 2008
- [Caritas International 2012] CARITAS INTERNATIONAL: *Burundi: Aktiv gegen Armut*. Available from: <http://www.caritas-international.de/hilfeweltweit/afrika/burundi/armut-hiv?show=situation> Accessed 23 August 2014. April 2012
- [Cassidy 2003] CASSIDY, William B.: A logistics lifeline. In: *Traffic World* 267 (2003), October, Nr. 43, S. 15–16
- [Censor 1977] CENSOR, Yair: Pareto optimality in multiobjective problems. In: *Applied Mathematics and Optimization* 4 (1977), Nr. 1, S. 41–59
- [Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) 2011] CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS (CRED): *Health in Complex Emergencies - Trends in 8 African Countries*. Available from: www.cedat.org Accessed 31 Januar 2012, Complex Emergency Database (CRED), Université catholique de Louvain - Brussels, Belgium. 2011

- [Chaikin 2003] CHAIKIN, Donald: Towards improved logistics: challenges and questions for logisticians and managers. In: *Forced Migration Review* 18 (2003), S. 10
- [Chand 1983] CHAND, Suresh: Rolling Horizon Procedures for the Facilities in Series Inventory Model with Nested Schedules. In: *Management Science* 29 (1983), Nr. 2, S. 237–249
- [Chang u. a. 2007] CHANG, Mei-Shiang ; TSENG, Ya-Ling ; CHEN, Jing-Wen: A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. In: *Transportation Research Part E* 43 (2007), Nr. 6, S. 737–754
- [Chankong und Haimes 1983] CHANKONG, Vira ; HAIMES, Yacov Y.: *Multiobjective Decision Making - Theory and Methodology*. Elsevier Science Publishing Co., New York, 1983
- [Charles u. a. 2009] CHARLES, Aurélie ; LAURAS, Matthieu ; TOMASINI, Rolando: Learning from previous humanitarian operations, a Business Process Reengineering approach. In: LANDGREN, Jonas (Hrsg.) ; JUL, Susanne (Hrsg.): *Proceedings of the 6th International ISCRAM Conference*, Gothenburg, Sweden, May 2009
- [Charles u. a. 2010] CHARLES, Aurélie ; LAURAS, Matthieu ; VAN WASSENHOVE, Luk: A model to define and assess the agility of supply chains: building on humanitarian experience. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 40 (2010), Nr. 8/9, S. 722–741
- [Charles 2010] CHARLES, Aurélie: *Improving the design and management of agile supply chains: feedback and application in the context of humanitarian aid*, University of Toulouse, Dissertation, 2010
- [Charnes und Cooper 1959] CHARNES, A. ; COOPER, W. W.: Chance Constrained Programming. In: *Management Science* 6 (1959), Nr. 1, S. 73–79
- [Charnes und Cooper 1961] CHARNES, Abraham ; COOPER, William W.: *Management models and industrial applications of linear programming*. Bd. 1. John Wiley and Sons, Inc, New York, USA, 1961
- [Checchi u. a. 2006] CHECCHI, Francesco ; COX, Jonathan ; BALKAN, Suna ; TAMRAT, Abiy ; PRIOTTO, Gerardo ; ALBERTI, Kathryn P. ; ZUROVAC, Dejan ; GUTHMANN, Jean-Paul: Malaria Epidemics and Interventions, Kenya, Burundi, Southern

- Sudan, and Ethiopia, 1999-2004. In: *Emerging Infectious Diseases* 12 (2006), Nr. 10, S. 1477–1485
- [Clark und Culkin 2013] CLARK, Alistair ; CULKIN, Bernadette: A Network Transshipment Model for Planning Humanitarian Relief Operations After a Natural Disaster. In: VITORIANO, Bego na (Hrsg.) ; MONTERO, Javier (Hrsg.) ; RUAN, Da (Hrsg.): *Decision Aid Models for Disaster Management and Emergencies* Bd. 7. Atlantis Press, Paris, 2013, S. 233–257
- [Cohon 1978] COHON, Jared L.: *Mathematics in Science and Engineering*. Bd. 140: *Multiobjective Programming and Planning*. Academic Press Inc, New York, 1978
- [Comes 2011] COMES, Martina: *Decision Maps for Distributed Scenario-Based Multi-Criteria Decision Support*, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2011
- [Comfort u. a. 2013] COMFORT, Louise K. ; COLELLA, Brian ; VOORTMAN, Mark ; CONNELLY, Scott ; DRURY, Jill L. ; KLEIN, Gary L. ; WUKICH, Clayton: Real-time Decision Making in Urgent Events: Modeling Options for Action. In: COMES, Tina (Hrsg.) ; FIEDRICH, Frank (Hrsg.) ; FORTIER, Stephen (Hrsg.) ; GELDERMANN, Jutta (Hrsg.) ; MÜLLER, Tim (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International ISCRAM Conference*, KIT, Karlsruhe, Germany, 2013
- [Consuelos Salas u. a. 2012] CONSUELOS SALAS, Laura ; ROBLES CÁRDENAS, Manuel ; ZHANG, Muhong: Inventory policies for humanitarian aid during hurricanes. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 46 (2012), Nr. 4, S. 272–280
- [Dada 1992] DADA, Maqbool: A Two-Echelon Inventory System with Priority Shipments. In: *Management Science* 38 (1992), Nr. 8, S. 1140–1153
- [Das 1999] DAS, Indraneel: On characterizing the “knee“ of the Pareto curve based on Normal-Boundary Intersection. In: *Structural Optimization* 18 (1999), S. 107 – 115
- [Das und Dennis 1997] DAS, Indraneel ; DENNIS, John E.: A closer look at drawbacks of minimizing weighted sums of objectives for Pareto set generation in multicriteria optimization problems. In: *Structural Optimization* 14 (1997), Nr. 1, S. 63–69

- [Das und Dennis 1998] DAS, Indraneel ; DENNIS, John E.: Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems. In: *SIAM Journal on Optimization* 8 (1998), Nr. 3, S. 631–657
- [Dasaklis u. a. 2012] DASAKLIS, Thomas K. ; PAPPIS, Costas P. ; RACHANIOTIS, Nikolaos P.: Epidemics control and logistics operations: A review. In: *Journal of Production Economics* 139 (2012), Nr. 2, S. 393–410
- [Date u. a. 2011] DATE, Kashmira A. ; VICARI, Andrea ; HYDE, Terri B. ; MINTZ, Eric ; DANOVARO-HOLLIDAY, M. Carolina ; HENRY, Ariel ; TAPPERO, Jordan W. ; ROELS, Thierry H. ; ABRAMS, Joseph ; BURKHOLDER, Brenton T. ; RUIZ-MATUS, Cuauhtémoc ; ANDRUS, Jon ; DIETZ, Vance: Considerations for Oral Cholera Vaccine Use during Outbreak after Earthquake in Haiti, 2010 - 2011. In: *Emerging Infectious Diseases* 17 (2011), Nr. 11, S. 2105–2112
- [de la Torre u. a. 2012] DE LA TORRE, Luis E. ; DOLINSKAYA, Irina S. ; SMILOWITZ, Karen R.: Disaster relief routing: Integrating research and practice. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 46 (2012), Nr. 1, S. 88–97
- [De Silva 2001] DE SILVA, F. Nisha: Providing spatial decision support for evacuation planning: a challenge in integrating technologies. In: *Disaster Prevention and Management* 10 (2001), Nr. 1, S. 11–20
- [De Treville u. a. 2006] DE TREVILLE, Suzanne ; SMITH, Ian ; RÖLLI, Adrian ; ARNOLD, Virginia: Applying operations management logic and tools to save lives: A case study of the world health organization's global drug facility. In: *Journal of Operations Management* 24 (2006), Nr. 4, S. 397–406
- [Deb 2003] DEB, Kalyanmoy: Multi-Objective Evolutionary Algorithms: Introducing Bias Among Pareto-Optimal Solutions. In: GHOSH, Ashish (Hrsg.) ; TSUTSUI, Shigeyoshi (Hrsg.): *Advances in Evolutionary Computing - Natural Computing Series*. Springer Berlin Heidelberg, 2003, S. 263–292
- [Deb u. a. 2002] DEB, Kalyanmoy ; PRATAP, Amrit ; AGARWAL, Sameer ; MEYARIVAN, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. In: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (2002), Nr. 2, S. 182–197

- [Dignan 2005] DIGNAN, Larry: Tricky Currents - tsunami relief is a challenge when supply chains are blocked by cows and roads don't exist. In: *Baseline* 1 (2005), January, Nr. 39, S. 30–31
- [Doerner u. a. 2009] DOERNER, Karl F. ; GUTJAHR, Walter J. ; NOLZ, Pamela C.: Multi-criteria location planning for public facilities in tsunami-prone coastal areas. In: *OR Spectrum* 31 (2009), Nr. 3, S. 651–678
- [Drezner u. a. 2006] DREZNER, Tammy ; DREZNER, Zvi ; SALHI, Said: A multi-objective heuristic approach for the casualty collection points location problem. In: *Journal of the Operational Research Society* 57 (2006), Nr. 6, S. 727–734
- [Edgeworth 1881] EDGEWORTH, Francis Y.: *Mathematical Psychics: An Essay on the Application of Mathematics to the Moral Sciences*. O. Kegan Paul & Co, London, 1881
- [Ehrgott 2005] EHRGOTT, Matthias: *Multicriteria Optimization*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2005
- [Ehrgott 2006] EHRGOTT, Matthias: A discussion of scalarization techniques for multiple objective integer programming. In: *Annals of Operations Research* 147 (2006), Nr. 1, S. 343–360
- [Eiselt und Sandblom 2004] EISELT, Horst A. ; SANDBLOM, Carl-Louis: *Decision Analysis, Location Models, and Scheduling Problems*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2004
- [Eiselt und Sandblom 2010] EISELT, Horst A. ; SANDBLOM, Carl-Louis: *Operations Research: A Model-Based Approach*. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [Eisenführ und Weber 2003] EISENFÜHR, Franz ; WEBER, Martin: *Rationales Entscheiden*. Springer Berlin Heidelberg, 2003
- [Eldar u. a. 2004] ELДАР, Yonina C. ; BEN-TAL, Aharon ; NEMIROVSKI, Arkadi: Linear Minimax Regret Estimation of Deterministic Parameters with Bounded Data Uncertainties. In: *IEEE Transactions on Signal Processing* 52 (2004), Nr. 8, S. 2177–2188

- [EM-DAT] EM-DAT: *The OFDA/CRED International Disaster Database*. Available from: <http://www.emdat.be/> Accessed 17 Oktober 2012
- [Erdik u. a. 2001] ERDIK, Mustafa ; DURUKAL, Eser ; BIRO, Yesim A. ; SIYAHİ, Bilge ; AKMAN, H.: *Earthquake Risk to Buildings in Istanbul and a Proposal for its Mitigation*. KOERI Report nr. 2001/16, Boğaziçi University, Istanbul, Türkei. 2001
- [Ernst 2003] ERNST, Ricardo: The academic side of commercial logistics and the importance of this special issue. In: *Forced Migration Review* 18 (2003), S. 5
- [Eskelinen und Miettinen 2012] ESKELINEN, Petri ; MIETTINEN, Kaisa: Trade-off analysis approach for interactive nonlinear multiobjective optimization. In: *OR Spectrum* 34 (2012), Nr. 4, S. 803–816
- [Falasca und Zobel 2011] FALASCA, Mauro ; ZOBEL, Christopher W.: A two-stage procurement model for humanitarian relief supply chains. In: *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management* 1 (2011), Nr. 2, S. 151–169
- [Federgruen und Zipkin 1984] FEDERGRUEN, Awi ; ZIPKIN, Paul: A Combined Vehicle Routing and Inventory Allocating Problem. In: *Operations Research* 32 (1984), Nr. 5, S. 1019–1037
- [Fiedrich u. a. 2000] FIEDRICH, Frank ; GEHBAUER, Fritz ; RICKERS, Uwe: Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters. In: *Safety Science* 35 (2000), Nr. 1-3, S. 41–57
- [Fishburn 1984] FISHBURN, Peter C.: Foundations of Risk Measurement. I. Risk as Probable Loss. In: *Management Science* 30 (1984), Nr. 4, S. 396–406
- [Fogel u. a. 1966] FOGEL, Lawrence J. ; OWENS, Alvin J. ; WALSH, Michael J.: Intelligent decision making through a simulation of evolution. In: *Behavioral science* 11 (1966), Nr. 4, S. 253–272
- [Fonseca und Fleming 1995] FONSECA, Carlos M. ; FLEMING, Peter J.: An Overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization. In: *Evolutionary Computation* 3 (1995), Nr. 1, S. 1–16
- [French 1995] FRENCH, Simon: Uncertainty and Imprecision: Modelling and Analysis. In: *The Journal of the Operational Research Society* 46 (1995), Nr. 1, S. 70–79

- [Galindo und Batta 2013] GALINDO, Gina ; BATTA, Rajan: Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. In: *European Journal of Operational Research* 230 (2013), Nr. 2, S. 201–211
- [Garry 2005] GARRY, Michael: “First responders; to serve its stores promptly after Hurricane Katrina, Associated Grocers, Baton Rouge, had to prepare thoroughly and stretch its supply chain capacities”. In: *Supermarket News* 53 (2005), October, Nr. 43, S. 48
- [Garvin und Levesque 2006] GARVIN, David A. ; LEVESQUE, Lynne C.: *A Note on Scenario Planning*. Harvard Business School Note 306-003. 7 2006
- [Gass und Saaty 1955] GASS, Saul ; SAATY, Thomas: The Computational Algorithm for the Parametric Objective Function. In: *Naval Research Logistics Quarterly* 2 (1955), Nr. 1-2, S. 39–45
- [Gatignon u. a. 2010] GATIGNON, Aline ; VAN WASSENHOVE, Luk N. ; CHARLES, Aurélie: The Yogyakarta earthquake: Humanitarian relief through IFRC’s decentralized supply chain. In: *International Journal of Production Economics* 126 (2010), Nr. 1, S. 102–110
- [Gausemeier u. a. 1996] GAUSEMEIER, Jürgen ; FINK, Alexander ; SCHLAKE, Oliver: *Szenario - Management - Planen und Führen mit Szenarien*. Hanser - München Wien, 1996
- [Gomez-Elipe u. a. 2007] GOMEZ-ELIPE, Alberto ; OTERO, Angel ; VAN HERP, Michel ; AGUIRRE-JAIME, Armando: Forecasting malaria incidence based on monthly case reports and environmental factors in Karuzi, Burundi, 1997–2003. In: *Malaria Journal* 6 (2007), Nr. 129, S. x–xx
- [GOR 2012] GOR: *Gesellschaft für Operations Research e.V.* Available from: <https://gor.uni-paderborn.de/> Accessed 31 Juli 2012. 2012
- [Gordon 1994] GORDON, Theodore J.: *Trend impact analysis*. Futures Research Methodology, AC/UNU Millennium Project. 1994
- [Gordon und Hayward 1968] GORDON, Theodore J. ; HAYWARD, H.: Initial Experiments with the Cross Impact Matrix Method for Forecasting. In: *Futures* 1 (1968), Nr. 2, S. 100–116

- [Greenberg und Morrison 2009] GREENBERG, Harvey J. ; MORRISON, Tod: Robust Optimization. In: RAVINDRAN, A. R. (Hrsg.): *Operations Research - Methodologies*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2009, S. 14.1 – 14.33
- [Greiling Keane 2005] GREILING KEANE, Angela: Looking for logistics lessons. In: *Traffic World* 269 (2005), Nr. 44, S. 15
- [Guha-Sapir u. a. 2012] GUHA-SAPIR, Debby ; VOS, Femke ; BELOW, Regina ; PONSERRE, Sylvain: *Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends*. CRED, Brussels. Available from: http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2011.pdf, Accessed 27 August 2014. 2012
- [Gustavsson 2003] GUSTAVSSON, Lars: Humanitarian logistics: context and challenges. In: *Forced Migration Review* 18 (2003), S. 6–8
- [Guthmann u. a. 2007] GUTHMANN, Jean-Paul ; BONNET, Maryline ; AHOUA, Laurence ; DANTOINE, François ; BALKAN, Suna ; HERP, Michel van ; TAMRAT, Abiy ; LEGROS, Dominique ; BROWN, Vincent ; CHECCHI, Francesco: Death Rates from Malaria Epidemics, Burundi and Ethiopia. In: *Emerging Infectious Diseases* 13 (2007), Nr. 1, S. 140–143
- [Haghani und Oh 1996] HAGHANI, Ali ; OH, Sei-Chang: Formulation and Solution of a Multi-Commodity, Multi-Modal Network flow Model for Disaster Relief Operations. In: *Transportational Research Part A* 30 (1996), Nr. 3, S. 231–250
- [Haimes 1973] HAIMES, Yacov Y.: Integrated System Identification and Optimization. In: *Control and Dynamic Systems: Advances in Theory and Applications* 10 (1973), S. 435–518
- [Haimes u. a. 2002] HAIMES, Yacov Y. ; KAPLAN, Stan ; LAMBERT, James H.: Risk Filtering, Ranking, and Management Framework Using Hierarchical Holographic Modeling. In: *Risk Analysis* 22 (2002), Nr. 2, S. 383–397
- [Hajela und Lin 1992] HAJELA, Prabhat ; LIN, Chun-Yi: Genetic search strategies in multicriterion optimal design. In: *Structural Optimization* 4 (1992), Nr. 2, S. 99–107
- [Heidtke 2007] HEIDTKE, Curtis L.: *Reducing the “Gap of Pain“ a strategy for optimizing federal resource availability in response to major incidents*. Master the-

- sis. Available from: http://calhoun.nps.edu/public/bitstream/handle/10945/3597/07Mar_Heidtke.pdf?sequence=1 Accessed 7 September 2014. 2007
- [Herer u. a. 2006] HERER, Yale T. ; TZUR, Michal ; YUECESAN, Enver: The Multi-Location Transshipment Problem. In: *IIE Transactions* 38 (2006), S. 185–200
- [Hiltz u. a. 2013] HILTZ, Starr R. ; GONZALEZ, Jose J. ; TUROFF, Murray: ICT Support and the Effectiveness of Decision Making in Disasters: A Preliminary System Dynamics Model. In: COMES, Tina (Hrsg.) ; FIEDRICH, Frank (Hrsg.) ; FORTIER, Stephen (Hrsg.) ; GELDERMANN, Jutta (Hrsg.) ; MÜLLER, Tim (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International ISCRAM Conference*, KIT, Karlsruhe, Germany, 2013
- [Hoffman 2005] HOFFMAN, William: Last-mile Relief Logistics. In: *Traffic World* 269 (2005), Nr. 3, S. 11
- [Holguín-Veras u. a. 2012] HOLGUÍN-VERAS, José ; JALLER, Miguel ; VAN WASSENHOVE, Luk N. ; PÉREZ, Noel ; WACHTENDORF, Tricia: On the unique features of post-disaster humanitarian logistics. In: *Journal of Operations Management* 30 (2012), Nr. 7-8, S. 494–506
- [Holguín-Veras u. a.] HOLGUÍN-VERAS, Jose ; PEREZ, Noel ; JALLER, Miguel ; DESTRO, Lisa ; WACHTENDORF, Tricia: *On the Need to Reformulate Humanitarian Logistics Modeling: Deprivation Costs, and Material Convergence*. online
- [Horn u. a. 1994] HORN, Jeffrey ; NAFPLIOTIS, Nicholas ; GOLDBERG, David E.: A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. In: *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, 1994, S. 82–87
- [Hua u. a. 2009] HUA, Zhongsheng ; YANG, Jun ; HUANG, Feihua ; XU, Xiaoyan: A static-dynamic strategy for spare part inventory systems with nonstationary stochastic demand. In: *Journal of the Operational Research Society* 60 (2009), Nr. 9, S. 1254–1263
- [Human Rights Watch 2013] HUMAN RIGHTS WATCH: *World Report 2013 - Haiti*. Available from: <http://www.hrw.org/world-report/2013/country-chapters/haiti>, Accessed 27 August 2014. 2013

- [Huss 1988] HUSS, William R.: A Move Toward Scenario Analysis. In: *International Journal of Forecasting* 4 (1988), Nr. 3, S. 377–388
- [Jahre u. a. 2009] JAHRE, Marianne ; JENSEN, Leif-Magnus ; LISTOU, Tore: Theory development in humanitarian logistics: a framework and three cases. In: *Management Research News* 32 (2009), Nr. 11, S. 1008–1023
- [Jahre und Navangul 2011] JAHRE, Marianne ; NAVANGUL, Kaustubh A.: Predicting the Unpredictable - Demand Forecasting in International Humanitarian Response. In: *Proceedings of the 23rd Annual NOFOMA Conference*. Harstad, Norway, 2011, S. 265–281
- [Jia u. a. 2007] JIA, Hongzhong ; ORDÓÑEZ, Fernando ; DESSOUKY, Maged: A Modeling Framework for Facility Location of Medical Services for Large-Scale Emergencies. In: *IIE Transactions* 39 (2007), Nr. 1, S. 41–55
- [Jia und Ierapetritou 2007] JIA, Zhenya ; IERAPETRITOU, Marianthi G.: Generate Pareto optimal solutions of scheduling problems using normal boundary intersection technique. In: *Computers and Chemical Engineering* 31 (2007), Nr. 4, S. 268–280
- [Kaatrud u. a. 2003] KAATRUD, David B. ; SAMII, Ramina ; VAN WASSENHOVE, Luk N.: UN Joint Logistics Centre: a coordinated response to common humanitarian logistics concerns. In: *Forced Migration Review* 18 (2003), S. 11–14
- [Kahn 1968] KAHN, Herman: The alternative world future's approach. In: KAPLAN, Morton A. (Hrsg.): *New Approaches to International Relations*, St. Martin's Press, New York, 1968, S. 83–136
- [Kengeya-Kayondo u. a. 2008] KENGEYA-KAYONDO, Jane ; SHAKARISHVILI, George ; XUEREF, Serge: Framework for Operations and Implementation Research in Health and Disease Control Programs / The Global Fund. 2008. – Forschungsbericht
- [Kim und de Weck 2005] KIM, Il Y. ; DE WECK, Oliver L.: Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 29 (2005), Nr. 2, S. 149–158
- [Klamroth u. a. 2004] KLAMROTH, Kathrin ; TIND, Jørgen ; ZUST, Sibylle: Integer Programming Duality in Multiple Objective Programming. In: *Journal of Global Optimization* 29 (2004), Nr. 1, S. 1–18

- [Korhonen u. a. 1992] KORHONEN, Pekka ; MOSKOWITZ, Herbert ; WALLENIS, Jyrki: Multiple criteria decision support - A review. In: *European Journal of Operational Research* 63 (1992), Nr. 3, S. 361–375
- [Kouvelis und Yu 1997] KOUVELIS, Panos ; YU, Gang: *Robust discrete optimization and its applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1997
- [Kovács und Spens 2007] KOVÁCS, Gyöngyi ; SPENS, Karen M.: Humanitarian logistics in disaster relief operations. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 37 (2007), Nr. 2, S. 99–114
- [Kovács und Spens 2009] KOVÁCS, Gyöngyi ; SPENS, Karen M.: Identifying challenges in humanitarian logistics. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 39 (2009), Nr. 6, S. 506–528
- [Kramer 1967] KRAMER, Giselbert: Entscheidungsproblem, Entscheidungskriterien bei völliger Ungewißheit und Chernoffsches Axiomensystem. In: *Metrika* 11 (1967), Nr. 1, S. 15–38
- [Kuhn und Tucker 1951] KUHN, Harold W. ; TUCKER, Albert W.: Nonlinear Programming. In: NEYMAN, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 2. Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Univ. of California Press, Berkeley, 1951, S. 481–492
- [Lamont 2005] LAMONT, Judith: *KM's role in the aftermath of disaster*. Available from: <http://www.kmworld.com/Articles/PrintArticle.aspx?ArticleID=14549>, Accessed 29 August 2014. November 2005
- [Laumanns u. a. 2006] LAUMANNNS, Marco ; THIELE, Lothar ; ZITZLER, Eckart: An efficient, adaptive parameter variation scheme for metaheuristics based on the epsilon-constraint method. In: *European Journal of Operational Research* 169 (2006), Nr. 3, S. 932–942
- [Lausen u. a. 1994] LAUSEN, Berthold ; SAUERBREI, Willi ; SCHUMACHER, Martin: Classification and regression trees (CART) used for the exploration of prognostic factors measured on different scales. In: *Computational Statistics. Contributions to Statistics*, Physica Verlag, Germany, 1994, S. 483 – 496

- [Lee 1987] LEE, Hau L.: A Multi-Echelon Inventory Model for Repairable Items with Emergency Lateral Transshipments. In: *Management Science* 33 (1987), Nr. 10, S. 1302–1316
- [Leonard 2005] LEONARD, Devin: The only lifeline was the Wal-Mart. In: *Fortune* 152 (2005), Nr. 6, S. 58–62
- [Lin u. a. 2011] LIN, Yen-Hung ; BATTÀ, Rajan ; ROGERSON, Peter A. ; BLATT, Alan ; FLANIGAN, Marie: A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 45 (2011), Nr. 4, S. 132–145
- [Linderoth und Ralphs 2006] LINDEROTH, Jeffrey T. ; RALPHS, Ted K.: Noncommercial Software for Mixed-Integer Linear Programming. In: KARLOF, John K. (Hrsg.): *Integer Programming - Theory and Practice*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2006, S. 253–303
- [Linneman und Kennell 1977] LINNEMAN, Robert E. ; KENNEL, John D.: Shirt-sleeve approach to long-range plans. In: *Harvard Business Review* 55 (1977), Nr. 2, S. 141–150
- [Linneman und Klein 1979] LINNEMAN, Robert E. ; KLEIN, Harold E.: The Use of Multiple Scenarios by U.S. Industrial Companies. In: *Long Range Planning* 12 (1979), Nr. 1, S. 83–90
- [Lodree Jr. und Taskin 2008] LODREE JR., Emmett J. ; TASKIN, Selda: An insurance risk management framework for disaster relief and supply chain disruption inventory planning. In: *Journal of the Operational Research Society* 59 (2008), Nr. 5, S. 674–684
- [Logistics Cluster 2006] LOGISTICS CLUSTER: *Logistics support system (LSS) – pipeline tracking*. Available from: <http://logcluster.org/document/logistics-support-system-lss-pipeline-tracking>, Accessed 29 August 2014. March 2006
- [Long 1997] LONG, Douglas C.: Logistics for disaster relief: engineering on the run. In: *IIE Solutions* 29 (1997), Nr. 6, S. 26–29

- [Long und Wood 1995] LONG, Douglas C. ; WOOD, Donald F.: The Logistics of Famine Relief. In: *Journal of Business Logistics* 16 (1995), Nr. 1, S. 213–229
- [Makridakis u. a. 2009] MAKRIDAKIS, Spyros ; HOGARTH, Robin M. ; GABA, Anil: Forecasting and uncertainty in the economic and business world. In: *International Journal of Forecasting* 25 (2009), Nr. 4, S. 794–812
- [MARA/ARMA collaboration 2005] MARA/ARMA COLLABORATION: *Burundi: Distribution of Endemic Malaria [map]*. Available from: <http://www.mara.org.za/> Accessed 14 November 2010. July 2005
- [Martel u. a. 2013] MARTEL, Alain ; BENMOUSSA, Abdelhamid ; CHOUINARD, Marc ; KLIBI, Walid ; KETTANI, Ossama: Designing global supply networks for conflict or disaster support: the case of the Canadian Armed Forces. In: *Journal of the Operational Research Society* 64 (2013), Nr. 4, S. 577–596
- [Matos 2007] MATOS, Manuel A.: Decision under risk as a multicriteria problem. In: *European Journal of Operational Research* 181 (2007), Nr. 3, S. 1516–1529
- [Mattson u. a. 2004] MATTSON, Christopher A. ; MULLUR, Anoop A. ; MESSAC, Achille: Smart Pareto Filter: Obtaining a Minimal Representation of Multiobjective Design Space. In: *Engineering Optimization* 36 (2004), Nr. 6, S. 721–740
- [Médecins Sans Frontières 2001] MÉDECINS SANS FRONTIÈRES: *Burundi: Malaria-Epidemie und Unterernährung bedrohen Bevölkerung - Ärzte ohne Grenzen fordert Nahrungsmittellieferungen durch die Vereinten Nationen*. Available from: <http://www.aerzte-ohne-grenzen.de/presse/pressemitteilungen/2001/pm-2001-01-15-a/index.html>, Accessed 29 August 2014. Januar 2001
- [Médecins Sans Frontières 2004] MÉDECINS SANS FRONTIÈRES: *Access to health care in Burundi - Results of three epidemiological surveys*. Available from: http://www.aerzte-ohne-grenzen.de/_media/pdf/burundi/2004/2004-04-burundi-survey-healthcare.pdf, Accessed 29 August 2014. March 2004
- [Médecins Sans Frontières 2009] MÉDECINS SANS FRONTIÈRES: MSF Activity Report 2008. 2009. – Annual Report

- [Médecins Sans Frontières 2010a] MÉDECINS SANS FRONTIÈRES: *Field News - Burundi: MSF Responding to Alarming Rise in Malaria Infections in Kayanza Province*. Available from: <http://www.doctorswithoutborders.org/news/article.cfm?id=4240&cat=field-news&ref=related-sidebar>, Accessed 14 November 2010. January 2010
- [Médecins Sans Frontières 2010b] MÉDECINS SANS FRONTIÈRES: *Field News - Burundi: Northern Regions Gripped by Malaria Emergency*. Available from: <http://www.doctorswithoutborders.org/news/article.cfm?id=4346&cat=field-news&ref=related-sidebar>, Accessed 23 Dezember 2010. March 2010
- [Médecins Sans Frontières 2010c] MÉDECINS SANS FRONTIÈRES: *"Top Ten" Humanitarian Crises: Aid Blocked and Diseases Neglected*. Available from: <http://www.doctorswithoutborders.org/publications/topten/2009/article.cfm?id=4127>, Accessed 29 August 2014. 2010
- [Médecins Sans Frontières 2011] MÉDECINS SANS FRONTIÈRES: *Burundi - Die Aktivitäten von Ärzte ohne Grenzen im Überblick*. Available from: <http://www.aerzte-ohne-grenzen.de/informieren/einsatzlaender/afrika/burundi/index.html>, Accessed 29 August 2014. Mai 2011
- [Médecins Sans Frontières - Ärzte Ohne Grenzen e.V. 2012] MÉDECINS SANS FRONTIÈRES - ÄRZTE OHNE GRENZEN E.V.: *Freie und zweckgebundene Spenden*. Available from: <https://www.aerzte-ohne-grenzen.de/spenden/service/faq>, Accessed 29 August 2014. Mai 2012
- [Merz und Blöschl 2003] MERZ, Ralf ; BLÖSCHL, Günter: A process typology of regional floods. In: *Water Resource Research* 39 (2003), Nr. 12, S. 1–20
- [Messac u. a. 2003] MESSAC, Achille ; ISMAIL-YAHAYA, Amir ; MATTSON, Christopher A.: The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 25 (2003), Nr. 2, S. 86–98
- [Messac und Mattson 2004] MESSAC, Achille ; MATTSON, Christopher A.: Normal Constraint Method with Guarantee of Even Representation of Complete Pareto

- Frontier. In: *45th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, California*, April 2004
- [Mete und Zabinsky 2007] METE, Huseyin O. ; ZABINSKY, Zelda B.: Preparing for Disasters: Medical Supply Location and Distribution. In: *Proceedings of the INFORMS conference, Seattle, WA*, 2007
- [Mete und Zabinsky 2010] METE, Huseyin O. ; ZABINSKY, Zelda B.: Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. In: *International Journal of Production Economics* 126 (2010), Nr. 1, S. 76–84
- [Miettinen 1999] MIETTINEN, Kaisa M.: *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 1999
- [Miettinen 2008] MIETTINEN, Kaisa M.: Introduction to Multiobjective Optimization: Noninteractive Approaches. In: BRANKE, Jürgen (Hrsg.) ; DEB, Kalyanmoy (Hrsg.) ; MIETTINEN, Kaisa (Hrsg.) ; SŁOWIŃSKI, Roman (Hrsg.): *Multiobjective Optimization - Interactive and Evolutionary Approaches*. Springer Berlin Heidelberg, 2008, Kap. 1, S. 1–26
- [Ministere de la planification du developpement et de la resonstruction nationale 2006] MINISTERE DE LA PLANIFICATION DU DEVELOPPEMENT ET DE LA RESONSTRUCTION NATIONALE: *Monographie de la commune Kayanza*. Available from: http://www.leburundi.net/download/kayanza/commune_kayanza.pdf, Accessed 29 August 2014. September 2006
- [Müller-Merbach 1973] MÜLLER-MERBACH, Heiner: *Operations Research*. Franz Vahlen, München, 1973
- [Moore u. a. 1990] MOORE, Patrick S. ; TOOLE, Michael J. ; NIEBURG, Philipp ; WALDMAN, Ronald J. ; BROOME, Claire V.: Surveillance and control of meningococcal meningitis epidemics in refugee populations. In: *Bulletin of the World Health Organization* 68 (1990), Nr. 5, S. 587–596
- [Mulvey u. a. 1995] MULVEY, John M. ; VANDERBEI, Robert J. ; ZENIOS, Stavros A.: Robust Optimization of Large-Scale Systems. In: *Operations Research* 43 (1995), Nr. 2, S. 264–281

- [Murray 2005] MURRAY, Sarah: How to deliver on the promises: supply chain logistics: humanitarian agencies are learning lessons from business in bringing essential supplies to regions hit by the tsunami. In: *Financial Times* January 7 (2005), S. 9
- [National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Department of Commerce 2013] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE: *National Geophysical Data Center*. Available from: <http://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>, Accessed 29. Oktober 2013. 2013
- [Nissen 2012] NISSEN, Lars P.: *Information and Communication Technology - Sustainable Solutions*. Conference Speech - 2012 Conference on Health and Humanitarian Logistics, Hamburg. March 2012
- [Nolz u. a. 2007] NOLZ, Pamela C. ; DOERNER, Karl F. ; GUTJAHR, Walter J. ; HARTL, Richard F.: Modelling Disaster Relief Operations as Covering Tour Problem / Austrian Science Fund (FWF). 2007. – Forschungsbericht. -
- [Nolz u. a. 2010] NOLZ, Pamela C. ; DOERNER, Karl F. ; GUTJAHR, Walter J. ; HARTL, Richard F.: A Bi-objective Metaheuristic for Disaster Relief Operation Planning. In: COELLO COELLO, Carlos (Hrsg.) ; DHAENENS, Clarisse (Hrsg.) ; JOURDAN, Laetitia (Hrsg.): *Advances in Multi - Objective Nature Inspired Computing - Studies in Computational Intelligence*. Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 167–187
- [Nováky und Lóránt 1978] NOVÁKY, Erzsébet ; LÓRÁNT, Károly: A Method for the Analysis of Interrelationships Between Mutually Connected Events: A Cross-Impact Method. In: *Technological Forecasting and Social Change* 12 (1978), Nr. 2-3, S. 201–212
- [Office for the Coordination of Humanitarian Affairs - Burundi 2004] OFFICE FOR THE COORDINATION OF HUMANITARIAN AFFAIRS - BURUNDI: *Karte Burundi, Provinzen*. Available from: www.ochaburundi.org, Accessed 3 September 2010s. Juni 2004

- [Ortuño u. a. 2011] ORTUÑO, María T. ; TIRADO, Gregorio ; VITORIANO, Begoña: A lexicographical goal programming based decision support system for logistics of Humanitarian Aid. In: *TOP* 19 (2011), Nr. 2, S. 464–479
- [Overstreet u. a. 2011] OVERSTREET, Robert E. ; HALL, Dianne ; HANNA, Joe B. ; RAINER, R. Kelly, Jr: Research in humanitarian logistics. In: *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management* 1 (2011), Nr. 2, S. 114–131
- [Özdamar u. a. 2004] ÖZDAMAR, Linet ; EKINCI, Ediz ; KÜÇÜEKYAZICI, Beste: Emergency Logistics Planning in Natural Disasters. In: *Annals of Operations Research* 129 (2004), Nr. 1-4, S. 217–245
- [Pareto 1896] PARETO, Vilfredo: *Cours d'économie politique*. Tome Premier, Lausanne, 1896
- [Pettit und Beresford 2005] PETTIT, Stephen J. ; BERESFORD, Antony K. C.: Emergency relief logistics: an evaluation of military, non-military and composite response models. In: *International Journal of Logistics: Research and Applications* 8 (2005), Nr. 4, S. 313–331
- [Plowman 1964] PLOWMAN, Edward G.: *Elements of Business Logistics*. Graduate School of Business, Stanford University, 1964
- [Protopopoff u. a. 2007] PROTOPOPOFF, Natacha ; HERP, Michel V. ; MAES, Peter ; REID, Tony ; BAZA, Dismas ; D'ALESSANDRO, Umberto ; BORTEL, Wim V. ; COOSEMANS, Marc: Vector control in a malaria epidemic occurring within a complex emergency situation in Burundi: a case study. In: *Malaria Journal* 6 (2007), Nr. 93, S. 1–9
- [Protopopoff u. a. 2009] PROTOPOPOFF, Natacha ; VAN BORTEL, Wim ; SPEYBROECK, Niko ; VAN GEERTRUYDEN, Jean-Pierre ; BAZA, Dismas ; D'ALESSANDRO, Umberto ; COOSEMANS, Marc: Ranking Malaria Risk Factors to Guide Malaria Control Efforts in African Highlands. In: *PLoS ONE* 4 (2009), Nr. 11, S. 1–10
- [Rarig und Haimès 1983] RARIG, Harry M. ; HAIMES, Yacov Y.: Risk/dispersion index method. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 13 (1983), Nr. 3, S. 317–328

- [Rawls und Turnquist 2010] RAWLS, Carmen G. ; TURNQUIST, Mark A.: Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. In: *Transportation Research Part B* 44 (2010), Nr. 4, S. 521–534
- [Rawls und Turnquist 2011] RAWLS, Carmen G. ; TURNQUIST, Mark A.: Pre-positioning planning for emergency response with service quality constraints. In: *OR Spectrum* 33 (2011), Nr. 3, S. 481–498
- [Rawls und Turnquist 2012] RAWLS, Carmen G. ; TURNQUIST, Mark A.: Pre-positioning and dynamic delivery planning for short-term response following a natural disaster. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 46 (2012), Nr. 1, S. 46–54
- [Reconstruction Agency 2013] RECONSTRUCTION AGENCY: *Message from Reconstruction Agency Minister Takumi Nemoto*. Available from: <http://www.reconstruction.go.jp/english/topics/2013/03/2nd-anniversary-message.html>, Accessed 5 Juni 2013. März 2013
- [Reynolds 2001] REYNOLDS, Diane: A Framework for Scenario Generation. In: *Algo Research Quarterly* 4 (2001), Nr. 3, S. 15–36
- [Rottkemper und Fischer 2013] ROTTKEMPER, Beate ; FISCHER, Kathrin: Decision making in humanitarian logistics – A multi-objective optimization model for relocating relief goods during disaster recovery operations. In: COMES, Tina (Hrsg.) ; FIEDRICH, Frank (Hrsg.) ; FORTIER, Stephen (Hrsg.) ; GELDERMANN, Jutta (Hrsg.) ; MÜLLER, Tim (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International IS-CRAM Conference*, KIT, Karlsruhe, Germany, 2013
- [Rottkemper u. a. 2012] ROTTKEMPER, Beate ; FISCHER, Kathrin ; BLECKEN, Alexander: A transshipment model for distribution and inventory relocation under uncertainty in humanitarian operations. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 46 (2012), Nr. 1, S. 98–109
- [Rottkemper u. a. 2011] ROTTKEMPER, Beate ; FISCHER, Kathrin ; BLECKEN, Alexander ; DANNE, Christoph: Inventory relocation for overlapping disaster settings in humanitarian operations. In: *OR Spectrum* 33 (2011), Nr. 3, S. 721–749
- [Rowell 2005] ROWELL, Samuel: Retail Supply Chain Aids Katrina Victims. In: *Retail Merchandiser* 45 (2005), Nr. 10, S. 10

- [Roy 1991] ROY, Bernard: The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. In: *Theory and decision* 31 (1991), Nr. 1, S. 49–73
- [Russell 2005] RUSSELL, Timothy E.: *The Humanitarian Relief Supply Chain: Analysis of the 2004 South East Asia Earthquake and Tsunami*, Massachusetts Institute of Technology, Diplomarbeit, 2005
- [Rustem u. a. 2000] RUSTEM, Berç ; BECKER, Robin G. ; MARTY, Wolfgang: Robust min-max portfolio strategies for rival forecast and risk scenarios. In: *Journal of Economic Dynamics & Control* 24 (2000), Nr. 11-12, S. 1591–1621
- [Saaty und Vargas 2001] SAATY, Thomas L. ; VARGAS, Luis G.: *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA, 2001
- [Salmerón und Apte 2010] SALMERÓN, Javier ; APTE, Aruna: Stochastic Optimization for Natural Disaster Asset Prepositioning. In: *Production and Operations Management* 19 (2010), Nr. 5, S. 561–574
- [Sawaragi u. a. 1977] SAWARAGI, Yoshikazu ; INOUE, Koichi ; NAKAYAMA, Hirotaaka: Multiobjective Decision Making with Applications to Environmental and Urban Design. In: BELL, David E. (Hrsg.) ; KEENEY, Ralph L. (Hrsg.) ; RAIFFA, Howard (Hrsg.): *Conflicting Objectives in Decisions*. John Wiley and Sons Ltd., Bath, Great Britain, 1977, S. 358–366
- [Sawyer u. a. 2005] SAWYER, Tom ; DASGUPTA, Saibal ; LONG, J.T.: *Waves of Help Flow to Tsunami Region*. Available from: <http://enr.construction.com/news/environment/archives/050103.asp>, Accessed 29 August 2014. March 2005
- [Schelling 1958] SCHELLING, Thomas C.: The strategy of conflict - Prospectur for a reorientation of game theory. In: *The Journal of Conflict Resolution* 2 (1958), Nr. 3, S. 203–246
- [Schnaars 1987] SCHNAARS, Steven P.: How to Develop and Use Scenarios. In: *Long Range Planning* 20 (1987), Nr. 1, S. 105–114
- [Schoemaker 1993] SCHOEMAKER, Paul J.: Multiple Scenario Development: Its Conceptual and Behavioral Foundation. In: *Strategic Management Journal* 14 (1993), Nr. 3, S. 193–213

- [Scholl 2001] SCHOLL, Armin: *Robuste Planung und Optimierung*. Physica-Verlag, Heidelberg, 2001
- [Schultz 1987] SCHULTZ, Carl R.: Forecasting and Inventory Control for Sporadic Demand Under Periodic Review. In: *Journal of the Operational Research Society* 38 (1987), Nr. 5, S. 453–458
- [Sherali u. a. 1991] SHERALI, Hanif D. ; CARTER, Todd B. ; HOBEIKA, Antoine G.: A Location - Allocation Model and Algorithm for Evacuation Planning under Hurricane/Flood Conditions. In: *Transportation Research Part B* 25 (1991), Nr. 6, S. 439–452
- [Sheu 2007] SHEU, Jiuh-Biing: An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. In: *Transportation Research Part E* 43 (2007), Nr. 6, S. 687–709
- [Shukla 2007] SHUKLA, Pradyumn K.: On the Normal Boundary Intersection Method for Generation of Efficient Front. In: SHI, Yong (Hrsg.) ; ALBADA, Geert D. van (Hrsg.) ; DONGARRA, Jack (Hrsg.) ; SLOOT, Peter M. A. (Hrsg.): *Computational Science - ICCS 2007* Bd. 4487, 2007, S. 310–317
- [Simchi-Levi u. a. 2003] SIMCHI-LEVI, David ; KAMINSKY, Phil ; SIMCHI-LEVI, Edith: *Designing and Managing the Supply Chain - Concepts, Strategies and Case Studies*. McGraw - Hill Companies, New York, 2003
- [Simons 2014] SIMONS, Claudia: *Landkonflikte und politische Machtkämpfe in Burundi*. SWP - Aktuell Nr. 8. Februar 2014. – Stiftung Wissenschaft und Politik
- [Sowinski 2003] SOWINSKI, Lara L.: The lean, mean supply chain and its human counterpart. In: *World Trade* 16 (2003), Nr. 6, S. 18–19
- [Spears u. a. 1993] SPEARS, William M. ; JONG, Kenneth A. D. ; BÄCK, Thomas ; FOGEL, David B. ; GARIS, Hugo de: An Overview of Evolutionary Computation. In: *Machine Learning: ECML-93* Bd. 667, 1993, S. 442–459
- [Srinivas und Deb 1994] SRINIVAS, Narasimhachar ; DEB, Kalyanmoy: Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. In: *Evolutionary Computation* 2 (1994), Nr. 3, S. 221–248

- [Stadtler 2000] STADTLER, Hartmut: Improved Rolling Schedules for the Dynamic Single-Level Lot-Sizing Problem. In: *Management Science* 46 (2000), Nr. 2, S. 318–32
- [Statistisches Bundesamt 2013] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Basistabelle Burundi*. Available from: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Internationales/Land/Afrika/Tabellen/BI.html?nn=50714>, Accessed 30 Januar 2013. 2013
- [Stewart 2005] STEWART, Mark (Hrsg.): *Scenario For a Magnitude 6.7 Earthquake on the Seattle Fault*. Earthquake Engineering Research Institute and Washington Military Department - Emergency Management Division, Oakland, CA and Camp Murray, WA, 2005
- [Sundaresan u. a. 1995] SUNDARESAN, Sivakumar ; ISHII, Kosuke ; HOUSER, Donald R.: A Robust Optimization Procedure with Variations on Design Variables and Constraints. In: *Engineering Optimization* 24 (1995), Nr. 2, S. 101–117
- [Swiss Tropical and Public Health Institute 2006] SWISS TROPICAL AND PUBLIC HEALTH INSTITUTE: *Burundi - Public Health Strengthening Programme (PASS), Ngozi Province*. Available from: <http://www.swisstph.ch/de/ueber-uns/departemente/schweizerisches-zentrum-fuer-internationale-gesundheit/portfolio/srh-experience/burundi.html> Accessed 11 April 2013. 2006
- [Szaniawski 1960] SZANIAWSKI, Kemens: Some remarks concerning the criterion of rational decision making. In: *Studia Logica* 9 (1960), Nr. 1, S. 221–239
- [Tamura u. a. 2000] TAMURA, Hiroyuki ; YAMAMOTO, Kouji ; TOMIYAMA, Shinji ; HATONO, Itsuo: Modeling and analysis of decision making problem for mitigating natural disaster risks. In: *European Journal of Operational Research* 122 (2000), Nr. 2, S. 461–468
- [Taskin und Lodree 2010] TASKIN, Selda ; LODREE, Emmett J. Jr.: Inventory decisions for emergency supplies based on hurricane count predictions. In: *International Journal of Production Economics* 126 (2010), Nr. 1, S. 66–75

- [Tean 2006] TEAN, Ee S.: *Optimized positioning of pre-disaster relief force and assets*. Master thesis. Available from: <http://calhoun.nps.edu/public/handle/10945/2419> Accessed 7 September 2014. 2006
- [Technologie Management und Assessment 1986] TECHNOLOGIE MANAGEMENT UND ASSESSMENT: *Battelle-Szenario-Technik*. Battelle-Institut eV, Frankfurt, 1986
- [The Sphere Projekt 2004] THE SPHERE PROJEKT (Hrsg.): *Humanitarian Charter and Minimum Standards in Disaster Response*. Oxfam Publishing, Oxford, UK, 2004
- [Thévenaz und Resodihardjo 2010] THÉVENAZ, Céline ; RESODIHARDJO, Sandra L.: All the best laid plans... conditions impeding proper emergency response. In: *International Journal of Production Economics* 126 (2010), Nr. 1, S. 7–21
- [Thomas 2003] THOMAS, Anisya S.: *Humanitarian Logistics: Enabling Disaster Response* / Fritz Institute. 2003. – Forschungsbericht
- [Thomas und Kopczak 2005] THOMAS, Anisya S. ; KOPCZAK, Laura R.: *From Logistics to Supply Chain Management: The path forward in the humanitarian sector* / Fritz Institute. 2005. – Forschungsbericht
- [Thomas und Kopczak 2007] THOMAS, Anisya S. ; KOPCZAK, Laura R.: *Life-Saving Supply Chains*. In: HILLIER, Frederick S. (Hrsg.) ; LEE, Hau L. (Hrsg.) ; LEE, Chung-Yee (Hrsg.): *Building Supply Chain Excellence in Emerging Economies* Bd. 98. Springer, New York, 2007, S. 93–111
- [Thomas 2002] THOMAS, Marlin U.: *Supply Chain Reliability for Contingency Operations*. In: *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, IEEE Computer Society Press, Seattle, WA, 2002
- [Tiacchi und Saetta 2012] TIACCI, Lorenzo ; SAETTA, Stefano: Demand forecasting, lot sizing and scheduling on a rolling horizon basis. In: *International Journal of Production Economics* 140 (2012), Nr. 2, S. 803–814
- [Tiemessen u. a. 2013] TIEMESSEN, H.G.H. ; FLEISCHMANN, M. ; HOUTUM, G.J. van ; NUNEN, J.A.E.E. van ; PRATSINI, E.: *Dynamic demand fulfillment in spare*

- parts networks with multiple customer classes. In: *European Journal of Operational Research* 228 (2013), Nr. 2, S. 367–380
- [Tomasini und van Wassenhove 2009] TOMASINI, Rolando ; VAN WASSENHOVE, Luk N.: *Humanitarian Logistics*. Palgrave Macmillan, Basingstoke, 2009
- [Tomasini und van Wassenhove 2004] TOMASINI, Rolando M. ; VAN WASSENHOVE, Luk N.: Pan-American health organization's humanitarian supply management system: de-politicization of the humanitarian supply chain by creating accountability. In: *Journal of Public Procurement* 4 (2004), Nr. 3, S. 437–449
- [Treptow 2007] TREPTOW, Rainer (Hrsg.): *Katastrophenhilfe und Humanitäre Hilfe*. Ernst Reinhardt GmbH & Co KG, München, 2007
- [Trunick 2005] TRUNICK, Perry A.: *Fading into a bad dream - Logistics experts use previous relief experiences to rebuild the Gulf Coast*. Logistics Today. October 2005. – S. 1-3
- [Tufinkgi 2006] TUFINKGI, Philippe: *Logistik im Kontext internationaler Katastrophenhilfe*. Haupt Verlag AG Bern, 2006
- [Tzeng u. a. 2007] TZENG, Gwo-Hshiung ; CHENG, Hsin-Jung ; HUANG, Tsung D.: Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems. In: *Transportation Research Part E* 43 (2007), Nr. 6, S. 673–686
- [United Nations 2011] UNITED NATIONS: *Reference Map of Burundi*. Department of Field Support - Cartographic Section. Available from: <http://www.un.org/Depts/Cartographic/map/profile/burundi.pdf> Accessed 23 April 2011. November 2011
- [United Nations High Commissioner for Refugees 2013] UNITED NATIONS HIGH COMMISSIONER FOR REFUGEES: *UNHCR Global Appeal 2013 Update*. Available from: <http://www.unhcr.org/pages/49e45c056.html>, Accessed 2 April 2013. 2013
- [Uribe-Sánchez u. a. 2011] URIBE-SÁNCHEZ, Andrés ; SAVACHKIN, Alex ; SANTANA, Alfredo ; PRIETO-SANTA, Diana ; DAS, Tapas K.: A predictive decision-aid methodology for dynamic mitigation of influenza pandemics. In: *OR Spectrum* 33 (2011), Nr. 3, S. 751 – 786

- [U.S. Global Health Initiative 2011] U.S. GLOBAL HEALTH INITIATIVE: *Burundi - Global Health Initiative Strategy 2011-2015*. Available from: <http://www.ghi.gov/country/190639.htm> Accessed: 27 März 2013. September 2011
- [van den Heuvel und Wagelmans 2005] VAN DEN HEUVEL, Wilco ; WAGELMANS, Albert P.: A comparison of methods for lot-sizing in a rolling horizon environment. In: *Operations Research Letters* 33 (2005), Nr. 5, S. 486–496
- [van der Heijden 1996] VAN DER HEIJDEN, Kees: *Scenarios - The Art of Strategic Conversation*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, Great Britian, 1996
- [van Notten 2006] VAN NOTTEN, Philip: Scenario development: a typology of approaches. In: *Think Scenarios, Rethink Education*. OECD, Paris France, 2006, S. 69–87
- [van Wassenhove 2006] VAN WASSENHOVE, Luk N.: Humanitarian aid logistics: Supply chain management in high gear. In: *Journal of the Operational Research Society* 57 (2006), S. 475–489
- [van Wassenhove und Pedraza Martinez 2012] VAN WASSENHOVE, Luk N. ; PEDRAZA MARTINEZ, Alfonso J.: Using OR to adapt supply chain management best practices to humanitarian logistics. In: *International Transactions in Operational Research* 19 (2012), Nr. 1-2, S. 307–322
- [Viswanath und Peeta 2003] VISWANATH, Kannan ; PEETA, Srinivas: The Multicommodity Maximal Covering Network Design Problem for Planning Critical Routes for Earthquake Response. In: *Transportation Research Record* 1857 (2003), S. 1–10
- [Vitoriano u. a. 2011] VITORIANO, Begoña ; ORTUÑO, M. Teresa ; TIRADO, Gregorio ; MONTERO, Javier: A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution. In: *Journal of Global Optimization* 51 (2011), Nr. 2, S. 189–208
- [Webster u. a. 2009] WEBSTER, Mackinnon ; GINNETTI, Justin ; WALKER, Peter ; COPPARD, Daniel ; KENT, Randolph: *The Humanitarian Costs Of Climate Change*. Feinstein International Center, Medford, USA. 2009
- [Werners 2008] WERNERS, Brigitte: *Grundlagen des Operations Research*. Springer Berlin Heidelberg, 2008

- [WFP - World Food Programme 2013] WFP - WORLD FOOD PROGRAMME: *UNHRD - Humanitarian Response Depot*. Available from: <http://www.hrdlab.eu/>, Accessed 27. August 2013. 2013
- [Whittaker 1979] WHITTAKER, Hilary: *Comprehensive Emergency Management - A Governor's Guide*. National Governors' Association, Washington, D.C. März 1979
- [Wierzbicki 1982] WIERZBICKI, Andrzej P.: A Mathematical Basis for Satisficing Decision Making. In: *Mathematical Modelling* 3 (1982), Nr. 5, S. 391–405
- [World Health Organization 2004] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Malaria epidemics: forecasting, prevention, early detection and control - From policy to practice*. Geneva, Available from: http://www.who.int/malaria/publications/atoz/who_htm_mal_2004_1098/en/ Accessed 7 September 2014. 2004
- [World Health Organization 2005] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Malaria Control in Complex Emergencies: an inter-agency field handbook*. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, Available from: <http://www.who.int/malaria/publications/atoz/924159389X/en/> Accessed 7 September 2014. 2005
- [World Health Organization 2010] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Burundi - Factsheets of Health Statistics*. Available from: http://www.afro.who.int/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=7084&Itemid=2593, Accessed 31 Januar 2013. 2010
- [World Health Organization 2012] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Burundi: Health Profile*. Available from: <http://www.who.int/gho/countries/bdi.pdf>, Accessed 2 April 2013. 2012
- [World Health Organization 2013a] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Global Health Observatory Data Repository*. Available from: <http://apps.who.int/gho/data/?vid=92000#>, Accessed 30 Januar 2013. 2013
- [World Health Organization 2013b] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Malaria - Fact Sheet*. Available from: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs094/en/index.html> Accessed 10 April 2013. 2013

- [Wright u. a. 2009] WRIGHT, George ; CAIRNS, George ; GOODWIN, Paul: Teaching scenario planning: lessons from practice in academe and business. In: *European journal of operational research* 194 (2009), Nr. 1, S. 323–335
- [Yan und Shih 2009] YAN, Shangyao ; SHIH, Yu-Lin: Optimal scheduling of emergency roadway repair and subsequent relief distribution. In: *Computers & Operations Research* 36 (2009), Nr. 6, S. 2049–2065
- [Yi und Özdamar 2007] YI, Wei ; ÖZDAMAR, Linet: A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. In: *European Journal of Operational Research* 179 (2007), Nr. 3, S. 1177–1193
- [Yu 1974] YU, Po-Lung: Cone Convexity, Cone Extreme Points, and Nondominated Solutions in Decision Problems with Multiobjectives. In: *Journal of Optimization Theory and Applications* 14 (1974), Nr. 3, S. 319–377
- [Yu und Zeleny 1975] YU, Po-Lung ; ZELENY, Milan: The Set of All Nondominated Solutions in Linear Cases and a Multicriteria Simplex Method. In: *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 49 (1975), Nr. 2, S. 430–468
- [Zadeh 1963] ZADEH, Lotfi A.: Optimality and non-scalar-valued performance criteria. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 8 (1963), Nr. 1, S. 59–60
- [Zangemeister 1976] ZANGEMEISTER, Christof: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. Wittemann, München, Germany, 1976
- [Zeleny 1974] ZELENY, Milan: *Linear Multiobjective Programming*. Springer Berlin Heidelberg, 1974
- [Zhu u. a. 2008] ZHU, Jianming ; HUANG, Jun ; LIU, Degang ; HAN, Jiye: Resources Allocation Problem for Local Reserve Depots in Disaster Management Based on Scenario Analysis. In: *The 7th International Symposium on Operations Research and Its Applications*, ORSC & APORC, Lijiang, China, 2008, S. 395–407
- [Zionts 1979] ZIONTS, Stanley: A Survey of Multiple Criteria Integer Programming Methods. In: *Annals of Discrete Mathematics* 5 (1979), S. 389–398