

LEHRSTUHL FÜR LUFTFAHRTTECHNIK
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Ökonomische Bewertung der technischen Verfügbarkeit von Flugzeugen
aus Sicht von Fluggesellschaften

Björn Manfred Brückner

Vollständiger Ausdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen
Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.- Prof. Dr. -Ing. Mirko Hornung

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.- Prof. Dr.-Ing. Horst Baier
2. Hon.- Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dieter Schmitt

Die Dissertation wurde am 02.11.2011 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am
12.06.2012 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis	x
1. Fluggesellschaften im Spannungsfeld zwischen Kostendruck und Systemgrenzen	1
1.1. Motivation und Zielsetzung	1
1.2. Vorgehensweise	5
2. Die Bedeutung von technisch-bedingten Unregelmäßigkeiten im Flugplan	8
2.1. Grundlegende Gedanken zur Modellierung von Netzwerken	8
2.1.1. Transformation von Airline-Netzwerken in Graphen	8
2.1.2. Methoden zur Lösung von Netzwerkplanungsproblemen	13
2.1.3. Exemplarische Formulierung eines ganzzahligen Problems zur Bestimmung von Flugzeugumläufen.....	17
2.2. Ungeplante Ereignisse im operativen Betrieb	19
2.2.1. Einordnung von Verspätungen in den Kontext des Netzmanagements	19
2.2.2. Gründe für Ungeplante Ereignisse	23
2.2.3. Definition der technischen Zuverlässigkeit von Flugzeugen	25
2.2.4. Die Bedeutung und Umsetzung der technischen Zuverlässigkeit	26
2.2.5. Taktische Reaktionsmöglichkeiten von Airlines auf Störungen	28
2.2.6. Kostenfaktoren ungeplanter Ereignisse (Einfluss von Verspätungen auf die Fluggesellschaft).....	32

2.3. Zusammenfassung	34
3. Anforderungen an die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit von Flugzeugen	35
4. Diskussion existierender Methoden zur Integration und Behebung von ungeplanten Störungen in Streckennetzwerke	39
4.1. Wissenschaftliche Methoden und Ansätze aus dem Bereich der ungeplanten Ereignisse in Flugplänen.....	39
4.1.1. Minimierung von Verspätungen aus Sicht der Passagiere...	39
4.1.2. SIMAIR – ein stochastisches Model des täglichen Flugbetriebs.....	42
4.1.3. Ein System zur Echtzeitunterstützung bei der Wiederherstellung von Flugplänen.....	45
4.1.4. Entscheidungshilfen bei Verspätungen oder Annullierungen	46
4.1.5. Implementierung von Robustheit in Flugplänen.....	49
4.1.6. Entwicklung einer Heuristik zur Wiederherstellung des regulären Flugbetriebs nach irregulären Bedingungen.....	51
4.1.7. Eine Systemarchitektur für die Bearbeitung von Störungen im Flugbetrieb	53
4.1.8. Entscheidungsunterstützung bei Störungen des Flugplans .	55
4.1.9. Wiederherstellung des Flugplans unter minimaler Abweichung	57
4.1.10. Berücksichtigung von Verspätungen in der Planung von Flugplänen.....	59
4.1.11. GRASP – ein greedy Algorithmus zur Findung von Flugrouten bei Groundings und Verspätungen	61
4.2. Vergleich der existierenden Ansätze mit den Anforderungen an eine Bewertung der technischen Zuverlässigkeit.....	62

5. Die Verbindung von Monte-Carlo Simulation und Heuristik zur Bewertung der TDR als stochastische Größe.....	65
5.1. Architektur der Methodik	65
5.1.1. Das Konzept der Methodik	65
5.1.2. Architektur der Methodik	67
5.1.3. Prozess der Methodik	70
5.2. Erstellung der Eingabedaten.....	72
5.2.1. Festlegung der Mindestanzahl an Flugzeugen für den Betrieb des Flugplans	73
5.2.2. Generierung der Flugzeug-Start- und Endpunkte.....	75
5.2.3. Erstellung der Flugzeugumläufe.....	77
5.3. Einbau der Störgröße TDR in die Simulation	80
5.3.1. Eingaben und Ergebnisse der Monte-Carlo Simulation	80
5.3.2. Modellierung der stochastischen Störgrößen	81
5.3.3. Bestimmung des Konvergenzkriteriums	85
5.3.4. Formulierung der Kostenfunktionen	86
5.3.5. Modellierung der Recovery Strategien	103
5.4. Zusammenfassung und Einschränkungen der Methodik.....	121
6. Bewertung der TDR in zwei typischen Kurzstreckennetzwerk	123
6.1. Vorstellung der Parameter der modellierten Kurzstreckennetze	123
6.2. Eigenschaften der Heuristik	125
6.3. Sensitivitätsanalyse am Beispiel zweier Netzwerke	129
6.3.1. Zusatzkosten aus nicht planbaren Ereignissen	130

6.3.2. Verhalten der Verspätung bei steigender TDR	135
6.4. Was bedeutet eine Veränderung der TDR für eine Fluggesellschaft und den OEM?.....	137
6.5. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse	139
6.5.1. Beurteilung der Ergebnisse	139
6.5.2. Zusammenfassung.....	140
7. Zusammenfassung und Ausblick	141
7.1. Zusammenfassung	141
7.2. Ausblick - die ganzheitliche Bewertung der TDR im System „Luftverkehr“	142
Literaturverzeichnis	145

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kosten und Erträge amerikanischer Fluggesellschaften (American, Continental, Delta, Northwest, United, US Airways, America West) (MIT, 2009)	2
Abbildung 2: Relativer Anteil der Verspätungsgründe im September 2009 (in Anlehnung an Eurocontrol 2009, S.30).....	3
Abbildung 3: Darstellung der Vorgehensweise	6
Abbildung 4: Darstellung der Netzwerkplanung als sequentieller Prozess nach Döring (vgl. Döring, T., 1999, S.91)	9
Abbildung 5: Schematische Darstellung von gerichteten und ungerichteten Graphen.....	10
Abbildung 6: Exemplarische Ausgangssituation für die Erstellung von Flugzeugumläufen (in Anlehnung an. Clarke et al., 1997, S.34)	12
Abbildung 7: Beispiel für einen 2-tägigen Flugzeugumlauf zwischen München und Frankfurt.	12
Abbildung 8: Übersicht zu exakten Optimierungsverfahren und Heuristiken (vgl. Domscke, Drexl, 2005, S.126-127).....	14
Abbildung 9: Entwicklung von allen Verspätungen und Verspätungen über 15 Minuten für Abflüge im Europäischen Luftraum 2005 – 2009 (Eurocontrol, 2009, S.22)	21
Abbildung 10: Überblick zu den IATA Codes für Verspätungen.....	24
Abbildung 11: Zeitlich Entwicklung der Gründe für Verspätungen von 2002 bis 2007 (vgl. Eurocontrol, 2003-2008).....	24
Abbildung 12: Unterschiedliche Wirkung einer Verspätung auf Flugzeug und Flug	29
Abbildung 13: Zusammenfassung der Anforderungen an die Bewertungsmethodik.....	37
Abbildung 14: Bausteine der Bewertungsmethodik	38

Abbildung 15: Lexikographische Heuristik nach Teodorovic (vgl. Teodorovic D. / Stojkovic G., 1995, S.326) zur Findung des Verspätungs-minimalen Flugzeugumlaufs in einem sich täglich wiederholenden Flugplans.	41
Abbildung 16: Abbildung des gerichteten Graphen nach Gershkoff.	47
Abbildung 17: Qualitative Darstellung der Abschätzung des Umsatzverlusts als Funktion der Verspätungsdauer.	54
Abbildung 18: Einführung Incentives in die Modellierung von Netzwerken zur Aufwertung von Direktflügen in der Modellierung (s.a. Thengvall et al., 2000, S.185).	58
Abbildung 19: Ursache, Wirkung und Reaktion bei ungeplanten Ereignissen	66
Abbildung 20: Architektur der Bewertungsmethodik	68
Abbildung 21: Übergeordneter Prozessablauf der Methodik.	71
Abbildung 22: Neuartige Bausteine der Methodik.	72
Abbildung 23: Verringerung der Mindestanzahl an Flugzeugen durch beispielsweise geplante Wartungsarbeiten.	75
Abbildung 24: Flussdiagramm zur Bestimmung der Startpunkte der Flugzeuge	76
Abbildung 25: Festlegung der Flugzeugstartpunkte.	77
Abbildung 26: Heuristik zur Erstellung von Flugzeugumläufen über die sequentielle Suche nach Umläufen für jedes Flugzeug	79
Abbildung 27: Heuristik zur Erstellung von Flugzeugumläufen über die Simulation von Flugzeuggewebungen.	80
Abbildung 28: Verkettung von Zufallseffekten in der Simulation der technischen Zuverlässigkeit	82
Abbildung 29: Exemplarische Zusammensetzung der Ausfallwahrscheinlichkeit der technischen Zuverlässigkeit	83

Abbildung 30: Modellierung der Verspätungsdauer durch eine Gamma-Verteilung.....	84
Abbildung 31: Theoretischer Verlauf von Verspätungskosten (vgl. ITA, 2000,S.5-6)	88
Abbildung 32: Übersicht zu Ergebnissen zu Verspätungskosten (vgl. Eurocontrol, 2007, S.7-8)	88
Abbildung 33: Zusammenfassung der verschiedenen Rechte für Passagiere aufgeteilt nach Annullierungen und Verspätungen (s.a. EU, Regulation (EC) No. 261/2004)	89
Abbildung 34: Kostenfunktion zur Berechnung der Leistungen nach §9 von Passagieren bei Verspätungen	92
Abbildung 35: Unterschiedliche (nach der Dauer der Verspätung und der Flugstrecke des betroffenen Fluges) Kostenfunktion für Kompensationszahlungen bei Verspätungen durch Annullierungen.	93
Abbildung 36: Treibstoffkosten und Kosten für die Nutzung der GPU.....	96
Abbildung 37: Zusätzliche Kosten für Abstellpositionen an Flughäfen	97
Abbildung 38: Zusatzkosten durch Kabinen und Cockpitpersonal	102
Abbildung 39: Modellierte Kosten für Verspätungen und Annullierungen	103
Abbildung 40: Zusammenhang zwischen Zufallseignissen und Recovery-Strategien einer Fluggesellschaft.	106
Abbildung 41: Übersicht zu den drei Grundtypen der Recovery Strategien	108
Abbildung 42: Exemplarische Darstellung zweier Annullierungsumläufe in einer Rotation mit 6 Flugverbindungen.....	110
Abbildung 43: Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeiten zu Generierung neuer Rotationen anhand zweier Rotationen A und B.....	112
Abbildung 44: Zuordnung der Kostenfaktoren zu den Recovery-Strategien.	114

Abbildung 45: Ausgangssituation in jeder Verspätungssituation am Beispiel zweier Flugzeug (AC #1 und AC #2), wobei nach Flug 1 einer Verspätungssituation eintritt.	115
Abbildung 46: Mögliche Recovery Strategien als Reaktion auf die Verspätungssituation aus Abbildung 45: Die Pushback Variante verschiebt alle Flüge der Rotation von AC #1 um die Verspätungslänge. Unterschied zu Abb. 45 besteht darin, dass Flug 2 und Flug 3 später stattfinden.....	115
Abbildung 47: Mögliche Recovery Strategien als Reaktion auf die Verspätungssituation aus Abbildung 45:Der Annullierungsumlauf streicht die Flüge 2 und 3	115
Abbildung 48: Mögliche Recovery Strategien als Reaktion auf die Verspätungssituation aus Abbildung 45. Im Post-Szenario wird der primär verspätete Flug 2 an die Rotation von AC #2 angehängt und erfolgt somit nach Flug 5.	115
Abbildung 49: Mögliche Recovery Strategien als Reaktion auf die Verspätungssituation aus Abbildung 45. Im Pre-Szenario wird der primär verspätete Flug an den Anfang der Rotation von AC #2 gestellt.....	116
Abbildung 50: Mögliche Recovery Strategien als Reaktion auf die Verspätungssituation aus Abbildung 45. Im Exchange-Szenario werden verschiedene Flüge innerhalb beider Rotationen ausgetauscht, so dass Flug 5 und Flug 4 jetzt von AC #1 und Flug 2 und Flug 6 von AC #2 durchgeführt werden.	116
Abbildung 51: Flussdiagramm zur Bestimmung des optimalen Szenarios für ein ungeplantes Ereignis	120
Abbildung 52: Relative Kostenfunktionen für Verspätungen und Annullierungen	125
Abbildung 53: Analyse des Algorithmus hinsichtlich der Anwendbarkeit für die Fallstudie.....	126
Abbildung 54: Verteilung der Häufigkeit von Szenarien innerhalb eines Durchlaufs. Push-back und Short Cycle als „Single-Rotations-Veränderungen“ sind hervorgehoben.	127
Abbildung 55: Anzahl der gültigen Szenarien bei einem TDR-Ereignis...	128

Abbildung 56: Einteilung der Kosten eines Szenarios in Kategorien und Wahrscheinlichkeiten. Auf der x-Achse sind die Kosten eines Szenarios in EUR 2000 Segmente kategorisiert.	129
Abbildung 57: Relativer Anstieg und Elastizität der Gesamtkosten mit sinkender technischer Zuverlässigkeit der Flotte	131
Abbildung 58: Veränderung der Zusatzkosten einer Frequenz.	132
Abbildung 59: Relative Anteile der Zusatzkosten mit sinkender technischer Zuverlässigkeit der Flotte	133
Abbildung 60: Vergleich der Kostenfaktoren zwischen Netzwerk 1 und Netzwerk 2	134
Abbildung 61: Anteil der Zusatzkosten an den durchschnittlichen direkten Betriebskosten eines Fluges	135
Abbildung 62: Primäre und reaktionäre Verspätungen	136
Abbildung 63: Im Vergleich, relatives Wachstum der akkumulierten Verspätungen bei einem Durchlauf bei sinkender TDR – ohne Angabe der y-Achse	137
Abbildung 64: Qualitative Wirkung einer Verbesserung der TDR auf eine Fluggesellschaft	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung der IATA Delay Codes 41-49 für technische Defekte am Flugzeug (http://www.b737mrg.net/ , Stand Juli 2009)	25
Tabelle 2: Diskussion existierender Methoden hinsichtlich der Anwendbarkeit für die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit	63
Tabelle 3: Intervallwerte der Verspätungsfunktion für Passagierkosten	91
Tabelle 4: Kompensationszahlungen für Annullierungen von Flügen bei „Denied Boardings“ und der Umbuchung auf andere Flüge (EU, 2004, §5 und §7).....	92
Tabelle 5: Intervallwerte der Annullierungsfunktion für Passagierkosten ..	93
Tabelle 6: Eingabeparameter für die Berechnung zusätzlicher Personalkosten	101
Tabelle 7: Indices und Mengen des mathematischen Modells	103
Tabelle 8: Binäre Entscheidungsparameter	104
Tabelle 9: Variablen	104
Tabelle 10: Mathematisches Modell	104
Tabelle 11: Übersicht zu den 3 Grundtypen und 6 Subtypen an möglichen Recovery-Strategien.....	114
Tabelle 12: Charakteristische Größen der verwendeten Kurzstreckennetzwerke (OAG 2004)	123

1. Fluggesellschaften im Spannungsfeld zwischen Kostendruck und Systemgrenzen

1.1. Motivation und Zielsetzung

Es scheint schon fast zu einem unumstößlichen Mythos der Luftfahrt geworden zu, dass der Luftverkehr stetig wächst. Jedes Jahr veröffentlichen Airbus und Boeing ihre Marktprognosen und stellen unisono fest, dass dieser Trend die nächsten 20 Jahre mit durchschnittlich 5% pro Jahr anhalten wird. Im Detail scheiden sich natürlich die „Boeing und Airbus Geister“, ob nun mehr „Point-to-Point“ mit der B787 oder mehr „Hub&Spoke“ mit einer A380 geflogen wird. Der gemeinsame Tenor ist jedoch immer derselbe: es geht bergauf mit dem Luftverkehrswachstum. Dieses Wachstum muss jedoch von allen Teilnehmern des Luftverkehrs getragen werden: Fluggesellschaften beispielsweise, die enormen finanziellen Schwankungen unterworfen sind, oder auch Flughäfen, die an der Kapazitätsgrenze operieren. Schlussendlich müssen alle Teilnehmer des Luftverkehrs einen Beitrag leisten, damit sich der Luftverkehr in den nächsten Jahren fast verdreifachen kann.

Das Luftverkehrssystem, wie typische Darstellungen des Luftverkehrs heute und in 20 Jahren zeigen (vgl. auch Guest T. 2007, S.40), wird sich über seine heutigen Kapazitätsgrenzen hinaus entwickeln müssen, um dieses Wachstum von 5% pro Jahr aushalten zu können. Erste Anzeichen, dass das Wachstum des Luftverkehrs schneller als das der Infrastruktur geschieht, zeigen sich in den monatlichen und jährlichen Berichten der Eurocontrol unter dem Titel eCODA. Eine Auswertung dieser jährlichen Berichte zum Status der Verspätungen in Europa zeigt, dass bei einem Luftverkehrswachstum von durchschnittlich 4,5% zwischen 2004 und 2007 die Verspätungen bei Landungen um 1,15% und bei Starts um 1,75% gestiegen sind (vgl. Eurocontrol 2004 – 2007, S.1)¹. Die Eurocontrol hat hierzu folgendes festgestellt (Guest T. 2007, S.39): „Wenn der Luftverkehr zwischen 2005 und 2011 um 21.7% wachsen will, muss die Kapazität des Systems Luftverkehr ebenfalls um 27% wachsen.“ Studien in den USA stellen sogar fest, dass bei einem Wachstum des Luftverkehrs in den USA um 1%, die Häufigkeit von Verspätungen um 5% steigt (Clarke et al. 2006, S.16). An dieser Stelle lässt sich spekulieren, wie vergleichbar die Märkte

¹ Im Vergleich dazu hat sich in 2008 aufgrund der Treibstoffpreise und des Konsolidierungstrends in der Luftfahrtindustrie nur ein Wachstum von 0,4% ergeben, das zu einer Verbesserung der Verspätungslage um -0,8% und -2,1% bei Landungen und Starts geführt hat

USA und Europa sind bzw. welche Entwicklung eine Vorreiterrolle einnimmt. Eines ist jedoch eindeutig: das Luftverkehrswachstum auf der einen Seite führt ohne Veränderung des Systems auf der anderen Seite auch zu einem Wachstum der Verspätungen. Eine Studie der Universität von Westminster aus dem Jahre 2004 (Cook A. 2004, S.XII) hat hierzu basierend auf Umfragen mit Fluggesellschaften festgestellt, dass sich die jährlichen Verspätungskosten in Europa zwischen €840 und €1.200 Millionen beliefen und Verspätungen beispielsweise, die länger als 15 Minuten dauern, €72 pro Minute kosteten. In den USA wurden die Kosten durch Verspätungen im Jahr 2000 sogar auf \$6,5 Mrd. geschätzt (Shan L. et al. 2006, S.16).

Gleichzeitig befindet sich die Luftfahrt in der Krise. Die großen Fluggesellschaften der USA befinden sich fast durchgängig im „Chapter 11“ - dem Insolvenzverfahren der USA. Abbildung 1 zeigt hierzu, dass sich die Top 7 Fluggesellschaften in den USA seit 2002 bezüglich des operativen Ergebnisses nicht mehr erholen konnten.

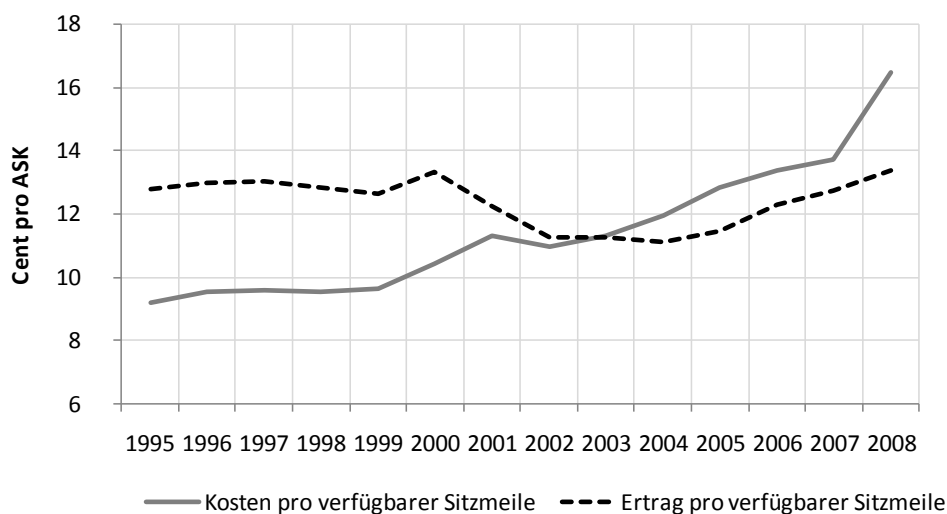


Abbildung 1: Kosten und Erträge amerikanischer Fluggesellschaften (American, Continental, Delta, Northwest, United, US Airways, America West) (MIT, 2009)

Der Branchenriese Europas, die Lufthansa, die in den letzten Jahren Wachstum durch strategische Zukäufe anderer Fluggesellschaften erzielen konnte, sieht sich gezwungen bis 2012 15% der Arbeitsplätze zu streichen, um dem Druck der Low-Cost Fluggesellschaften in Europa nachzugeben (Handelsblatt 2009). Gleichzeitig kann sich auch British Airways nicht dem irischen LCC-Konkurrenten Ryanair entziehen und muss daher über jede erdenkliche Möglichkeit zur Senkung der Kosten nachdenken (Handelsblatt

2009). Der Low-Cost Trend der letzten Jahre hat gerade bei den Kostenstrukturen der etablierten Fluggesellschaften zu einem Umdenken geführt. Ein Teil dieser Kostenstruktur wird durch die Gestaltung des Flugplans festgelegt, der - beim BMV nach §63b der Luftverkehrszulassung genehmigt - das Produktionsprogramm und somit Angebot und Nachfrage der Fluggesellschaft repräsentiert. Nach Jasvoin (vgl. Jasvoin L. 2006, S.24-25) liegt der Anteil der Kosten, die durch dieses Produktionsprogramm festgelegt werden bei 85% der operativen Kosten. Hierzu zählen flugvariable Kosten (50%), Flugzeugvariable Kosten (20%) und sonstige Fixkosten (15%). Die übrigen 15% der Kosten entstehen aus Passagier-getriebenen Kosten. Durch die Gestaltung des Flugplans also wird die operative Kostenstruktur einer Fluggesellschaft zu 85% definiert. Jede einzelne Verspätung in einem Flugplan führt zu einer Störung des Produktionsprogramms der Fluggesellschaft und stellt daher ein erhebliches und unplanbares Kostenrisiko dar. Fluggesellschaften haben daher das vitale Interesse dieses Risiko zu minimieren.

Laut der Eurocontrol (Guest T. 2007, S.44) sind Fluggesellschaften für 50% aller Verspätungsfälle selbst verantwortlich, wobei der Anteil technischer Gründe im September 2009 mit ca. 38% die größte Rolle spielte, wie Abbildung 2 zeigt.

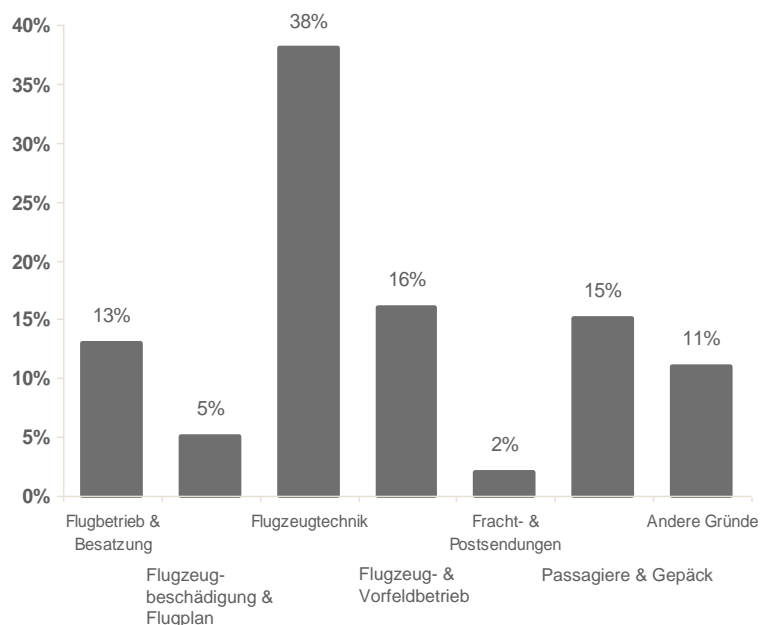


Abbildung 2: Relativer Anteil der Verspätungsgründe im September 2009 (in Anlehnung an Eurocontrol 2009, S.30)

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein ungeplantes Ereignis von einer technischen Störung abhängt, wird hierbei über den Begriff der technischen Zuverlässigkeit (eng. Technical Dispatch Reliability – TDR) gemessen. Diese beschreibt das Verhältnis der durchgeführten Flüge, die nicht einer technischen Störung unterliegen und keine ungeplante Veränderung des Flugplans verursachen, und der Anzahl aller geplanten und durchgeführten Flüge in einer festen Planperiode. Störungen beziehen sich hierbei auf jede Art von Verspätungen oder Annullierungen mit technischem Hintergrund. Die Größenordnung der TDR lässt sich an folgendem anschaulichem Beispiel erklären: Fluggesellschaften in Europa betreiben Kurzstreckennetzwerke mit einer durchschnittlichen TDR von 99,5% pro Flugzeug. Dies bedeutet, dass unter der Annahme von 200 Flügen pro Tag 1 Flug einer technischen Störung unterliegt, die wiederum Verspätungskosten für die Fluggesellschaft verursacht.

Neben der operativen Bedeutung der Kenngröße der technischen Zuverlässigkeit, wird deren Ausfallverhalten bereits in der Entwicklungsphase der Hersteller festgelegt. So haben sich alle Komponenten-Hersteller (e.g.: Hamilton Sundstrand, Honeywell, Goodrich, Messier Dowty, etc.) aber auch Flugzeughersteller (e.g. Airbus, Boeing, etc.) bereits in der Entwurfsphase des Flugzeugs durch die Entwurfsphilosophie jeder einzelnen Komponente auf die theoretische Wahrscheinlichkeit MTBR (eng.: MTBR = Mean Time between Removal) festgelegt: diese beschreibt den Zeitraum zwischen zwei geplanten oder ungeplanten Ereignissen und beeinflusst somit indirekt gleichsam Wartungskosten als auch ungeplante Kosten. Diese Wahrscheinlichkeit steht im engen Zusammenhang zur technischen Zuverlässigkeit TDR, indem sie die Ausfallhäufigkeit einzelner Komponenten beschreibt und deren kumulierte (aber nicht summierte) Wirkung der TDR zuschreibt. Im Entwurfsprozess werden daher einerseits die operativen Wartungskosten für jedes System maßgeblich geprägt, andererseits wird zu einem gewissen Anteil über die Häufigkeit von Verspätungen und Annullierungen im Betrieb des Flugzeugs entschieden. Der Hersteller übernimmt somit eine gewisse Verantwortung für die Zuverlässigkeit seines Produkts und dessen Einfluss auf die operativen Kosten einer Fluggesellschaft.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass die technische Zuverlässigkeit eine typische technische und operative Kenngröße einer Fluggesellschaft darstellt, die durch die Entwurfskonzepte der OEMs bereits in einem sehr frühen Stadium des Flugzeuglebenszyklus festgelegt wird, aber einen entscheidenden Einfluss auf den Betrieb und die operativen Kosten einer Fluggesellschaft nehmen kann. Es ist ein

Messinstrument, das für den reibungslosen technischen Betrieb des Flugzeugs sorgen kann, aber auch ein Messinstrument für die Qualität der Ingenieurs- und Wartungsarbeiten bei den Fluggesellschaften darstellt.

Es stellt sich daher die Frage, welchen Wert die technische Zuverlässigkeit für eine Fluggesellschaft hat im Hinblick auf sinkende Gewinne und steigenden Wettbewerb? An dieser Stelle soll der Begriff Wert als Kosteneinsparung oder Kostenerhöhung durch eine veränderte TDR definiert werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, eine Methodik zu entwerfen, die den operativen Einfluss der technischen Zuverlässigkeit auf den Betrieb eines Streckennetzwerks analysiert und monetär quantifiziert.

1.2. Vorgehensweise

Ausgehend von dieser Fragestellung, wird im Folgenden die Vorgehensweise, die sich gleichzeitig in der Reihenfolge der Kapitel widerspiegelt, beschrieben.

Zur Einordnung der Fragestellung in den geeigneten Kontext, werden in Kapitel 2 die wichtigsten Themen aufgegriffen und erklärt. Hierzu gehört eine Einführung in das Thema Netzwerkmanagement einer Fluggesellschaft, um die Grundlagen der Flugplanerstellung und Reaktion auf Störungen zu verstehen, die sich in der Modellierung und Analyse der Ergebnisse wiederfindet. Hierbei wird besonders auf die Analyse von möglichen Reaktionsstrategien auf Störungen wertgelegt, die die Basis der Heuristik bilden werden. Zusätzlich werden Informationen zu Gründen und Statistiken von Verspätungen, die bereits in der Einleitung dieser Arbeit angedeutet wurden, vertieft. Hierbei stehen auch die Kostentreiber für Verspätungen im Vordergrund. Außerdem wird noch eine kurze Einführung zur mathematischen Modellierung und Optimierung von Netzwerken gegeben, die die theoretische Grundlage der Heuristik bildet.

Inhaltsübersicht	
Kapitel 2	<ul style="list-style-type: none"> • Planung und Modellierung von Flugplänen • Gründe und Wirkung von ungeplanten Ereignissen • Kostenfaktoren ungeplanter Ereignisse
Kapitel 3	<ul style="list-style-type: none"> • Ableitung von Anforderungen zur Bewertung der technischen Zuverlässigkeit
Kapitel 4	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussion der existierenden Literatur • Vergleich des Status-Quo mit den Anforderungen aus Kap. 3
Kapitel 5	<ul style="list-style-type: none"> • Architektur der Methodik • Aufbau der Monte-Carlo Simulation • Modellierung der Recovery-Strategien
Kapitel 6	<ul style="list-style-type: none"> • Eigenschaften des Bewertungsmodells • Anwendung des Methodik für 2 Kurzstreckennetzwerke • Diskussion der Ergebnisse
Kapitel 7	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenfassung und Ausblick

Abbildung 3: Darstellung der Vorgehensweise

In Kapitel 3 werden die Anforderungen an eine Bewertungsmethodik aus den Informationen in Kapitel 2 abgeleitet, deren Umsetzung in Kapitel 4 an Hand einer detaillierten Analyse des Status-Quo der wissenschaftlichen Arbeiten zu diesem Themenbereich überprüft werden. Da es zum Themenbereich der Flugplanoptimierung eine Vielzahl von Arbeiten gibt, wurden die wichtigsten, die eine direkte Verbindung zur Modellierung von Störungen haben, nach Autoren gruppiert, aufgeführt und analysiert. Den Abschluss des Kapitels bildet der Vergleich der Anforderungen aus Kapitel 3 mit den Informationen aus Kapitel 4.

Kapitel 5 bildet den Kern der Arbeit und beschäftigt sich mit der Bewertungsmethodik der Fragestellung. Hierzu wird ausgehend von einer generellen Vorstellung zur Vorgehensweise, jeder Prozessschritt der Methodik detailliert erklärt. Hierzu gehört der Aufbau der Flugzeugumläufe, die Modellierung der Störgrößen, die Modellierung einer Zusatzkostenfunktion, der Aufbau einer Monte-Carlo Simulation und die Modellierung der Heuristik inklusive der Recovery-Strategien. Abschließend werden die Grenzen der Methodik dargelegt.

Die Anwendung der Heuristik wird in Kapitel 6 vorgestellt, in dem die Rahmenbedingungen des Fallexperiments erörtert werden, die Einstellungen bezüglich Qualität und Geschwindigkeit der Heuristik getestet werden und an Hand von 2 Netzwerken eine Auswahl an Ergebnissen präsentiert werden. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Zusammenfassung und kritische Diskussion der Ergebnisse.

2. Die Bedeutung von technisch-bedingten Unregelmäßigkeiten im Flugplan

Das folgende Kapitel bildet die Grundlage für einerseits das Verständnis der Wirkung und der Bedeutung von technisch-bedingten Verspätungen. Andererseits werden die grundlegenden mathematischen Vorgehensweisen zur Lösung von kombinatorischen Problemen vorgestellt. Darauf folgend werden Gründe für Verspätungen insbesondere technisch-bedingte aufgezählt, deren Grundlagen wiederum weiterführend definiert und erklärt werden. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Überblick zu taktischen Reaktionsmöglichkeiten von Fluggesellschaften auf technisch-bedingte Störungen.

2.1. Grundlegende Gedanken zur Modellierung von Netzwerken

2.1.1. Transformation von Airline-Netzwerken in Graphen

Fluggesellschaften wie die Deutsche Lufthansa und Air France unterscheiden sich nicht in der Verwendung unterschiedlicher Flugzeugtypen sondern hauptsächlich durch die Netzwerkstruktur und dem dahinterliegenden Optimierungsgedanken. Es ist daher bei der Betrachtung von Netzwerken essentiell zu verstehen, welcher Grundgedanke hinter der Optimierung dieser steckt. Seitens der Fluggesellschaften übernimmt das Netzwerkmanagement diese Aufgabe.

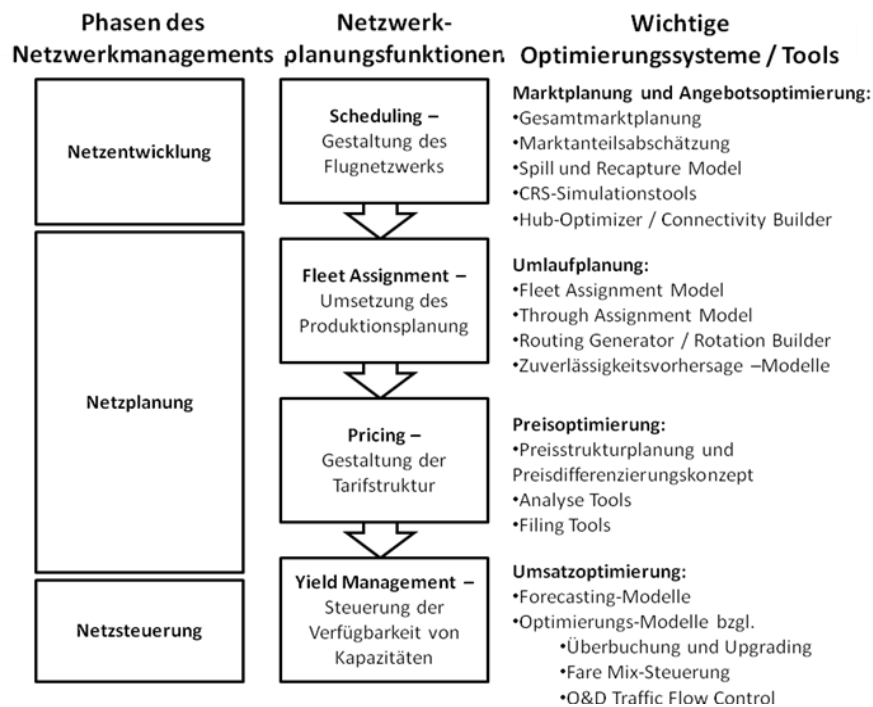


Abbildung 4: Darstellung der Netzwerkplanung als sequentieller Prozess nach Döring (vgl. Döring, T., 1999, S.91)

Dieses unterteilt sich in die Netzentwicklung, Netzplanung und Netzsteuerung, wie in Abbildung 4 dargestellt ist. Die Netzentwicklung beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit der Ausgestaltung des wiederkehrenden Leistungsvermögens einer Fluggesellschaft (vgl. Jacquemin M., 2006, S.62), das die Generierung, Bewertung und Auswahl möglicher Transportkonfigurationen umfasst. Dieser Prozess findet im Rahmen einer langfristigen Planung von 3 Jahren statt und stellt die Fluggesellschaft damit in eine eindeutige finanzielle Abhängigkeit von diesem Planungsinstrument. Fehler in dieser Phase führen zu hohen Fixkostenanteilen, die von der gesamten Organisation mitgetragen werden müssen. In der Netzplanung werden die Konzepte der Netzwerkentwicklung durch das Ertragsmanagement (*Yield Management*) und die Einsatzplanung (*Fleet Assignment*) konkretisiert. In der abschliessenden Planungsphase der Netzsteuerung wird der operative Ablauf des Flugplans umgesetzt und kontrolliert. Hierzu gehören die Zuordnung der Flugzeuge (*Tail Assignment*) und die Verteilung der Besatzungen (*Crew Assignment*) zu den entsprechenden Flugzeugumläufen.

Je nach Wahl der Netzwerkstruktur hat das Netzwerkmanagement daher die Aufgabe verschiedene Optimierungsfragen zu beantworten. Bei der

Wahl traditioneller O&D Netzwerk über dezentrale Point-to-Point Verbindungen steht die Optimierung jeder einzelnen Strecke im Vordergrund. Moderne Netzwerke von Fluggesellschaften jedoch haben sich auf die Optimierung des gesamten Netzwerks optimiert. Dies liegt darin begründet, dass die Gesamtheit der Reisewege so ausgerichtet wird, dass die größte Passagiermenge mit dem höchsten Ertrag in einer optimalen Zeit, bei ausreichender Marktgröße nonstop oder über Umsteigeverbindungen transportiert werden soll (vgl. Maurer, P., 2006, S.381).

Ein Großteil dieser Probleme ist mathematischer Natur und kann über Netzwerke bzw. die Graphentheorie. Ein Netzwerk kann hierbei als gerichteter oder ungerichteter Graph interpretiert werden, der aus Knoten und Pfeilen/Kanten besteht, wie in Abbildung 5 gezeigt. Knoten können beispielsweise Flughäfen repräsentieren und Pfeile Flugverbindungen, denen Kosten oder Kapazitäten zugeordnet werden. Die mathematische Definition eines Graphs lautet hierbei wie folgt:

„Ein Graph G besteht aus einer nichtleeren Knotenmenge V , einer Kanten- oder Pfeilmenge E sowie einer auf E definierten Abbildung w , die jedem Element E aus E genau Knotenpaar i und j aus V zuordnet.“ (Domschke et al., 2005, S.65).

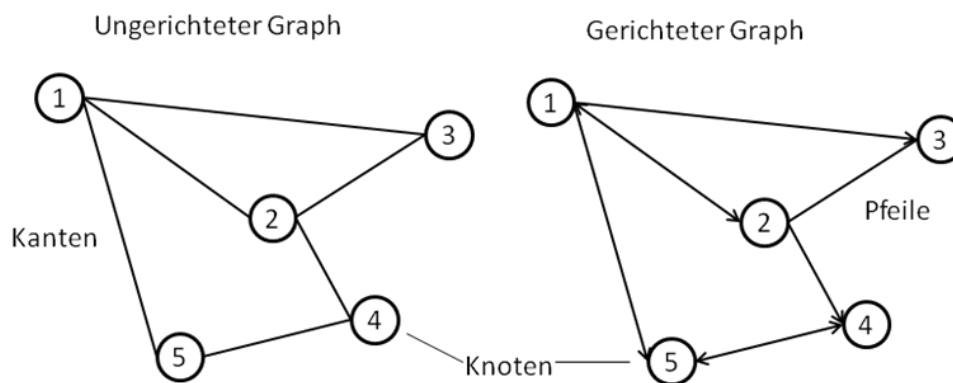


Abbildung 5: Schematische Darstellung von gerichteten und ungerichteten Graphen

Kanten deuten hierbei an, dass zwischen den Knoten i und j über die Kante ohne Richtungsvorgabe ein Fluss zustanden kommen kann. Handelt es sich jedoch um einen gerichteten Graphen ist durch die Richtung des Pfeils die Bewegungsrichtung vorgegeben.

Im Rahmen der Netzwerkplanung können nun potenzielle Verbindungen zwischen Flughäfen entlang einer Zeitachse als gerichteter Graph dargestellt werden. Durch die hohe Komplexität des Netzwerkmanagements werden unterschiedliche Modelle und Optimierung notwendig zur Lösungen verschiedener Fragestellungen. Die Informationen aus der Netzentwicklung werden für die Bearbeitung von mindestens zwei Optimierungsproblemen notwendig; dem *fleet assignment* und der *aircraft rotation*. Ersteres untersucht die optimale Zuordnung von Flugzeugtypen zu Flugverbindungen unter Beachtung der Nachfrage. Das Ziel hierbei ist für jede Flugverbindung das Fluggerät auszuwählen, dass das Angebot an Sitzplätzen möglichst optimal zur Nachfrage der Kunden passt, ohne dass zu viele Kunden zurückgewiesen werden müssen (=Spill-Over). Da sich die vorliegende Arbeit jedoch im weitesten Sinne mit dem Problem der Flugzeug Rotationen (eng.: *Aircraft Rotations*) befasst, wird dieses näher vorgestellt:

Die *Aircraft Rotation* befasst sich mit Findung optimaler Flugzeugumläufe innerhalb des Streckennetzwerks. Ein Umlauf ist hierbei wie folgt definiert: „Ein Flugzeugumlauf stellt das Flugprogramm dar, das von jeweils einem Flugzeug als Teil des gesamten Programmes an einem Tag zu erbringen ist“(Schmidt, E., 2000, S.117). Die Einführung und Beachtung von Flugzeugumläufen ist hierbei essentiell für die Einhaltung von Wartungs- und Personalbeschränkungen. Bei der Erstellung von Umläufen unterscheidet man ein- und mehrtägige Flugprogramme, die sich periodisch wiederholen. Aufgrund der Definition von Flugzeugumläufen als Abfolge von Verbindungen, die am selben Flughafen starten und enden, wird das zugrunde liegende Problem oftmals als Rundreiseproblem formuliert, dass mit bekannten exakten Optimierungsverfahren oder Heuristiken gelöst werden kann (siehe 2.1.2 für weitere Informationen zur Lösung von Linearen Optimierungsproblemen).

„Gute“ Flugzeugumläufe zeichnen sich hierbei durch eine hohe Profitabilität und eine hohe Umsetzung von Wartungsintervallen aus (vgl. Clarke et al., 1997, S.33), wodurch dieser Planungsteil der Netzplanung zu einem kritischen Teilprozess des gesamten Netzmanagements wird. Können vordefinierte Wartungsintervalle nicht eingehalten werden, entsprechen die Flugzeuge nicht dem behördlichen Sicherheitsstandard und können somit nicht am Flugbetrieb teilnehmen. Profitabilität kann sowohl monetär als auch qualitativ über Hilfsvariablen verstanden werden, die neben Kosten auch das Präferenzverhalten der Passagiere beinhalten können.

Durch die Lösung des *Fleet Assignment Problems* werden den Flugverbindungen (=Legs) Flugzeugtypen zugeordnet, die im Rahmen der Lösung der *Aircraft Rotations* hinsichtlich des Umlaufs verfeinert werden. Das grundsätzliche Problem lässt sich hierbei wie folgt illustrieren:

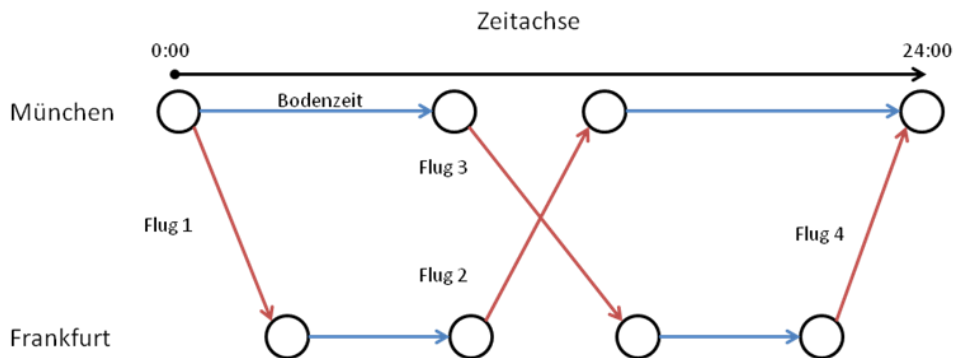


Abbildung 6: Exemplarische Ausgangssituation für die Erstellung von Flugzeugumläufen (in Anlehnung an Clarke et al., 1997, S.34)

Abbildung 6 zeigt exemplarisch ein mögliches Ergebnis des Aircraft Assignments; die Flugverbindung MUC-FRA wird hierbei mit einem bestimmten Flugzeugtyp insgesamt 4mal zu verschiedenen Zeiten angeboten. Das *Aircraft Rotation Problem* steht nun vor der Aufgabe in einem ersten Schritt Flugzeugumläufe zu generieren, um diese dann auf Einhaltung von Wartungsintervallen zu überprüfen.

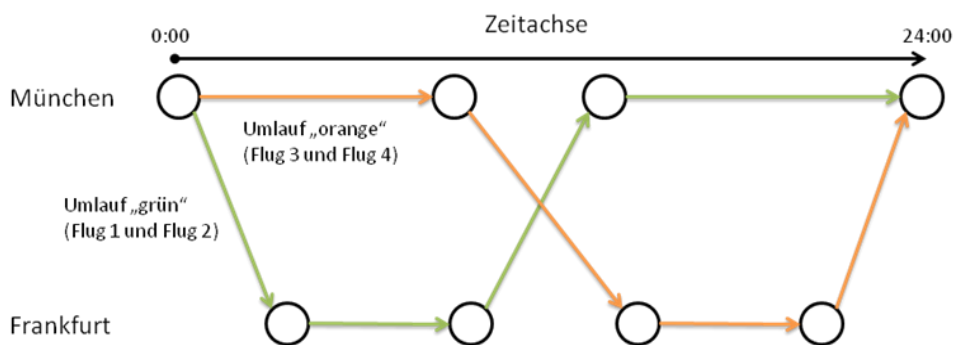


Abbildung 7: Beispiel für einen 2-tägigen Flugzeugumlauf zwischen München und Frankfurt.

Abbildung 7 zeigt einen möglichen Vorschlag für eine Lösung eines 2-tägigen Umlaufs, der mit Teilumlauf „grün“ bestehend aus Flug 1 und Flug 2 startet und bei Teilumlauf „orange“ (Flug 3 und Flug 4) wieder am Flughafen München endet. Die Zielfunktion nach der im Falle des Aircraft Rotation Problem optimiert wird, kann hierbei über eine Vielzahl von

Faktoren modelliert werden. So weißten Clarke et al. jedem Flug einen Nutzen für die Anbindung an Umsteigeverkehr zu (vgl. Clarke et al., 1997, S.36) und maximieren diesen konsequenterweise. Feo und Bard (Feo, T.A. / Bard, J.F., 1989, S.1415 - 1432) stellen keine Kostenfunktion als Zielkriterium auf, sondern minimieren diese für eine 4-Tages Umlauf implizit durch die Minimierung der benötigten Wartungsbasen. Aufgrund der Komplexität des Problems schlagen Sie keine Lösung über exaktes Verfahren vor, sondern präsentieren eine 2-stufige Heuristik. Gopalan und Talluri (Gopalan, R. / Talluri, K., 1998, S.155 – S.185) versuchen beispielsweise das zugrundeliegende Problem mit einer Euler-Tour² zu lösen.

2.1.2. Methoden zur Lösung von Netzwerkplanungsproblemen

Aufgrund der Komplexität des Netzwerkmanagements und besonders der Teilaspekts der Netzwerkplanung, müssen unterschiedliche Probleme gelöst werden, um das Gesamtsystem gemäß der gewählten Netzstrategie optimieren zu können. Da sich jedes Teilproblem (Fleet Assignment, Aircraft Rotation, Yield Management, etc.) wiederum in eine endliche Menge an Subproblemen unterteilen lässt, die mit der Größe des Netzwerkes exponentiell wachsen, werden diese Probleme unter dem Begriff der kombinatorischen Optimierung zusammengefasst. Es geht demnach darum, aus einer nicht überschaubaren Menge an Kombinationen von Aspekten (z.B.: Flugverbindungen und Flugzeugen) unter Beachtung von Rahmenbedingungen (z.B.: Wartung, Personal, Umsteigeverbindung, Flughafen-Slots, Kapazität, etc.) diejenigen zu isolieren, die für eine definierte Zielfunktion einen optimalen oder fast-optimalen Wert erbringen. Der Anspruch der Lösungsmethode liegt vielmehr in der Beherrschung des unüberschaubaren Lösungsraums in einer Zeiteinheit als in der eigentlichen Lösung des Problems. Jede Formulierung eines Teilproblems oder mehrerer kombinierter Teilprobleme (z.B.: die Erstellung von Flugzeugumläufen unter Beachtung von Wartungsintervallen und Crewaspekten) kann hierbei über zwei grundsätzlich Lösungswege von Statten gehen; einerseits existieren exakte Optimierungsverfahren, die optimale Lösungen generieren, und andererseits finden sich Heuristiken, die aufgrund beispielsweise der Komplexität oder der zur Verfügung stehenden Rechnerkapazität nur Näherungslösungen hervorbringen.

² Ein Eulerkreis oder (geschlossener) Eulerzug (auch Eulertour oder Eulersche Linie) ist in der Graphentheorie ein Zyklus, der alle Kanten eines Graphen genau einmal enthält.

Heuristische Verfahren bieten im Allgemeinen keine Garantie, dass ein Optimum gefunden wird. Diese arbeiten vielmehr mit Vorgehensregeln, die für die Problemstruktur sinnvoll und erfolgversprechend sind (vgl. Domschke, Drexl, 2005, S.127).

Exakte Verfahren haben den Anspruch die optimale Lösung zu finden, in dem das zugrundeliegende zu meist ganzzahlige kombinatorische Problem gelöst wird. Sie lassen sich in Entscheidungsbaumverfahren und Schnittebenenverfahren unterteilen.

Schnittebenenverfahren arbeiten nach der Grundidee, das lineare Problem in iterativen Schritten beispielsweise über eine LP-Relaxierung³ durch schrittweises Hinzufügen von Bedingungen solange einzuengen, dass die optimale Lösung am Ende übrigbleibt. Die LP-Relaxierung löst hierbei die Ganzzahligkeit auf und lässt nicht-ganzzahlige Lösungen des Problems zu. Da jede ganzzahlige Lösung auch eine Lösung des LP-relaxierten Problems ist, kann somit der Lösungsraum immer weiter bis zur Findung der ganzzahligen Lösung verengt werden.

Exakte Verfahren	Heuristiken
Entscheidungsbaumverfahren: • Vollständige Enumeration • Unvollständige Enumeration (z.B.: Branch&Bound) • Verfahren der dynamischen Optimierung	Eröffnungsverfahren
Schnittebenenverfahren	Lokale Such- bzw. Verbesserungsverfahren
	Unvollständige exakte Verfahren
	Meta-Heuristiken (z.B.: Tabu- Search, Simulated Annealing, Genetische Algorithmen)

Abbildung 8: Übersicht zu exakten Optimierungsverfahren und Heuristiken (vgl. Domschke, Drexl, 2005, S.126-127)

Entscheidungsbaumverfahren dagegen suchen den Lösungsraum nach speziellen Regeln systematisch nach der optimalen Lösung ab, indem wie beispielsweise in der vollständigen Enumeration alle möglichen Lösungen berechnet und anschließend bewertet werden. Da die vollständige

³ = ohne Beachtung der Ganzzahligkeitsbedingung einer typischen linearen Optimierung

Aufzählung jeder Ausprägung des linearen Gleichungssystems sehr rechenintensiv ist, beschränkt man sich bei der unvollständigen Enumeration auf vermutete optimale Lösung. Lösungen, deren Zielwert durch bestimmte Kriterien als suboptimal gewertet werden können, werden hierbei im Verlauf der Berechnung ausgeschlossen. Ein Verfahren dieser Art ist das *Branch-and-Bound Verfahren*, das sich aus zwei wesentlichen Teilen zusammensetzt; über das Branching wird das zu lösende Ausgangsproblem in Teilprobleme so verzweigt, dass die vereinigte Menge der Teilprobleme die Lösung des Ausgangsproblems beinhalten. Durch die Verzweigung des Problems in Teilprobleme entsteht optisch der Eindruck des namensgebenden Entscheidungsbaums. Da das Branching in Rahmen eine überschaubaren Aufwands gehalten werden soll, übernimmt das Bounding die Aufgabe obere und untere Schranken für die Zielfunktionswerte zu definieren. Dies kann beispielsweise über das Weglassen der Ganzzahligkeitsbedingung oder bei Rundreiseproblemen durch das Weglassen der Zyklusbedingung geschehen (vgl. Domscke, Drexl, 2005, S.132-134. Branch-and-Bound Verfahren können ebenfalls mit Schnittebenenverfahren unter dem Begriff von Branch-and-Cut kombiniert werden.

Heuristiken dagegen arbeiten mit Regelwerken, die das Vorgehen zur Findung der optimalen Lösung strukturieren, um in kurzer Zeit und mit vertretbarem Rechenaufwand eine Lösung zu finden. Eröffnungsverfahren beispielsweise dienen der Bestimmung einer ersten zulässigen Lösung des betrachteten Problems (s.a. Domschke, Drexl, 2005, S.128) und müssen je nach Problemstruktur neu aufgesetzt werden. Der Aufbau und die Ausgestaltung der Suchprozesse jedes Verfahrens ist somit stets problemabhängig (vgl. Jasvojn, L., 2006, S.69). Heuristiken weisen daher nach Zimmermann (**vgl. Zimmermann, H.-J., 1992, S. 259**) folgende Eigenschaften vor:

- Durch die Vorgabe eines Regelwerks wird der Lösungsraum eingrenzt. Es werden nur die Ergebnisse beurteilt, die sich in diesem Lösungsraum befinden. Dadurch können Optima, die durch das Regelwerk ausgeschlossen werden, nicht gefunden werden.
- Der Suchprozess ist immer dem zugrundeliegenden Regelwerk unterworfen und ist somit nicht willkürlich.
- Durch die Begrenzung des Lösungsraums existiert für Heuristiken keine Lösungsgarantie.
- Die Struktur des Problems zeigt die Struktur der Heuristik auf, was dazu führt, dass künstliche Konvergenzkriterien als Stoppregeln festgelegt werden müssen.

- Der Ablauf der Optimierung unterliegt immer Steuerungsmöglichkeiten, die als Adaptionsoptionen des Algorithmus verstanden werden müssen.

Zu den bekanntesten *Eröffnungsverfahren* gehören die Nordwesteckenregel und die Vogel'sche Approximation (vgl. Domschke, Drexl, 2005, S. 128), arbeiten Eröffnungsverfahren mit Bewertungsfunktionen, die nach jedem Schritt das Ergebnis bewerten, spricht man von greedy oder myopischen Algorithmen⁴. Es wird also nur immer nur der Folgezustand betrachtet, der zum Zeitpunkt der Betrachtung der Bewertungsfunktion die größtmögliche Verbesserung verspricht. Greedy-Algorithmen funktionieren daher sehr schnell, lösen Probleme aber meistens nicht optimal. Im Gegensatz dazu arbeiten vorausschauende Algorithmen mit Funktionen, die jeden weiteren Schritt abschätzen. Typischerweise werden zu den deterministischen Eröffnungsverfahren das FIFO-Prinzip (FIFO=First in First Out), das LIFO-Prinzip (Last in First Out) oder das Prinzip des besten bzw. nächsten Nachfolgers gezählt. Alle drei Verfahren arbeiten hierbei nach der Idee, dass typischerweise für einen myopischen Algorithmus nur der potenzielle nächste Schritt bzw. Knoten in einem Graphen bewertet wird ohne vorausschauende Beurteilung der Konsequenzen der Wahl. Es wird demnach in jedem Zustand immer die augenblicklich günstigste Lösung gewählt(vgl. Domschke, Drexl, 2005, S. 144). Die Beurteilung der günstigsten Alternative erfolgt bei der *FIFO-Methode* nach dem „First Come First Served“ Prinzip und bei der *LIFO-Methode* nach einem Verbrauchsfolgeverfahren. Das Element das als letztes hinzugefügt wird, wird als erstes bearbeitet. Das *Prinzip des nächsten Nachbarn* stellt hierbei eine Verallgemeinerung des FIFO und LIFO Prinzips dar. Als weitere Verfahren sind das 2-opt Verfahren oder das Verfahren der sukzessiven Einbeziehung zu nennen.

Lokale Such- bzw. Verbesserungsverfahren starten mit einer zulässigen Lösung, die beispielsweise über ein Eröffnungsverfahren gewonnen wurde, und verbessern diese über deterministische oder stochastische Transformationen der Nachbarschaft schrittweise. Die Nachbarschaft einer Lösung beinhaltet hierbei die Summe aller gefundenen Lösungen, die durch die Anwendung einer Transformationsvorschrift (z.B.: Vertauschen

⁴ Greedy oder myopische (=gierig, kurzsichtig) Eröffnungsverfahren suchen nach geringstmöglicher Erhöhung oder grösstmöglicher Verbesserung des Zielfunktionswertes in jedem Verfahrensschritt im Gegensatz zu vorausschauenden Verfahren (vgl. Domschke, Drexl, 2005, S. 128)

von Elementen, Verschieben von Elementen, oder Veränderung von Elementen an einer Position) entstehen.

Die bekanntesten Vertreter dieser Heuristiken sind Tabu-Search, Simulated Annealing und die genetischen Algorithmen. Diese werden auch als Meta-Heuristiken bezeichnet werden, da eine Kombination mit anderen Verfahren unter dem Deckmantel eines Regelwerks möglich ist. Das *Simulated Annealing* beispielsweise arbeitet als stochastisches Verfahren mit der zufälligen Auswahl einer Nachbarschaftslösung, die durch ein beliebiges Verbesserungsverfahren erzeugt werden kann, und bewertet dieses über einen Zielfunktionswert. Verbessert dieser Zielwert die Lösung wird die Nachbarschaftslösung aus Ausgangspunkt verwendet. Kommt es dagegen zu einer Verschlechterung so wird die existierende Lösung nur einer bestimmten Wahrscheinlichkeit durch die neue ersetzt. Der *Tabu-Search* untersucht dagegen alle möglichen Nachbarschaftslösungen und wählt diejenige mit dem höchsten Zielwert aus, auch wenn diese eine Verschlechterung der globalen Lösung bedeutet. Jede Verschlechterung einer Lösung wird tabuisiert, indem diese für spätere Vergleiche gespeichert wird. *Genetische Algorithmen* arbeiten nach den Prinzipien der Evolution. Nachbarschaftslösungen werden über die Transformationsvorschriften Selektion, Mutation und Cross-Over gebildet und über Generationen hinweg fortgepflanzt, so dass am Ende die Generation mit dem (möglicherweise) besten Zielwert übrigbleibt. *Unvollständige exakte Verfahren* stellen vorzeitig abgebrochene exakte Verfahren dar.

2.1.3. Exemplarische Formulierung eines ganzzahligen Problems zur Bestimmung von Flugzeugumläufen

Im folgenden Kapitel soll exemplarisch das mathematische Modell für die Erstellung eines Flugzeugumlaufs unter Beachtung von Wartungsintervallen aufgeführt werden. Dies wird vor allem ausführlich von Feo und Bard (Feo, Bard, 1989, S.1415-1432), Gopalan und Talluri (Gopalan, R., Talluri, K., 1998, S.260-271), Clarke et al. (Clarke et al., 1996, S.249-260) behandelt. Die Ausführungen richten sich hierbei nach der Arbeit von Feo und Bard (Feo, T.A., Bard, J.F., 1989, S.1415-1432). Das Problem wird hierbei als Minimum-Cost Problem und als Multi-Commodity Netzwerk formuliert. Die mathematische Formulierung sieht hierbei folgendermaßen aus:

$$\min \sum_{j=1}^{n_c} \left[f_j \delta_j + \sum_{i=1}^{n_p} \sum_{d=1}^{n_d} g_j w_{ij(d)} \right] \quad (1)$$

$$\sum_{j^{(d-1)}} x_{ij^{(d-1)}k^{(d)}} - \sum_{j^{(d+1)}} x_{ik^{(d)}j^{(d+1)}} = 0 \quad \forall i, k^{(d)} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n_p} x_{ij^{(d)}k^{(d+1)}} = 1 \quad \forall d, (j^{(d)}, k^{(d+1)}) \in E \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{n_p} w_{ij^{(d)}} \leq p_j \delta_j, \quad \forall d, j^{(d)} \quad (4)$$

$$w_{ij^{(d)}} - \sum_{k^{(d-1)}} x_{ik^{(d-1)}j^{(d)}} \leq 0, \quad \forall i, j^{(d)} \quad (5)$$

$$y_{i,d+1} - y_{i,d} - 4 \left(\sum_{j^{(d)}} w_{ij^{(d)}} \right) \leq -1, \quad \forall i, d, \quad (6)$$

$$x_{ij^{(d)}k^{(d+1)}}, w_{ij^{(d)}}, \delta_j = 0, 1 \quad 0 \leq y_{i,d} \leq 3, \quad \forall i, j, k, d \quad (7)$$

Mit folgenden Indexes und Variablen:

n_d : Planungshorizont
 n_c : Anzahl an Flughäfen
 n_p : Anzahl an Flugzeugen

i : Index für Flugzeuge, $i=1, \dots, n_p$
 j, k : Index für Flughäfen, $j, k=1, \dots, n_c$
 d : Index für Tage, $d=1, \dots, n_d$
 $j(d)$: Flughafen j am Abend des Tages d

$x_{ij^{(d)}k^{(d+1)}}$: Binäre Entscheidungsvariable; wird auf 1 gesetzt, wenn sich das Flugzeug i am Flughafen j am Abend des Tages d und am Flughafen k am Abend des tages $d+1$ befindet, ansonsten 0.

$w_{ij^{(d)}}$: Binäre Entscheidungsvariable; wird auf 1 gesetzt, wenn sich das Flugzeug i zur Wartung am Flughafen j am Abend des Tages d befindet, ansonsten 0.

δ_j : Binäre Entscheidungsvariable; wird auf 1 gesetzt, wenn Flughafen j eine Wartungsbasis ist, ansonsten 0.

$y_{i,d}$: Zustandsvariable, die anzeigt, wieviele Tage d bis zum nächsten Wartungsintervall von Flugzeug i noch vorhanden sind.

p_j : Kapazität der Wartungsbasis am Flughafen j

f_j : Fixkosten für die Wartungsbasis am Flughafen j

g_j : Variable Kosten für die Durchführung der Wartung am Flughafen j

E : Anzahl der Knoten im Graph

Die Zielfunktion (1) minimiert somit die Fixkosten und variablen Kosten für die Durchführung von Wartungsarbeiten innerhalb des betrachteten Zeitraums. Die zweite und fünfte Gleichung beschreiben eine typische Flussbedingung, die sicherstellt, dass jedes Flugzeug nur an einem Ort zu einem Zeitpunkt sein kann. Gleichung (3) sorgt dafür, dass alle Flüge abgedeckt werden durch ein einzelnes Flugzeug, wobei (4) die Anzahl an Flugzeugen beschränkt, die an eine Wartungsbasis gewartet werden können. (6) zeigt den Wartungszeitraum von 4 Tagen an und stellt sicher, dass dieser eingehalten wird. Die letzte Gleichung setzt die Werte für die binären Variablen fest und beschränkt die Zustandsvariable y_{id} auf 3. Die Lösung dieses Problems kann nun sowohl auf exakter Basis oder über eine Heuristik geschehen. Aufgrund der Größe des Lösungsraums untersuchen Feo und Bard dieses Problem mit einer 2-stufigen Heuristik (vgl. Feo und Bard, 1989, S.1423-1426).

Die einfachste und schnellste Möglichkeit jedoch um wartungszulässige Umläufe zu erstellen, besteht in der Anwendung der FIFO oder LIFO Regel (vgl. Gopalan, R., Talluri, K.T., 1998, S.176 und Grönkvist, M., 2005, S.23). Auch wenn hierdurch keine optimalen Umläufe erzeugt werden, befinden sich die Lösungen immer noch im zulässigen Bereich. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes besteht in der Einfachheit und somit geringen Informationsmenge, die für den Umlauf benötigt wird.

2.2. Ungeplante Ereignisse im operativen Betrieb

Grundsätzlich gilt es unterschiedliche Unterscheidungsebenen für die Diskussion des Begriffs „Verspätungen“ aufzuführen: einerseits können Verspätungen auf einem strategischen oder einen taktischen Level verstanden werden, andererseits wird zwischen Primärverspätung und reaktionärer Verspätung unterschieden, wenn man über die Entstehung dieses Phänomens spricht. Ebenfalls gilt es zu unterscheiden, in welcher Flugphase die Verspätung auftritt und welche Ursache zugrunde gelegt werden kann.

Je nach Perspektive ergeben sich daher verschiedene Kostenfaktoren, die analysiert und modelliert werden müssen. Auch die Reaktionsmöglichkeiten der Fluggesellschaften sind unterschiedlicher Natur. Der folgende Abschnitt hat daher das Ziel diese Punkte aufzugreifen und als Grundlage für die Modellierung von Verspätungen in Streckennetzen zu verwenden.

2.2.1. Einordnung von Verspätungen in den Kontext des Netzmanagements

Verspätungen werden allgemein erst dann als Verspätungen interpretiert, wenn mindestens eine Zeitspanne von 15 Minuten abgelaufen ist. Jede Verspätung vor diesem Zeitpunkt wird bei der Erstellung öffentlicher Verspätungsstatistiken oder Berichten nicht hinzugerechnet, obwohl bereits die ersten Kosten auftreten. *„Diesem Schwellenwert liegt die Vorstellung zugrunde, dass man mit kürzeren Abflug- bzw. Ankunftsverzögerungen immer rechnen muss und dass solche Zeitverluste von Fluggästen und Fluggesellschaften nicht als besondere Belastung empfunden werden. Auf Grundlage einer Fühlbarkeitsschwelle von 15 Minuten werden die Verspätungsquoten angegeben (vgl. Lüking, 1993, S.153).* Der Zeitpunkt, ab dem die Zeitmessung für die Verspätung beginnt, ist die planmäßige Off-Block Zeit, die unter regulären Bedingungen das Abdocken des Flugzeugs von einer Gate-Position darstellt. Kann dieser Zeitpunkt nicht genau bestimmt werden, ist es ebenfalls möglich das Schließen der Türen als Off-Block Zeitpunkt zu verwenden.

Abbildung 9 zeigt hierzu die Entwicklung von Verspätungen seit 2005 in Europa für alle Verspätungen und für Verspätungen über 15 Minuten. Neben dem saisonal-bedingten Hoch während der Sommerferienzeit in großen Teilen Europas in den Monaten Juni, Juli und August zeigt sich die Wirkung der 15-Minuten Schwelle. Für den Monat Juli beispielsweise waren 2007 durchschnittlich 55% aller Flüge verspätet, unter Betracht der 15-Minuten Grenze jedoch nur noch 28%. Durch diese Definition wird folglich die Anzahl der verspäteten Flüge von 55% auf 28% halbiert.

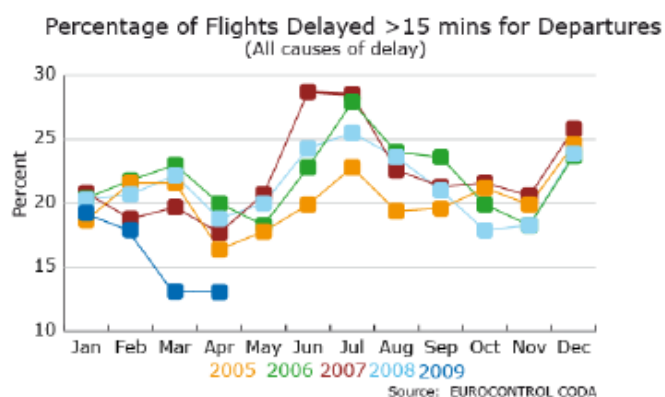
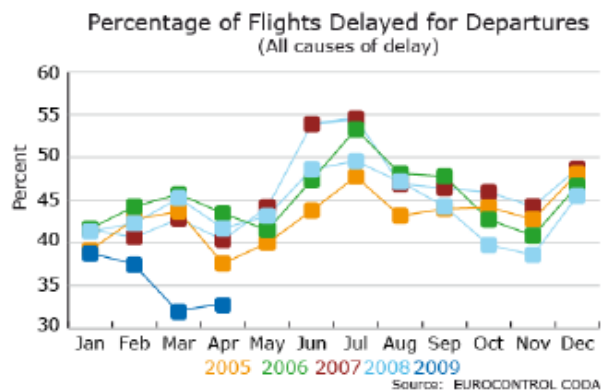


Abbildung 9: Entwicklung von allen Verspätungen und Verspätungen über 15 Minuten für Abflüge im Europäischen Luftraum 2005 – 2009 (Eurocontrol, 2009, S.22)

Durch das Wachstum des Luftverkehrs um bisher 5% p.a. wird die Wahrscheinlichkeit, dass Verspätungen auftreten, immer größer. Dies beruht auf der Tatsache, dass die benötigte Infrastruktur wie beispielsweise Land- und Startbahnen an Flughäfen nicht mit derselben Geschwindigkeit wachsen kann. Diese scheinbare Entkoppelung von Luftverkehr und Infrastruktur wird zum maßgeblichen Treiber für Verspätungen der Zukunft werden. Studien in den USA belegen, dass bei einem Wachstum des Luftverkehrs um 1%, die Häufigkeit von Verspätungen um 5% steigt (Clarke et al., 2006, S.16). Fluggesellschaften reagieren auf diese Tatsache, indem zwischen strategischen und taktischen Ebenen bei der Behandlung von Verspätungen unterschieden wird.

Auf strategischer Ebene sind bestimmte Verspätungsphänomene vorhersagbar; so ist durch Statistiken bekannt, wann mit vermehrtem Auftreten von meteorologischen Phänomenen zu rechnen ist oder welcher

Flughafen am Kapazitätseckwert operieren. Um Verspätungen daher bereits auf strategischer Ebene in der Netzplanung in die Modelle zu integrieren, arbeiten Fluggesellschaften mit Pufferzeiten bei der Planung von On- und Off-Blockzeiten (vgl. ITA, 2000, S.11). Diese beruhen auf statistischen Analysen historischer Operationen und integrieren somit eine statistisch-erwartete Verspätung in den Flugplan. Dies führt natürlich konsequenterweise zu suboptimalen im Sinne von verlängerten Reisezeiten, verkürzt oder verhindert jedoch Verspätungen, denen Passagiere direkt ausgesetzt werden können. Studien in den USA haben bereits darauf hingewiesen, dass diese strategische Maßnahme vermehrt eingesetzt wird (s.a. de Villemeuer et al., 2005, S.8). Die Integration von strategischen Pufferzeiten macht jedoch nur solange Sinn, solange die dadurch entstehenden Kosten nicht größer werden, als die Kosten, die durch die absorbierte Verspätung erzeugt würden. Jede Reduktion der Pufferzeit kann hierbei mit einem Wert zwischen €5-40 angenommen werden (vgl. de Villemeuer et al., 2005, S.14). Gezielte Möglichkeiten zu Reduktion von Verspätungen auf der strategischen Ebene am Beispiel Flughafen Newark können bei Evans nachgeschlagen werden (Evans A., 1998, S.66-77).

Im Gegensatz hierzu steht der taktische Level, der auf ungeplanten Ereignissen beruht. Die Netzsteuerung hat hierbei die Aufgabe auf diese Ereignisse zu reagieren und wenn möglich eine Lösung zu finden, die sowohl den Kunden als auch die Fluggesellschaft zufriedenstellt.

Bezüglich der Wirkung und des Entstehungsortes von Verspätungen muss zusätzlich zwischen primären und reaktionären Ereignissen unterschieden werden. Wird durch ein unmittelbares Ereignis an einem Flughafen eine Störung im Flugplan ausgelöst, spricht man von einer primären Verspätungsquelle, auch taktische gate-to-gate Verspätung genannt (s.a. Eurocontrol, 2004, S.14). Sowohl der Entstehungsort als auch die Wirkung auf den Flugplan sind hierbei auf ein Ereignis bezogen nicht planbar. Hierfür ist eine Vielzahl von Gründen denkbar, deren individuelle Zeitdauer im Vorfeld der Operation nicht abschätzbar ist; folgende Faktoren werden hierbei unterschieden: (1) technische Probleme am Flugzeug, (2) Passagier und Gepäck, (3) Cargo und Post, (4) Flugzeug und Vorfeld, (5) Flugbetrieb und Personal etc. (vgl. ITA, 2000, S. 9-10).

Kann diese Verspätung am unmittelbaren Ort des Geschehens (z.B.: am Flughafen) nicht kompensiert werden, kommt es zu einer Verschleppung der Verspätung in die folgenden Flugereignisse. Die dadurch auftretenden Verspätungen werden somit als Reaktion auf das primäre Ereignis

verstanden und als reaktionäre Verspätungen (oder taktische Netzwerk Verspätungen (vgl. Eurocontrol, 2004, S.14)) im Allgemeinen aufgeführt. Im Gegensatz zu primären Verspätungen sind in diesem Fall jedoch Wirkung und Entstehungsort bis zu einem gewissen Maß vorhersehbar. Fluggesellschaften bekommen durch diesen Informationsvorsprung die Möglichkeit auf die Verspätung frühzeitig zu reagieren, um eine mögliche unkontrollierte Verschleppung in das gesamte Netzwerk zu verhindern. Hierbei investieren Fluggesellschaften enormen Aufwand, um diese Art von Verspätung zu vermeiden. Studien der ITA haben hierbei abgeschätzt, dass jede Minute primäres Verspätung 2/3 Minuten reaktionäre Verspätungen erzeugt (ITA, 2000, S.3). Studien von Eurocontrol haben dieses Verhältnis von 3:2 bestätigt (vgl. Eurocontrol, 2007, S. 34).

2.2.2. Gründe für Ungeplante Ereignisse

Betrachtet man jeden Flug als Prozess so ergibt sich eine Vielzahl von Unterprozessen, die ein komplexes Konstrukt ergeben, in dem jeder Fehler zu Verspätungen führen kann. Betrachtet man die Phase des Turn-Arounds beispielsweise, so setzt sich dieser auf der nächsten untergeordneten Prozessebene aus der Betankung, der Säuberung der Kabine, dem Catering und dem Boarding und Deboarding der Passagiere zusammen. Jeder Subprozess ist hierbei technischen, menschlichen und äußeren Bedingungen wie Wetter unterlegen, die wiederum mögliche Fehlerquellen darstellen. Die Gründe für Verspätungen sind daher sehr mannigfaltig und werden grundsätzlich auf fünf unterschiedliche Quellen verteilt (vgl. Guest, T., 2007, S.11-12):

Alle Ereignisse, die durch Passagiere, Gepäck, Cargo oder Post, Flugzeug und Ramp-Handling, technische Aspekte des Flugzeugs, Schäden am Flugzeug, Flugzeugbetrieb, etc. werden direkt der Quelle Fluggesellschaft zu geordnet. Verspätungen, die am Flughafen entstehen, beruhen zumeist auf Warteschlangen in der luftseitigen Infrastruktur, die an die Kapazitätsgrenze rückt. Auch im Reiseflug spielt der Faktor Kapazität der Luftstraßen (z.B.: Restriktive Lufträume, militärische Lufträume, Aufteilung in Fluglevel) eine Rolle bei Verspätungen. Der unsicherste Faktor bei der Zuordnung von Verspätungen wird dem Wetter zugeordnet, das für Schließung ganzer Flughäfen und Flurouten verantwortlich sein kann. Alle anderen Gründe für Verspätungen werden unter dem Begriff „Miscellaneous“ zusammengefasst. Alle Gründe für Verspätungen sind hierbei in so genannten „IATA Delay Codes“ zusammengefasst, die in Abbildung 10 dargestellt sind (vgl. EuroControl, 2008, S.35 und Guest, T., 2007, S.42-43).

Grund der Verspätung nach eCODA	Beschreibung	IATA Code
Fluggesellschaft	Passagier und Gepäck	11-19
	Cargo&Post	21-29
	Flugzeug&Ramp Handling	31-39
	Technisches Equipment des Flugzeugs	41-49
	Schäden am Flugzeug & Fehler im Ops. Computer	51-59
	Flugbetrieb	61-69
	andere Gründe	andere
Flughafen	ATFM Maßnahmen am Zielflughafen	83
	Einreise, Zoll, Gesundheit	86
	Einrichtungen am Flughafen	87
	Restriktionen am Zielflughafen	88
	Restriktionen am Ausgangsflughafen	89
En-Route	AFTM Maßnahmen durch ATC En-Route Kapazität	81
	AFTM Maßnahmen durch Personal / Ausrüstung	82
Misc.	Misc.	98-99
Sicherheit	Sicherheit	85
Wetter	Wetter	71-79
	AFTM Maßnahmen durch Wetterbedingungen am Zielflughafen	84

Abbildung 10: Überblick zu den IATA Codes für Verspätungen

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Verspätungsgründe seit 2002 so ergibt sich folgende Darstellung, die zeigt, dass Fluggesellschaften mit ungefähr 50% zu Verspätungen beitragen.

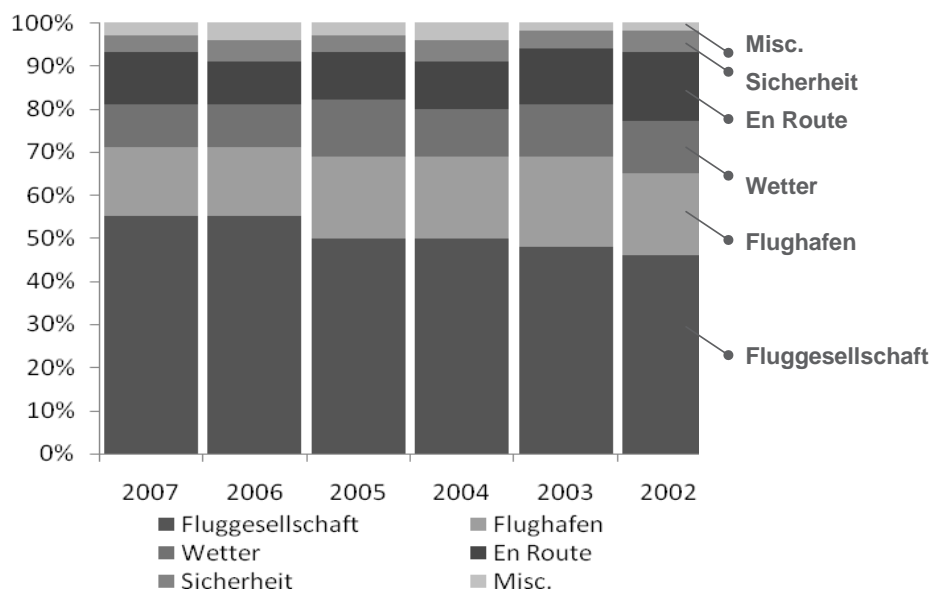


Abbildung 11: Zeitlich Entwicklung der Gründe für Verspätungen von 2002 bis 2007 (vgl. Eurocontrol, 2003-2008)

Hierbei wird durch die IATA folgende Zuordnung von Gründen für den Bereich 41-49 getroffen:

Tabelle 1: Beschreibung der IATA Delay Codes 41-49 für technische Defekte am Flugzeug (<http://www.b737mrg.net/>, Stand Juli 2009)

IATA Delay Code	Beschreibung
41	Fehler am Flugzeug oder in der Minimum Equipment List
42	Verlängerung der geplanter Wartungsarbeiten
43	Ungeplante Wartungsarbeiten
44	Fehlen von Ersatzteilen
45	AOG ("Aircraft on Ground")
46	Tausch des Flugzeugs aufgrund technischer Defekte
47	Fehlen eines "Stand-by" Flugzeugs aus technischen Gründen
48	Geplante Arbeiten in der Kabine
49	Fehlen von Wartungsausrüstung

Analysiert man diese Gründe (nach IATA Codes) näher, kommt man für 2007 zu dem Ergebnis, dass 16,7% aller Verspätungen durch IATA Code 41-47, technisches Ausrüstung und Flugzeug, zustande gekommen sind. Der zweit häufigste Grund sind Problem beim Handling des Flugzeugs auf dem Vorfeld mit 11,3% (vgl. Eurocontrol, 2007, S. 23).

2.2.3. Definition der technischen Zuverlässigkeit von Flugzeugen

Ein Maß für die Häufigkeit dieser IATA Delay Codes ist die s.g. technische Zuverlässigkeit (eng. TDR = „Technical dispatch reliability“). Hierdurch wird das Verhältnis der Flüge, die am Boden ein ungeplantes Ereignis erfahren haben, und der Anzahl der geplanten Flüge ausgedrückt (nicht-verspätete heißt in diesem Zusammenhang, dass alle Verspätungen kleiner als 15 Minuten unberücksichtigt bleiben). Eine Störung am Boden (eng.: Ground Interruption) kann entweder zu einer Verspätung führen oder zu einer Annullierung (vgl. Airbus Industries, 1999, S.13). Eine TDR von 99,5% hierbei drückt aus, dass alle 200 Flüge ein technisches Problem am Boden zu einer unplanmäßigen Verzögerung eines Fluges führt. Diese kann entweder zu einer Verspätung oder zu einer Annullierung führen. Die TDR einer B767 beispielsweise, wie Fielding zeigt, schwankte zwischen 1986 und 1989 zwischen 98,5% und 97,8% (vgl. Fielding, J., 1999, S.258). Im

Gegensatz hierzu kann die technische Verfügbarkeit einer Flotte definiert werden als die Relation der tatsächlichen Verfügbarkeit der Flotte zur theoretisch vorhandenen. Beide Parameter erlauben es somit, die Häufigkeit von Störereignissen außerhalb des Planungsvermögens des Netzwerkmanagements zu bewerten.

Die technische Zuverlässigkeit des Systems „Flugzeug“ verändert sich hierbei durch die Abnutzung der Systeme entweder durch die Flugdauer, die Anzahl der Starts- und Landungen oder eine festgelegte Lebensdauer die TDR mit vorschreitendem Alter. Auch die Betriebsumgebung und die Betriebspolitik der Fluggesellschaft spielen hierbei eine nicht unerhebliche Rolle. Die Definition der TDR führt auch zum Verständnis der der Wartung: jedes Wartungsereignis hat den Zweck, die TDR als Maßzahl der Lufttüchtigkeit wieder auf den Stand des ursprünglichen Levels zu bringen, da sich diese mit der Zeit abnutzt (vgl. Kinnison, H, 2004, S.7).

Ein technisches Problem wird hierbei wie folgt definiert: *„Technische Verspätungen treten dann auf, wenn es zu einer Fehlfunktion eines Systems kommt, wenn die Überprüfung dieses Systems oder notwendige Maßnahmen zu einer Verspätung der Abflugzeit führen. Das Versagen der Technik kann hierbei während des regulären operativen Betriebs oder nach einer Wartungsinspektion verstanden werden“* (Airbus Industries, S.13). Um das Versagen von System und die daraus resultierende Wartezeit durch ungeplante Wartungsarbeiten minimieren zu können, wurde die „Minimum Equipment List“ (MEL) eingeführt. Diese Zusammenstellung von Systemen zeigt an, welche Systeme auch in defekten Zustand den regulären Flugbetrieb nicht stören (Kinnison, H, 2004,S.12 und S.61). Je nach Flugzeugtyp wird hierbei durch den Hersteller ein zertifizierter Vorschlag für die MEL als „Master Minimum Equipment List“ (MMEL) erarbeitet, die jede Fluggesellschaft individuell zu MEL anpassen kann. Zur weiteren Kategorisierung der Systeme und zur Standardisierung von Dokumenten in der Wartung werden alle Systeme nach ATA-Kapiteln von 00 bis 91 unterteilt. So entspricht das Subsystem der Klimaanlage dem ATA-Kapitel 21, das Fahrwerk ATA-Kapitel 32 und das Treibwerk mit allen Systemen ATA-Kapitel 71-79 (Kinnison, H, 2004, S.66). Dieser zweistellige Code wird weiterhin in mehrstellige Kombinationen detailliert und erlaubt daher bei der Analyse von technischen Defekten eine genaue Identifikation des defekten Systems. Die Kontrolle der TDR erfolgt daher seitens der Fluggesellschaften auf der Ebene der ATA-Kapitel, um möglichst schnell Treiber und Ursachen auch im Sinne der Sicherheit zu identifizieren.

2.2.4. Die Bedeutung und Umsetzung der technischen Zuverlässigkeit

Neben der EASA OPS 1, die den Betrieb einer Fluggesellschaft definiert, wird auch das Thema „Lufttüchtigkeit“ eines Flugzeugs bzw. einer Flotte von Flugzeugen durch eine öffentliche Behörde thematisiert. Für Europa hat hierfür die EASA den EASA Part M veröffentlicht, der Grundsätze und Regeln für die Erhaltung der Lufttüchtigkeit eines Flugzeugs darlegt, um die Sicherheit im Luftverkehr in Europa zu gewährleisten. Hierbei werden vor allem folgenden Inhalte für eine Fluggesellschaft in Paragraph EASA Part M Annex I, M.A. 708 formuliert (EU, 2003, L 315/15):

- Jede Fluggesellschaft hat ein Wartungsprogramm zu entwickeln und zu kontrollieren.
- Die Effektivität des Wartungsprogramms muss durch die Kontrolle der technischen Zuverlässigkeit erfolgen. Hierfür ist zusätzlich zum Wartungsprogramm ein Programm für die technische Zuverlässigkeit zu entwickeln und zu kontrollieren.
- Jede Fluggesellschaft muss einen klar definierten Satz an Informationen und Daten speichern, die die Lufttüchtigkeit dokumentieren.
- Jede geplante und ungeplante Wartungsarbeit muss durch einen EASA Part 145 zertifizierten Wartungsbetrieb durchgeführt werden.
- Jeder Defekt bzw. jede Reparatur muss durch einen EASA Part 145 zertifizierten Wartungsbetrieb durchgeführt werden.
- Die Wartungsarbeiten müssen gemäß des Wartungsprogramm geplant und ausgeführt werden.
- Gewicht und Lage des Schwerpunkts („Weight and Balance“) müssen überprüft und dokumentiert werden.

Die technische Zuverlässigkeit ist somit eine Kerngröße zur Kontrolle der Wartungsaktivitäten und somit des Nachweise der Lufttüchtigkeit, die wiederum die Basis für die Betriebserlaubnis einer Fluggesellschaft darstellt. Diese Kontrolle geschieht einerseits über die Kontrolle der Effektivität des Wartungsprogramms und andererseits über die Entwicklung und Implementierung eines Programms zur Kontrolle der Zuverlässigkeit. Der wesentliche Einflussfaktor für die Kontrolle des Wartungsprogramms ist hierbei das reguläre Check-Intervall System der ATA-Systeme des Flugzeugs. So wird je nach Flugzeugtyp durch den Hersteller und internationale Gremien jedes ATA-System kontrolliert. Die Kontrollen lassen sich hierbei nach der Fristigkeit in Line, Base und Heavy Maintenance einteilen. Den Hauptanteil zur Erhaltung einer hohen technischen Zuverlässigkeit bildet hierbei neben der s.g. täglichen Line-Maintenance die Qualität der „Engineering-„Abteilung. Wird diese Arbeit durch einen qualitativ hochwertigen EASA Part 145 und EASA Part M

Betrieb bewerkstelligt, so kann davon ausgegangen werden, dass die technische Zuverlässigkeit maximiert werden kann.

Die Wahl einer Fluggesellschaft für einen geeigneten EASA Part 145 Betrieb oder die Integration dieser Arbeiten in die eigene Organisation spielt daher bereits im Vorfeld des Netzwerkmanagements eine entscheidende Rolle für die Festlegung des 85%-Anteils der Nettwerkkosten (vgl. Jasvoin, L., 2006, S.24-25). Aufgrund dieser hohen Bedeutung der technischen Zuverlässigkeit für Fluggesellschaft haben ca. 95% aller Fluggesellschaften die Line-Maintenance in die eigene Organisation integriert.

Die Kontrolle der technischen Zuverlässigkeit findet einerseits über Leistungsdaten und andererseits über Informationen über ausgeführte Wartungsarbeiten statt. Folgende Informationen können hierfür verarbeitet werden:

- Eintragungen in das „aircraft technical logbook“ über Beanstandungen durch das fliegende Personal
- Beanstandungen aus dem laufenden Wartungsbetrieb (vor allem aus der Line Maintenance).
- Informationen aus operationellen Ereignissen

Gleichzeitig wird aus dieser Aufzählung auch das Dilemma der technischen Zuverlässigkeit sichtbar; ein Teil der Daten, auf denen die Kontrolle der Wartungsaktivitäten aufbauen, hängen von der Berichterstattung von Menschen ab, die wiederum subjektivem und politischen Strömungen unterlegen sind. Folglich kann die technische Zuverlässigkeit von Airline A nicht immer mit der der von Airline B verglichen werden, da verschiedene Rahmenbedingungen gegeben sind.

2.2.5. Taktische Reaktionsmöglichkeiten von Airlines auf Störungen

Wie in Kapitel 2.2.1 bereits beschrieben, muss bei der Behandlung von Verspätungen zwischen strategischen und taktischen unterschieden werden. Nachdem strategische Verspätungen willentlich in den Flugplan als Pufferzeiten eingebaut werden, gilt die folgende Diskussion rein taktischen Verspätungen und somit Maßnahmen zur Behebung von primären Verspätungen.

Zu Behebung von Störungen haben Fluggesellschaften so genannte „Airline Operations Control Center“ (AOCC) gegründet. Im Falle einer

Störung hat eine Fluggesellschaft mehrere Möglichkeiten auf diese zu reagieren. Der s.g. Flight Dispatcher versucht hierbei basierend vor allem auf Erfahrungswerten in Kombination mit Optimierungsmodellen konform zu der jeweiligen Unternehmenspolitik eine möglichst kostengünstige und schnelle Lösung zu finden. Im Vordergrund stehen hierbei vor allem die Vermeidung von reaktionären Verspätungen und die Eingrenzung des Verlustes des Wohlwollens der Passagiere. Kunden- und Kostenorientierung halten sich je nach Unternehmenspolitik hierbei die Waage.

Bei der Wirkung eines technisch-bedingten Ausfalls muss man zwei unterschiedliche Wirkketten unterscheiden. So führt ein technischer Ausfall des Flugzeugs prinzipiell nur dazu, dass das betreffende Fluggerät für einen bestimmten Zeitraum nicht zur Verfügung steht. Der betroffene Flug jedoch, dem das Flugzeug durch den Flugzeugumlauf zugeordnet ist, kann unter Umständen sogar planmäßig durchgeführt werden. Der Zeitpunkt, an dem der betroffene Flug durchgeführt wird, hängt somit von der Gegenmaßnahme der Fluggesellschaft ab.

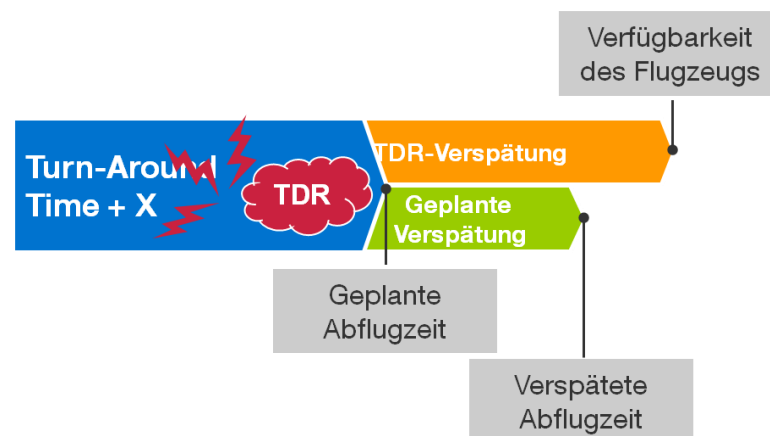


Abbildung 12: Unterschiedliche Wirkung einer Verspätung auf Flugzeug und Flug

Grundsätzlich stehen daher folgende Handlungsalternativen zur Verfügung (Rosenberger et al., 2002, S.363; Mathaisel, D., 1996, S.1093-1094; Morin, M, 1996, S.22-23; Evans, A., 2002, S.59-78; Gierlich et al., S.15-17, 2005; Jasvoin, L, 2006, S.88-90):

Verspäten von Flügen (Push-Back): Der betroffene Flug kann solange verschoben werden, bis das eing geplante Flugzeug wieder zur Verfügung steht. Die geplante Abflugzeit wird bis zur Behebung des Verspätungsgrunds verschoben. Diese Maßnahme stellt somit die einfachste Reaktionsmöglichkeit dar.

Diese Möglichkeit bietet sich natürlich nur dann an, wenn die Verspätung so gering ist, dass mit keinen oder wenigen Konsequenzen zu rechnen ist oder die Durchführung des Flugs keine Verkettung zu nachfolgenden Flügen aufweist. Der Vorteil liegt eindeutig in der Einhaltung der geplanten Umläufe sowohl für das Flugzeug als auch die Crew. Dies wird vor allem bei reinen Point-to-Point Verbindungen der Fall sein im Gegensatz zu Hub&Spoke Netzwerken, in denen fast jeder Flug eine minimale Umsteigezeit zu einem Anschlussflug aufzeigt. Hier kann sich jede Verspätung innerhalb des Netzwerks reaktionär ausbreiten.

Annullieren von Flügen (Cancellation): Überschreitet eine Verspätung eine monetäre und soziale Grenze, die durch die Unternehmenspolitik festgelegt ist, können Annullierungen von Flügen in Erwägung gezogen werden. Der monetäre Anteil dieses Limits stellt eine Abwägung der anfallenden direkten Betriebskosten und der Opportunitätskosten für Verspätungen dar, die soziale Komponente dagegen beschreibt die subjektive Reaktion der Passagiere auf die Verspätung. Annullierungen haben hierbei zwei Konsequenzen zur Folge, die von der Fluggesellschaft für den weiteren Ablauf des Flugplans beachtet werden müssen, da jede Annullierung zu einer Störung des geplanten Flottenumlaufs führt. Entweder wird nach der Annullierung eine neue Flugzeugrotation erstellt, die bei der entsprechenden Behörde (z.B.: FAA in den USA oder DFS in Deutschland) eingereicht und bewilligt werden muss (siehe hierzu Evans, A., 2002, S: 60-61), oder so genannte Annullierungsumläufe werden eingesetzt (vgl. Rosenberger et al., 2002, S.363). Diese beinhalten Annullierungen von Flügen bis der ursprünglich geplante Umlauf wiederhergestellt ist. Fällt beispielsweise ein Flugzeug am Flughafen MUC aus, so werden alle Flüge annulliert, bis der nächste geplante Flug wieder von MUC starten würde. Eine ähnliche Vorgehensweise wird unter dem Begriff „Out and Back“ geführt (vgl. Kohl, N. et al., 2007, S.151).

Diese Möglichkeit stellt jedoch einen sehr drastischen Eingriff in den Flottenumlauf dar und wird als letzte Instanz durchgeführt. Continental Airlines priorisiert hierbei nach Evans (Evans, A., 2002, S: 61-63) zwischen internationalen Flügen, transkontinentalen Flügen, Flügen zu Hubs und Flüge mit hohem Beladefaktor (=Load Faktor) mit hoher Einstufung und Kurzstreckenflügen zu Spokes mit niedriger Einstufung. Bei der Annullierung von Kurzstrecken können beispielsweise alternative Transportmittel (Bahn, Auto) für die betroffenen Passagiere eingesetzt werden. Continental Airlines opfert hierbei sogar Kurzstrecken, um Verspätungen für Langstreckenflüge zu minimieren. Der Vorteil dieser

Maßnahme zeigt sich in der klaren Vermeidung von primären aber vor allem reaktionären Verspätungen.

Leer- bzw. Transferflüge (Ferry-Flüge): Werden Flüge annulliert besteht die Option, das Flugzeug über einen Leerflug ohne Passagiere in den Flugzeugumlauf wieder zu integrieren. Hierdurch ebenfalls gewährleistet, dass betroffene Crew-Mitglieder wieder in den Crew-Umlauf eingeführt werden.

Tauschen von Flügen (Swapping, Aufbau neuer Rotationen): Sowohl Annullierungen als auch Verspätungen können dazu führen, dass der geplante Flugzeugumlauf empfindlich gestört wird. Kosten sowohl aus dem Betrieb des Flugzeugs, ungeplanten Wartungsarbeiten und vor allem Kompensationskosten für Passagiere fallen an. Aus diesem Grund besteht die einfache Möglichkeit eine neue Rotation aufzubauen, indem zwischen zwei der mehr Flugzeugen Teile des Umlaufs getauscht werden. Dadurch können die Anzahl an Annullierungen und möglicher Verspätungen begrenzt werden.

Umleiten eines Fluges (Diversion, Overfly, Flyby, Air Turnback): Kommt es während des Fluges beispielsweise zu wetterbedingten Schließungen von Flughäfen, besteht die Option einen anderen Zielflughafen anzufliegen (Diversion), das nächste Ziel im Umlauf anzufliegen (Overfly) oder zum Ursprungsflughafen zurückzukehren (Air Turnback).

Ersatzflugzeuge: Manche Fluggesellschaften haben zur Behebung von schweren technischen Mängeln Ersatzflugzeuge an zentralen Basen stationiert, die im Falle einer Verspätung einspringen können. Diese Möglichkeit wird jedoch sehr selten angewendet, da einerseits die Bereitstellung von Ersatzflugzeugen eine zusätzliche Kapitalbindung für die Fluggesellschaft ist, die in die direkten Betriebskosten, jedoch nicht durch eigene Produktivität in die Umsatzbilanz eingeht. Andererseits entstehen durch Leerflüge zum Ausgangsort der Störung Zusatzkosten, die die Kostenbilanz des ungeplanten Ereignisses stark belastet.

Operative Maßnahmen: Besonders auf Langstreckenflügen besteht die Option zugunsten einer höheren Reisegeschwindigkeit bei steigendem Treibstoffverbrauch die Reisezeit zu verkürzen. Auch können, wenn möglich, andere Routenpunkte verwendet werden. Kann die Dauer der Verspätung am Zielflughafen im Vorfeld gut eingeschätzt werden, kann ein

so genannten „Preemptive (bevorrechtigter) Take-Off“ durchgeführt werden.

2.2.6. Kostenfaktoren ungeplanter Ereignisse (Einfluss von Verspätungen auf die Fluggesellschaft)

Verspätungen führen neben der Änderung des geplanten Flugplans auch dazu, dass eine Vielzahl von ökonomischen und finanziellen Konsequenzen für die Stakeholder des Systems Luftfahrt entsteht. Neben der Fluggesellschaft erhöht sich der Aufwand auch für die Flugsicherung, den Flughafen und vor allem für den Passagier. Im Folgenden sollen jedoch nur die Kostenaspekte diskutiert werden, die für die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit eine Rolle spielen. Dies hat zur Folge, dass nur Kosten vorgestellt werden, die man direkt dem Betrieb des Flugzeugs zuordnen kann und dem Begriff der taktischen Kosten firmieren. Langfristige Kosten, die durch die strategische Vermeidung von Verspätungen zustande kommen werden nicht weiter betrachtet (siehe hierzu Jasvoin, L., 2005, 98-99).

Für eine Fluggesellschaft ergeben sich bei einer Verspätung fünf Kategorien von taktischen Kosten; Passagierbezogene Kosten, Opportunitätskosten, Zusatzkosten durch den Betrieb des Flugzeugs, Kosten durch das Personal in der Luft und am Boden und Wartungskosten. Zusätzlich ergeben sich Strukturkosten und Konnektivitätskosten, aus der Vorhaltung von Flugzeugen oder Pufferzeiten, um Verspätungen langfristig zu begegnen.

Passagierbezogene Kosten (Kompensation, Unterbringung, Umbuchung): Sobald für den Passagier eine Verspätung entsteht, muss die Fluggesellschaft unter bestimmten Bedingungen Kompensationszahlungen leisten für den Ausfall der Flugreise. Diese Zahlungen sollen nicht nur den Zeitverlust der Passagiere abdecken, sondern auch einen Beitrag zur Erhaltung der Kundenbindung leisten. Neben Zahlungen ist es ebenso möglich Leistungen wie Übernachtungen oder Gutscheine auszugeben, oder die Umbuchung auf eine andere Fluggesellschaft in die Wege zu leiten. Welche Form der Kompensation geleistet wird, hängt hierbei stark von der Unternehmenspolitik der Fluggesellschaft ab. Um die Erbringung einer Ersatzleistung bei Verspätungen oder Annullierungen auf europäischer Ebene zu regulieren, wurde 2004 durch die EU die Verordnung EC No 261/2004 beschlossen, die allgemeingültige Regeln zu Kompensationen und Hilfeleistungen bei verspäteten und annullierten Flügen beinhaltet. Durch die Verordnung wird

sichergestellt, dass Umbuchungen, Kompensationen und Entschädigungen für Tickets geleistet werden müssen, es sei denn es liegen außergewöhnliche Umstände wie politische Instabilität, meteorologische Bedingungen oder Streiks vor.

Verspätungen können ebenfalls dazu führen, dass Anschlussflüge verpasst werden oder Umsteigeverbindungen nicht mehr erreicht werden können. Fluggesellschaften buchen daher Passagiere auf andere Direkt- oder Indirektverbindungen um, die, wenn möglich, innerhalb der eigenen Fluggesellschaft erfolgen. Ist dies nicht der Fall, so wird eine „flight interruption manifest“ (FIM) ausgestellt, das den Weiterflug mit einer anderen Fluggesellschaft ermöglicht. Die Kosten, die sich nach dem IATA Standard Tarif richten, für das FIM trägt hierbei die Ausgangsairline. Der IATA Standard Tarif ist hierbei zumeist um ein Vielfaches teurer als eine normale Buchung. Fluggesellschaften versuchen daher, den Passagier fast immer dazu zu bewegen, eine Verspätung in Kauf zu nehmen, um eine Flugverbindung aus dem eigenen Netzwerk zu nutzen.

Opportunitätskosten (Umsatzausfall): Sowohl durch Verspätungen und besonders durch Annullierungen entstehen Opportunitätskosten, indem durch den Ausfall des Flugzeugs ein Nutzenverlust entsteht, der Einfluss auf die finanzielle Situation der Fluggesellschaft hat. Annullierungen von Flügen führen nicht nur dazu, dass Kompensationen an Passagiere ausgezahlt werden müssen, sondern generieren auch einen Umsatzverlust. Dadurch dass sich Passagiere für andere Fluggesellschaften entscheiden, entgeht der Fluggesellschaft zusätzlicher Umsatz, der bei der Bewertung von Verspätungen berücksichtigt werden muss.

Zusatzkosten durch den Betrieb des Flugzeugs (Fuel, Airport Charges): Verspätungen führen natürlich auch dazu, dass die Betriebskosten des Flugzeugs steigen. Hierzu zählen vor allem die Treibstoffkosten und die Parkgebühren am Flughafen. Führt die Verspätung zu einer Umleitung des Fluges in andere Lufträume kommen zusätzlich ATC-Gebühren hinzu.

Kosten durch das Personal in der Luft und am Boden (Ground Handling): Bei jeder Verspätungen müssen ebenfalls zusätzliche Kosten durch für die Kabinen – und Cockpitbesatzung und für das Bodenpersonal beachtet werden. Die Arbeitsverträge für das fliegende Personal sehen hierbei einen fixen und einen variablen Lohnanteil vor, wobei vor allem letzterer eine Funktion der Arbeitszeit und somit schlussendlich der Flugstunden ist. Jede Verspätung führt demnach zu steigenden

Lohnkosten der aktuellen Crew. Zusätzlich müssen Regelungen für die maximale Arbeitszeit beachtet werden. Werden diese durch die Verspätung überschritten, so muss die Fluggesellschaft eine Ersatzcrew zur Verfügung stellen, deren fixer Lohnanteil vor allem die Verspätungskosten erhöht. Da sich die Ersatzcrew nicht immer am Ort des Geschehens befindet, entstehen weitere Kosten durch deren Anreise.

Detaillierte Informationen zu Crew-Restriktionen der FAA Chapter 1 Part 121 können beispielsweise bei Rabbani nachgelesen werden (vgl. Rabbani, F.F.R., 2004, S.53-54).

Ungeplante Wartungskosten (Reparatur): Wird die Verspätung durch einen technischen Defekt ausgelöst (IATA Code 41-49), müssen zusätzliche Kosten für Reparaturen und Ersatzteile beachtet werden. Diese richten sich nach dem System, das ausgefallen oder beschädigt ist, und nach der Dauer des Ausfalls, für den zusätzlich Personalkosten durch die Wartungscrew entstehen. Wird bei einem Pre-Flight Check ein technischer Defekt bei einem Ausrüstungsgegenstand der Minimum Equipment List entdeckt, so wird generell die verantwortliche EASA Part M Organisation verständigt, das wiederum zertifiziertes Wartungspersonal schickt. Dieser Vorgang wird „On-Call Wartung“ genannt, die Kosten hierfür sind abhängig vom Wartungsvertrag zwischen Fluggesellschaft und Wartungsunternehmen. Alle Defekte, die nicht auf der Abstellposition des Flugzeugs beseitigt werden können, führen dazu dass das Flugzeug aus dem Betrieb genommen werden muss.

2.3. Zusammenfassung

Das zurückliegende Kapitel hat die Verbindung zwischen Netzwerkmanagement und ungeplanten Ereignissen geschlagen. Hierzu wurden die Aufgaben des Netzwerkmanagements aufgezeigt und in Verbindung mit verschiedenen mathematischen Optimierungsansätzen gebracht. Diese wiederum werden in den folgenden Kapiteln aus Grundsatz für das Verständnis der Bewertungsmethodik dienen. Im Folgenden wurden daraufhin die wichtigsten Begriffe aus dem Umfeld der TDR definiert. Dazu gehören die TDR selbst, die Diskussion von Verspätungsgründen und Definition und der EASA Part M als gesetzliche Grundlage. Abschließend sind Möglichkeiten von Fluggesellschaften aufgezählt auf ungeplante Ereignisse zu reagieren und deren Folgekosten.

3. Anforderungen an die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit von Flugzeugen

Das vorausgehende Kapitel hat gezeigt, dass die technische Zuverlässigkeit eine Größe ist, die sich zum einen aus planerischen als auch operativen Aspekten zusammensetzt. Jede Fluggesellschaft versucht durch die individuelle Gestaltung des Netzwerks, der Auswahl der Wartungsunternehmen, der Aufgaben der technischen Abteilungen und der eigenen Reaktionsphilosophie die Planbarkeit des täglichen Betriebs zu maximieren. Aber gerade die Zufallsnatur der technischen Zuverlässigkeit zeigt diesem Prozess die Grenzen auf.

Eine Bewertungsmethodik muss daher sowohl den täglichen Flugbetrieb einer Fluggesellschaft nachbilden als auch die Zufälligkeit der technischen Störung vorsehen. Dies muss zudem in einem Modellrahmen geschehen, der die Zufälligkeit kontrollierbar und bewertbar macht. Es stellen sich daher folgende fünf Anforderungen an eine Methodik zur Bewertung der technischen Zuverlässigkeit:

1. **Modellierung von Reaktionsmöglichkeiten auf technische Störungen:** Jeder technische Defekt greift in ein langfristig geplantes System ein, das wieder in den Ursprungszustand zurück versetzt werden muss. Wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben, stehen hierfür strategische und taktische Möglichkeiten zur Verfügung. Die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit kann also demnach nur möglich gemacht werden, wenn eine Methodik vorhanden ist, die die Entscheidungen der Netzsteuerung zur Minimierung der Verspätungen bzw. der damit verbundenen Kosten abbildet. Diese muss die Auswirkungen einer Störung analysieren, bewerten und die optimale Option auswählen. Hierbei sind sowohl Verspätungen als auch Annullierungen als grundsätzliche Reaktionsmöglichkeit vorzusehen und durch detaillierte Optionen aus dem Repertoire von Fluggesellschaften zu vertiefen (siehe hierzu Kapitel 2.2.5). Zusammenfassend besteht die Anforderung an die Methodik darin, für jede beliebige Situation Reaktionsoptionen zu bilden, diese zu bewerten und die Optimale auswählen. Diese Entscheidung wiederum darf nicht bezogen auf das Einzelereignis getroffen werden, sondern immer mit Blick auf alle betroffenen Flüge.
2. **Nachvollziehbarkeit der Entscheidung durch die Modellierung von deterministischen Zusatzkosten:** Die Entscheidung bezüglich einer Reaktionsmöglichkeit muss hierbei nachvollziehbar und somit

deterministisch sein. Aus diesem Grund muss das Bewertungsmodell jedem Reaktionsszenario eine bewertbare Grundlage zur Verfügung stellen, auf dem die Entscheidung gefällt werden kann. Aufgrund der zumeist finanziellen Ausrichtung solcher Entscheidungen sind hierfür die Zusatzkosten durch einen technischen Defekt zu wählen. Somit muss eine Bewertungsmethodik alle notwendigen Zusatzkosten als Funktion der Verspätungslänge generisch modellieren können. Grundsätzlich sind hierbei Funktionen für Zusatzkosten nach Verspätungen und Annullierungen zu unterscheiden.

3. **Operationelle Darstellung der Netzwerke:** Da die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit auf dem operationellen Betrieb einer Fluggesellschaft aufsetzt, muss der Flugplan als Kernelement simuliert werden. Hierbei ist es nicht das Ziel einen Algorithmus zu schaffen, der einen Flugplan unter Beachtung zahlreicher Nebenbedingungen optimiert. Es ist lediglich notwendig eine bestehende Abfolge von Flügen unter Kenntnis einzelner Flugzeugrotationen und deren Nebenbedingungen zu durchlaufen. Als Nebenbedingungen sind hierfür die minimale Turn-Around Zeit jedes Flugzeugtyps und die Nachtflugverbote an Flughäfen vorzusehen.
4. **Stochastische Modellierung der technischen Zuverlässigkeit:** Durch die Zufallsnatur der technischen Defekte im Betrieb muss eine stochastische Modellierung und Bewertung dieser Zufallsgröße vorgesehen werden. Der unplanbare Charakter hinsichtlich Verspätungszeitpunkt und Verspätungsdauer muss hierbei als Wahrscheinlichkeitsverteilung hinterlegt sein. Gleichzeitig muss zu jedem Zeitpunkt der Operation ein technischer Defekt durch ein Zufallsereignis ausgelöst möglich sein. Aufgrund dessen mehrfachen Zufallscharakters der Störung in Zeit, Ort und Dauer muss eine Möglichkeit vorgesehen sein, die Zufälligkeit simulierbar und bewertbar zu machen.
5. **Beherrschung der Zufallsnatur der TDR:** Die stochastische Natur der technischen Zuverlässigkeit macht die Bewertung einzelner Ergebnisse hinsichtlich des Wertes der technischen Zuverlässigkeit unmöglich. Diese wird erst sinnvoll, wenn eine genügend große Anzahl von Wiederholungen unter denselben Randbedingungen durchlaufen wird und die Ergebnisse hinsichtlich eines Kriteriums stabil sind. Aus diesem Grund bietet sich hierfür die Verwendung einer Monte-Carlo Simulation mit sinnvollen Konvergenzkriterien an.

Anforderungsübersicht	
Welche Reaktionsmöglichkeiten gibt es?	<ul style="list-style-type: none"> • Grundsätzliche Unterscheidung von Verspätungen und Annullierungen • Vorhandensein verschiedenartiger Reaktionsmöglichkeiten
Warum wurde eine Entscheidung getroffen?	<ul style="list-style-type: none"> • Nachvollziehbarkeit der Entscheidung durch deterministische Zusatzkostenfunktionen • Abhängigkeit der Funktionen von der Verspätungsdauer
Wie verläuft der Flugbetrieb weiter?	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau und Simulation eines Flugplans • Beachtung von Randbedingungen wie Turn-Around Zeit und Nachtflugverbot
Wie wird der Zufall dargestellt?	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierung der technischen Zuverlässigkeit als Zufallszahl • Implementierung des Zufalls an jeder Stelle des Flugplans
Wie wird der Zufall bewertbar gemacht?	<ul style="list-style-type: none"> • Integration des Flugplans in eine Monte-Carlo Simulation • Festlegung von geeigneten Konvergenzkriterien
Wie werden die Elemente verbunden?	<ul style="list-style-type: none"> • Integration der Optimierung von Einzelereignissen in die Monte-Carlo Simulation • Wiederholbarkeit der Simulation mit unterschiedlichen Randbedingungen

Abbildung 13: Zusammenfassung der Anforderungen an die Bewertungsmethodik

Zusammenfassend, wie in Abbildung 13 gezeigt, gilt es die Ursache, die Wirkung und die Reaktion auf eine technische Störung zu modellieren. Dies hat zusätzlich in einer Umgebung zu geschehen, die einerseits den Charakter der Störung – die Zufälligkeit – als auch deren Bewertbarkeit erlaubt. Ursache und Wirkung sollen sich in einer Zufallsgröße mit Verspätungsfunktion widerspiegeln. Die Reaktion in deterministischen Optionen, die zur Behebung der Wirkung ausgewählt und bewertet werden können. Die Bewertung soll hierbei über eindeutige Kostenfunktionen geschehen. Sinnvolle Flugzeugrotationen und die Beherrschung der Zufälligkeit müssen hierzu den Rahmen des Modells bilden.

Eine Bewertungsmethodik muss daher diese Anforderungen in Bausteine verpacken und sinnvoll verbinden, um als Endresultat einen Wert für die Veränderung der technischen Zuverlässigkeit zu erlangen. Die Methodik muss also nicht nur einzelne Anforderungen umsetzen, sondern diese in einer sinnvollen Kombination verbinden, was als 6. Anforderung in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt wird.

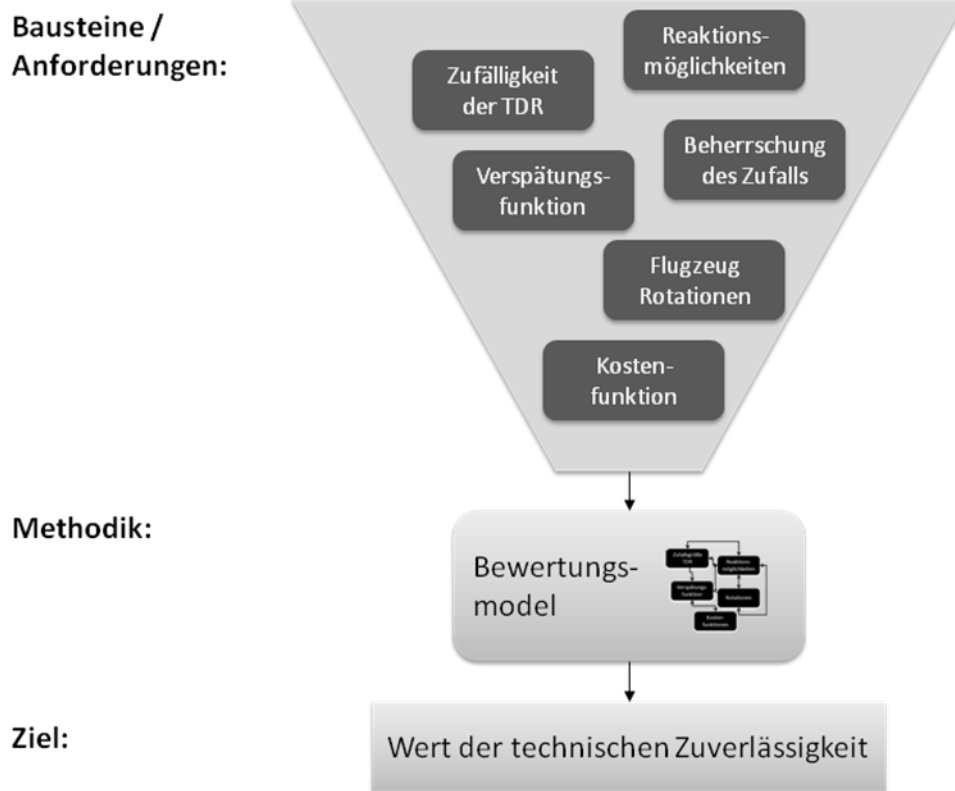


Abbildung 14: Bausteine der Bewertungsmethodik

4. Diskussion existierender Methoden zur Integration und Behebung von ungeplanten Störungen in Streckennetzwerke

Seit Beginn der 90iger Jahre sind eine Anzahl an Veröffentlichungen zum Thema der Integration von Unsicherheitsaspekten in Flugpläne entstanden, die im Folgenden vorgestellt und diskutiert werden. Unsicherheitsaspekte werden hierbei vor allem aus Sicht ungeplanter Ereignisse wie Schließungen von Flughäfen durch ungünstige Wetterlagen oder technische Ausfälle verstanden. Die Diskussion der einzelnen Veröffentlichung wird hierbei entlang der Autoren geschehen, um einerseits die verwendeten Methoden besser verdeutlichen zu können und andererseits eine Entwicklung und vor allem Ausweitung der Ansätze darstellen zu können. Schwerpunkt der Diskussion liegt in der Vorstellung der Modellierung des Flugplans und der Implementierung von Unsicherheitsaspekten. Gerade die Abschätzung der Verspätungs- und Annullierungskosten und typischer Reaktionen bzw. Maßnahmen zur Verhinderung von Verspätungen sollen weiterer Gegenstand der Ausarbeitung sein. Die verwendeten mathematischen Modelle und Lösungsalgorithmen werden nicht im Detail vorgestellt, da diese für die vorliegende Arbeit keine wesentliche Rolle spielen.

Ausgehend von einer Übersicht zur wissenschaftlichen Diskussion zum vorliegenden Thema werden verschiedene wegweisende Veröffentlichungen vorgestellt und am Ende des Kapitels mit den Anforderungen aus Kapitel 3 verglichen.

4.1. Wissenschaftliche Methoden und Ansätze aus dem Bereich der ungeplanten Ereignisse in Flugplänen

4.1.1. Minimierung von Verspätungen aus Sicht der Passagiere

Dusan Teodorovic et al. haben anfang der 80iger Jahre damit begonnen, Netzwerke unter dem Aspekten der Minimierung von Passagier-Verspätungen zu optimieren (Teodorovic, D. / Guberinic, 1984, S.178). Das Netzwerk wird hierbei über einen gerichteten Graphen, indem die Knoten einzelne Flüge und Pfeile Verspätungen darstellen, als Minimum-Flow Problem mit Dummy-Knoten als fiktive Flugzeugquellen und -Senken modelliert. Das Ziel ist es einen für Passagiere Verspätungs-minimalen Weg durch das Netzwerk zu finden. An Hand eines Beispiels von 3 Flugzeugen mit 8 Flügen wird die Lösung über einen Branch&Bound Algorithmus für einen Zeitraum von einem Tag unter Vernachlässigung von Wartungs- und Crewaspekten gesucht. Verspätungen sind gegebene Größen, die als Eingangsparameter in das Modell integriert sind.

In einer weiterführenden Arbeit von Teodorovic (Teodorovic, D., 1985, S.156-164) wird diese Methodik um die Schließung von Flughäfen aufgrund meteorologischer Bedingungen als Verspätungsgrund erweitert. Hierfür wird ein Nutzungsfaktor für Flughäfen definiert, der das zeitliche Verhältnis von möglichen Starts und Landungen in einer frei wählbaren Periode in Relation setzt (vgl. Teodorovic, D., 1985, S.157). In Verbindung mit einer allgemeingültigen Präferenzfunktion, die die tägliche Verteilung der Nachfrage der Passagiere darstellt (vgl. Teodorovic, D., 1985, S.158), kann so der Einfluss von Verspätungen auf Passagiere dargestellt werden. Aufgrund der fehlenden Rechnerleistung zur Lösung dieses kombinatorischen Problems wird das Problem über eine 2-stufige Heuristik gelöst. In einem 1. Schritt werden Lösungen mit minimaler Bodenzeit generiert und so die Mindestanzahl an Flugzeugen bestimmt, die für die vollständige Abhandlung des Flugplans notwendig sind. Die Nutzung der minimalen Bodenzeit korrespondiert hierbei mit der Idee von Bartlett (Bartlett, T.E., 1957, S.139-149) oder Dantzig / Fulkerson (Dantzig, G.B. / Fulkerson, D.R., 1954, S.217-222), die über das FIFO-Prinzip die minimale Anzahl an Zügen bzw. Tankern für einen Ablaufplan bestimmt haben. Der 2. Schritt sortiert die gefundenen Umläufe hinsichtlich minimaler Verspätung für Passagiere und bestimmt so über einen dynamischen Ansatz (vgl. vgl. Teodorovic, D., 1985, S.160-161) Verspätungs-minimale Routen.

Da die früheren Arbeiten nur Verspätungen zuließen, erweitern Teodorovic und Stojkovic (vgl. Teodorovic, D. / Stojkovic G., 1990, S.273-285) diese Methodik durch die Einführung von Annullierungen. Hier sucht die Zielfunktion eines sich täglich wiederholenden Flugplans nach der minimalen Anzahl an Stornierungen unter Beachtung der Verspätungen für Passagiere. Da sich die Lösung des Problems als Hilfestellung für Flugroutenplaner versteht, wird an Stelle einer optimalen Lösung in einem ersten Schritt eine zulässige Lösung über eine Heuristik gesucht. Diese bearbeitet jedes Flugzeug sequentiell über einen Branching Algorithmus, der die Anzahl der Annullierungen je Lösung bewertet. Als Hauptproblem erkennen die Autoren der Veröffentlichung das Fehlen von Wartungs- und Crewaspekten (vgl. Teodorovic D. / Stojkovic G., 1990, S. 284).

In einer weiteren Veröffentlichung (vgl. Teodorovic D. / Stojkovic G., 1995, S.324-331) erweitert Teodorovic diese Heuristik um das FIFO-Prinzip, das einen Flugplaner die Methodik in kürzester Zeit für die Entscheidungsfindung unterstützen soll. Hierfür sollen laut Teodorovic folgende Optimierungsprobleme betrachtet werden (vgl. Teodorovic D. / Stojkovic G., 1995, S.325):

- Die Minimierung der Anzahl der annullierten Flüge und der Anzahl der betroffenen Passagiere
- Die Minimierung der Anzahl an verspäteten Flüge und der Anzahl der betroffenen Passagiere
- Die Minimierung der finanziellen Verluste durch Störungen des Flugplans

Das sich daraus ergebende Optimierungsproblem mit mehrfachen Zielen wird über das lexikographische Prinzip gelöst. Die Durchführung von möglichst vielen Flügen wurde als oberste Priorität gewählt, gefolgt von der Minimierung der Verspätungen für Passagiere. Die beiden hierfür vorgeschlagen heuristischen Algorithmen sind im folgenden Diagramm Abbildung 15 dargestellt:

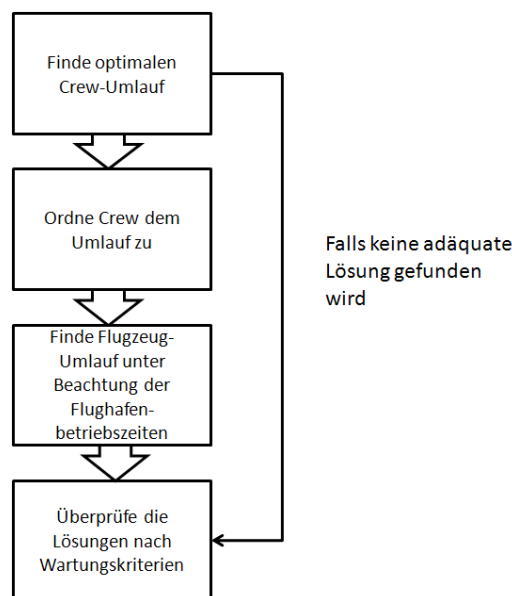


Abbildung 15: Lexikographische Heuristik nach Teodorovic (vgl. Teodorovic D. / Stojkovic G., 1995, S.326) zur Findung des Verspätungs-minimalen Flugzeugumlaufs in einem sich täglich wiederholenden Flugplans.

Die Lösung des Crew-Problems vor der Findung des Flottenumlaufs ist unkonventionell und ist laut Teodorovic eine Funktion der Dauer der Berechnung (vgl. Teodorovic D. / Stojkovic G., 1995, S.326) und somit der zur Verfügung stehenden Computerleistung. Der Umlauf der Crew wird hierbei erst nach dem FIFO-Prinzip und dann mit Hilfe eines sequentiellen Ansatzes der dynamischen Programmierung wie folgt gelöst:

$$f_o(z_o) = 0 \quad \text{Formel 4-1}$$

$$f_i(z_i) = \min[f_{i-1}(z_{i-1}) + R(z_{i-1}, z_i)]; i = 1, 2, \dots, k \quad \text{Formel 4-2}$$

- k =absolute Anzahl an Flügen, die die erste Crew absolvieren kann
- z_i =Knoten i
- $R(z_{i-1}, z_i)$ =Bodenzeit der Crew zwischen Knoten z_{i-1} und z_i

Zur Findung des Flugzeugumlaufs wird nicht der kürzeste, sondern der längste Weg (= die größte Anzahl an Flügen) rekursiv gesucht.

$$g_0(v_0) = 0 \quad \text{Formel 4-3}$$

$$g_i(v_i) = \max[g_{i-1}(v_{i-1}) + R(v_{i-1}, v_i)]; i = 1, 2, \dots, h \quad \text{Formel 4-4}$$

- h =Gesamtzahl an Crew-Umläufen
- y_i =Crew-Umlauf i
- $R(y_{i-1}, y_i)$ =Anzahl an Flügen bis zum i -ten Flug

Unter der Prämisse, dass alle Umläufe in der Basis der Fluggesellschaft enden, in der sich die einzige Wartungsmöglichkeit befindet, werden die erzeugten Flugzeugumläufe nicht mehr auf Wartungsaspekte überprüft, sondern direkt durch den 2. Algorithmus weiterverarbeitet. Dieser kontrolliert die geleisteten Flugstunden des Flugzeugs nach Wartungskriterien und tauscht im Falle von kritischen Umläufen Teile von Umläufen aus.

Durch die Veröffentlichungen von Teodorovic wurde über mehrere Veröffentlichungen eine Heuristik erzeugt, die sowohl Wartungs- als auch Crewaspekte bei der Erstellung von Flottenumläufen beachtet. Diese beruhen immer auf der Idee der sequentiellen Abarbeitung von Flugzeugen und Optimierungsproblemen. Es wird jedoch keine Strategie präsentiert, mit der Verspätungen und Annullierungen minimiert werden können. Dies sind vielmehr an allen Knoten gegebene Inputgrößen des Optimierungsmodells.

4.1.2. SIMAIR – ein stochastisches Model des täglichen Flugbetriebs

SIMAIR beruht auf der Tatsache, dass trotz unterschiedlichster Planungsarbeiten im Vorfeld des Betriebs einer Fluggesellschaft der eigentliche Ablauf des Flugplans einer Vielzahl zufälliger Vorkommnisse unterliegt. Das Ziel der Etablierung von SIMAIR ist es Crew-Umläufe oder Verfahrensweisen zur Behandlung von Störungen im Betrieb auf Basis zufälliger Ereignisse bedingt durch Wetter oder mechanische Fehler

bewerten zu können (vgl. Rosenberger et al. 2000, S.1118-1122). Das Simulationsmodell ist hierbei modular aufgebaut und unterscheidet primär zwischen Starts und Landung an Flughäfen. Diese sind über Markov-Ketten als Warteschlangen modelliert, die entlang einer Simulationszeit bearbeitet werden. Der Faktor Zufall ist in dieses System über Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu Boden- und Flugzeiten implementiert. Der operative Betrieb des Flugzeugs in Form der Flug- bzw. Blockzeit setzt sich aus 6 Einzelereignissen zusammen; Abflug, Startbahn, Take-Off, Luftraum, Anflug und Ankunft. Nach der Ankunft an einem Flughafen wird falls notwendig ein Wartungsereignis initiiert oder zufallsbedingt ein ungeplantes Ereignis eingefügt. Die Reaktionen der Simulation auf Störungen werden über ein Controller-Modul erzeugt, das ebenfalls entscheidet ob s.g. Wiederherstellungshandlungen (eng. „Recovery Actions“) durchgeführt werden. Die Bewertung der Simulationsergebnisse geschieht über eine Vielzahl von Parametern wie Crew-Kosten, die aus SIMAIR hervorgehen (vgl. Rosenberger et al., 2000, S.1121).

Ein vollständiger Flugplan mit folgenden zusätzlichen Daten dient als Eingabe: ein Reihe von Teilstrecken mit zugehöriger Crew (inklusive Crew-Umlauf), Flugzeugumläufe, Informationen zu den beförderten Passagieren und zu Reserve-Crews. Außerdem beinhaltet der Datensatz alle Informationen zu möglichen Störungen; Wettereinflüsse beispielsweise werden über Warteschlangen modelliert (vgl. Rosenberger et al., 2002, S.361-362). Zu jedem Zeitpunkt kann der Zustand für jede Warteschlange am Landebahnkopf jedes Flughafens, aktuelle Taxizeiten, Warteschlangen im Luftraum und angepasste Landezeit bestimmt werden.

Ein Recovery-Modul, das die Wiederherstellung des operationellen Betriebs beinhaltet, überprüft Annullierungen, Deadheading⁵ von Crews, Ferry Flights, Reserve Crews, Tauschen von Flugzeugen oder erstellt neue Umläufe für Crews (vgl. Rosenberger et al., 2002, S.363): Verschiedene Recovery-Policies wiederum bewerten unterschiedliche Reaktionsmöglichkeiten, wie Push Backs (verschieben der Abflugzeit), Short Cycle Annullierungen (Annullieren von mehrere Flügen) und verschiedene Crew bzw. Passagier Optionen, der Fluggesellschaft (vgl. Rosenberger et al. 2002, S.364-370):

⁵ Ein Deadheading bezeichnet die Beförderung von fliegendem Personal als Passagier von oder zu einem Einsatzort.

Das Problem der optimalen Routenfindung nach einer Störung des Flugplans wird durch Rosenberger et al. in einer weiteren Veröffentlichung vertieft (vgl. Rosenberger et al., 2003, S.408-421). Nach einer Betriebsstörung soll hierbei eine Entscheidung zwischen neuen Flugzeugumläufen innerhalb desselben Flugzeugtyps getroffen werden. Hierbei gehen Rosenberger et al. davon aus, dass es einen Schwellenwert (eng. „delay threshold“) für Verspätungen gibt, ab dem die Generierung neuer Routen sinnvoll ist (vgl. Rosenberger et al., 2003, S.409). Da die Festlegung des Grenzwertes nicht trivial ist, wird dieser in den Veröffentlichungen von Rosenberger et al. als frei einstellbare Variable behandelt. Als Vergleichsbasis für Verspätungen und Annullierungen wird eine Zeitspanne von 3 Stunden gewählt (vgl. Rosenberger et al., 2003, S.418). Die neben der Findung neuer Routen existierenden Strategien „Ferrying“ (Leerflüge zu anderen Destinationen), „Diverting“ (Umleiten von Flügen) und „Over-flying“ (Überflug von Flughäfen) werden innerhalb dieses Ansatzes vernachlässigt. Die Modellierung des Flugzeug-Recovery-Problems erfolgt als Formulierung des Mengenpackungsproblems (eng. „set-packing problem“). Hierbei wird die Frage beantwortet, ob es in der Menge aller Flugzeuge mit einer Teilmenge defekter Flugzeuge eine kosten- und wartungsoptimale Routenführung gibt.

Bei der Anpassung des Flugplans achten Airlines laut Rosenberger et al. darauf, dass möglichst der ursprüngliche Umlauf wiederhergestellt wird (Rosenberger et al., 2003, S.412). Können Routen nicht durch das Optimierungsmodell neuen Umläufen zugeordnet werden, werden diese als Annullierungen gehandhabt. In einem Anwendungsfall der Optimierungslogik wird der Schwellenwert für Verspätung, der die Suche nach neuen Routen initialisiert, auf 30 Minuten gesetzt. Gleichzeitig werden Verspätungen bis zu 3 Stunden zugelassen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe von ARO (Optimization Model for Aircraft Recovery) 90-95% der tatsächlichen annullierten Flüge reproduziert werden konnten (Rosenberger et al., 2003, S.418).

Die Thematik der Robustheit von Flugplänen gegenüber Annullierungen wird in der Veröffentlichung von Rosenberger et al. 2004 thematisiert (s.a. Rosenberger et al., 2004, S-357-368). Hier wird ein FAM (Fleet Assignment Model) beschrieben, das Hub-Flughäfen gezielt isoliert, um Short Cancellation Cycles als Maßnahme gegen Betriebsstörungen in den Flugplan zu etablieren. Eine weiterführende Diskussion des Optimierungsmodells ist jedoch für die vorliegende Arbeit nicht wesentlich.

Rosenberger et al. haben in der Veröffentlichungen vor allem zur Routenfindung nach Betriebsstörungen einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis möglicher Reaktionsmöglichkeiten von Fluggesellschaften geliefert. Gerade die methodische Einteilung und Abhandlung dieser verschiedenen Optionen ist für die vorliegende Arbeit besonders interessant.

4.1.3. Ein System zur Echtzeitunterstützung bei der Wiederherstellung von Flugplänen

Cao und Kanafani haben über zwei Veröffentlichungen wesentlich zum Entwurf eines Echtzeit Systems zur Unterstützung bei Entscheidungen bei Betriebsstörungen beigetragen (vgl. Cao, J. / Kanafani, A., 1996, S.183-199 und Cao, J. / Kanafani, A., 1996, S.201-217). Das Problem sowohl Verspätungen als auch Annullierungen in die Entscheidungsfindung mit einzubeziehen wird als quadratisches 0-1 Optimierungsmodell behandelt, das als Zielfunktion die Maximierung des Gewinns hat. Das zugrunde liegende Modell für Verspätungen basiert auf den Arbeiten von Jarrah (vgl. Jarrah, A. / Yu, G. , 1993, S.266-279). Das Netzwerk an Flughäfen wird als untrennbares System behandelt; d.h.: die Wirkungsrichtung von Verspätungen ist durch den Flugplan eindeutig festgelegt und kann nicht umgekehrt oder verschoben werden. Auch die Kosten für die Neuordnung der Flugzeuge müssen im Vergleich zum Ansatz von Jarrah et al. (vgl. Jarrah, A. / Yu, G. , 1993, S.266-279) präzisiert werden.

Die Maximierung des Gewinns setzt sich wie folgt zusammen (vgl. Cao ,J. / Kanafani, A., 1993, S.190-193):

$$\max \varphi = \varphi_1 - \sum_{i=2}^5 \varphi_i \quad \text{Formel 4-5}$$

Der Gewinn φ wird als Differenz von Umsatz und Kosten maximiert. Die Faktoren φ_i beschreiben folgende unterschiedliche Kostenfaktoren:

- φ_1 = Umsatz aller Flüge
- φ_2 = Kosten, die beim Tausch zweier Flugzeuge anfallen (eng. „Swapping cost“)
- φ_3 - φ_5 = Verspätungskosten
 - φ_3 = Verspätungskosten am Ausgangspunkt der Betriebsstörung. Diese werden allgemein als Primärkosten bezeichnet und lassen sich direkt bestimmen.

- φ_4 = Verspätungskosten, die am dem Flughafen auftreten, der nach dem Ausgangspunkt der Betriebsstörung angefliegen wird. Dieser Faktor hängt stark von der Zuordnung des Flugs ab.
- φ_5 = Bezieht alle Verspätungskosten ein, die nach dem 2. Flughafen auftreten. Im Allgemeinen reicht es aus die auftretenden Kosten bis zum 3. Zielflughafen zu berechnen.

Über die Einzelmodellierung von Primär- und Sekundärverspätungen in der Zielfunktion wird die Verbreitung der Verspätungen in das Model als quadratischer Ansatz integriert. Da die Sekundärkosten φ_4 für alle möglichen Verbindungen berechnet werden, wird so der Propagationseffekt sehr gut abgebildet. Die Sekundärkosten an jedem nachfolgendem Flughafen φ_5 werden rekursiv nach dem Ansatz von Jarrah (vgl. Jarrah, A. / Yu, G., 1993, S.269) berechnet. Leerflüge oder das Vertauschen von Flugzeugen werden durch eine einfache Veränderung der Kosten- und Zeitvariablen der Flugzeuge integriert. In einem Beispielfall werden folgende Kostenparameter angenommen (vgl. Cao J. / Kanafani, A., 1996, S.207):

- Verspätungskosten [pro Minute] = $\frac{\text{Revenue of flight}}{100}$
- Kosten für den Tausch von Flugzeugen = 5 (x100)

Insgesamt bietet der Ansatz von Cao und Kanafani eine interessante Perspektive für die Modellierung von Primär- und Sekundärkosten, wobei eine echte Strategie für die Annullierung von Flügen zwar angekündigt wird (*„a trade-off is made between delaying some flights until aircraft are available to perform them, or canceling them and assigning their aircraft to other flights“* (vgl. Cao, J. / Kanafani, A., 1996, S.196)), eine Ausformulierung dieser aber fehlt. Auch ist keine Differenzierung von Verspätungen und Annullierungen ersichtlich, diese sind als Eingabeparameter an jedem Flughafen für jeden Flug bekannt.

4.1.4. Entscheidungshilfen bei Verspätungen oder Annullierungen

Ziel der Veröffentlichung von Jarrah et al. (vgl. Jarrah, A. et al. , 1993, S.266-280) ist es zwei Vorgehensweisen zur Unterstützung von Flight Controllern bei der Entscheidung für Verspätungen oder Annullierungen vorzustellen. Zu diesem Zweck werden zwei unterschiedliche Modelle beschreiben, die bei United Airlines implementiert werden sollten. Das konzeptionelle Model von Jarrah basiert hierbei auf der „Successive

Shortest Path Method“ von Gershkoff (vgl. Gershkoff, I., 1987), das in Abbildung 16 dargestellt ist:

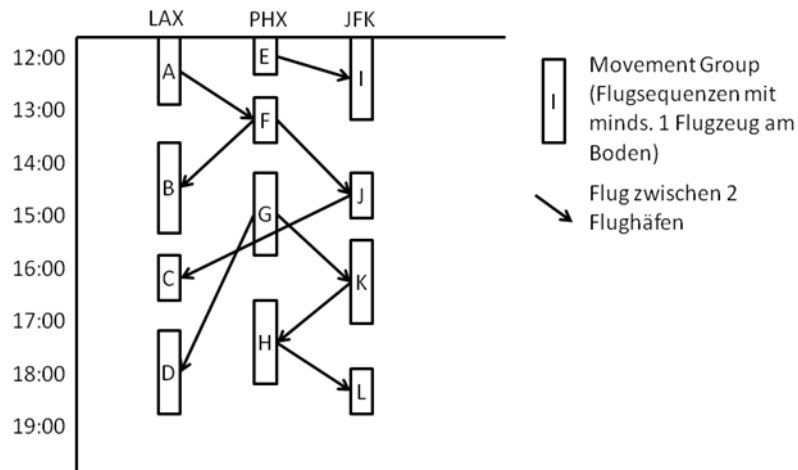


Abbildung 16: Abbildung des gerichteten Graphen nach Gershkoff.

Das dargestellte Netzwerk an Flügen zwischen mehreren Flughäfen wird über einen gerichteten Graphen dargestellt, der entlang einer vertikalen Zeitachse verschiedene „Movement Groups“ über Flüge (=Pfeile) verbindet. Annullierungen finden innerhalb dieser Movement Groups statt und enden ähnlich dem Short-Cycle-Konzept von Rosenberger et al. (vgl. Rosenberger et al., 2002, S.365-366) an dem Flughafen, an dem die Annullierung gestartet hat. Die Kosten einer Annullierung werden über den Umsatzverlust durch Ausfall eines Fluges abgeschätzt. Treten mehrere Annullierungen auf, werden diese sequentiell abgearbeitet. Flüge, die bereits Teil einer Annullierung sind, stehen für die Festlegung des folgenden Flugzeugumlaufs nicht mehr zur Verfügung. Ein zulässiger Umlauf wird hierbei über das Eröffnungsprinzip des „nächsten / besten Nachbarn“ festgelegt. Im Modell von Jarrah et al. werden daher Movement Groups durch individuelle Knoten und Pfeile ersetzt, um zwischen einzelnen Flügen und Flugzeugen besser differenzieren zu können. Dies ist besonders bei Beachtung der minimalen Turn-Around Zeit von einzelnen Flugzeugtypen relevant, die in das Modell von Gershkoff nicht eingeflossen sind. Die Hauptmerkmale des Modells sind nach Jarrah et al. folgende (vgl. Jarrah, A. et al., 1993, S.269):

- Mehrfache Verspätungen sind möglich
- Mehrfache Annullierungen sind möglich
- Der Tausch von Flugzeugen ist erlaubt
- Ersatzflugzeuge und Leerflüge sind erlaubt

Der Wert jedes Fluges wird hierbei als Funktion der Anzahl der Passagiere, der Anteil des Umsteigeverkehrs, der Sekundäreffekte, der Arbeitszeitverlust der Crew und eines Verlusts an Wartungskosten modelliert. Die genaue Zusammensetzung der Nutzenfunktion indes wird nicht dargestellt, obwohl daraufhin gewiesen wird, dass United Airlines diese aus historischen Daten analysieren konnte. Es wird dagegen folgende rekursive Methode vorgeschlagen, um neben den primären auch sekundäre Kosten abschätzen zu können (vgl. Jarrah, A. et al., 1993, S.269):

$$DC(d_i, f_i, s_i) = MC(d_i, f_i, s_i) + CC(f_{i+1}, s_{i+1}) + DC(d_{i+1}, f_{i+1}, s_{i+1})$$

Formel 4-6

$DC(d_i, f_i, s_i)$ = Kosten einer d_i -minütigen Verspätung von Flug f_i am Flughafen s_i

$MC(d_i, f_i, s_i)$ = Umsatzverlust und Imageverlust durch d_i -minütigen Verspätung am Flughafen s_i

$CC(f_i, s_i)$ = Kosten für verpasste Verbindungen und Imageverlust

Das Kriterium zur Beendigung dieser rekursiven Funktion kann wie von Jarrah et al. vorgeschlagen (vgl. Jarrah, A. et al., 1993, S.269) das Ende des Tages sein.

Das Model, das nur Verspätungen behandelt, ist ein reines Minimum-Cost Model, das als gerichteter Graph modelliert wird, in dem sowohl Flugzeuge als auch Flughäfen Knoten darstellen, die über Zuordnungen in Form von Pfeilen verbunden sind. Die Kapazität der Pfeile ist typischerweise für diese Art von Modellen beschränkt. Unter normalen Betriebsverhältnisse sind diese Verbindungen zeitlich gesehen vorwärts gerichtet, da erst nachdem die Turnaround-Zeit eines Flugzeugs beendet ist, ein Flugzeug einem Flug zugeordnet werden kann. Im Fall einer Störung werden diese Zuordnungen jedoch rückwärts zu allen anderen Flugzeugen getroffen, um so all Möglichkeiten für die Behebung der Störung modellieren zu können (vgl. Jarrah, A. et al. , 1993, S.270). Zusätzlich werden Recovery Knoten und Surplus-Knoten eingeführt, die die Reparatur des Flugzeugs oder Ersatzflugzeuge repräsentieren. Die kosten-optimalen Wege starten hierbei immer an einem Supply-Knoten (=Quellen) und enden an einem Recovery- oder Surplus-Knoten (=Senken). Die Zielfunktion minimiert hierbei die Summe aus Verspätungskosten, Kosten verursacht durch den Tausch von Flugzeugen sowohl zum Zeitpunkt des Ausfalls als auch bei Bereitstellung des reparierten Flugzeugs und Kosten durch Leerflüge. Die hinterlegten Kosten sind jedoch nicht aus der Veröffentlichung ersichtlich.

Im zweiten Model werden nur Annullierungen als Reaktion erlaubt. Die Kosten einer Annullierung entsprechen dem Umsatzausfall.

Die Ergebnisse beider Modelle zeigen hierbei die Limitierung des Models auf entweder Verspätungen oder Annullierung auf, was sich deutlich im Wert der Zielfunktion widerspiegelt. Diese weist gerade bei Annullierungen einen ungewöhnlich hohen Wert auf als Konsequenz des Ausfallens von mehreren Flügen.

Die vorliegende Veröffentlichung von Jarrah bildet die Grundlage für zahlreiche andere Forschungsarbeiten bezüglich der Modellierung einer rekursiven Funktion für Verspätungen. Die Modellierung des Flugplans als Minimum-Cost Problem und Lösung, die an Hand von United Airlines Daten von Jarrah et al. präsentiert wird, entspricht der Standardvorgehensweise für die Lösung von Optimierungsproblemen.

Neben der Veröffentlichung von Jarrah et al. hat sich Gang Yu vor allem mit der Beschreibung und Lösung des Crew-Recovery Problems beschäftigt, das das Hauptproblem bei Betriebsstörungen hauptsächlich in der Ressource Personal sieht (Yu Gang et al., 2003, S.5-22; Luo, S. / Yu G., 1997, S.298-311, Rakshit A. / Krishnamurthy, N. / Yu, G., 1996, S.50-58). Auch die Lösung des Flugzeugumlaufproblems wurde vor allem durch Arguello und Yu Gang vorangetrieben (vgl. Bard, J. / Yu G., 2001, S-931-947; Arguello, M. / Bard, J., 1997, S.211-228)

4.1.5. Implementierung von Robustheit in Flugplänen

Aufgrund der Tatsache, dass Fluggesellschaften Flugpläne auf theoretischer Basis erstellen, Betriebsstörungen jedoch genau dann auftreten, wenn Flugpläne bereits entlang eines mehr-monatigen Prozesses optimiert wurden, haben Lan S. / Clarke J-P. und Barnhart C. sich das Ziel gesetzt, eine Methode zu präsentieren, die Robustheit in Flugpläne zu integrieren (vgl. Lan et al., 2006, S.15-28). Hintergrund der Arbeit ist die Annahme, dass sich der Luftverkehr in den folgenden 10-15 Jahren verdoppeln wird, wobei jedes Prozent an Wachstum zu einer Vermehrung von Verspätungen von 5% führt (vgl. Lan et al., 2006, S. 16). Robustheit wird hierbei als „bewusstes integrieren von Verspätungen und Annullierungen in Flugpläne“ verstanden, so dass sowohl die geplanten als auch die real-auftretenden Kosten minimiert werden. Hierfür werden Flugrouten bzw. Flugzeugumläufe vorgeschlagen, die die Ausbreitung von Verspätungen nicht begünstigen und gleichzeitig die Anzahl an verpassten Umsteigeverbindungen minimieren.

Die Grundlage für die vorgestellte Methode bilden Flugzeugumläufe, die nach Wartungskriterien optimiert werden (vgl. Lan et al., 2006, S.17). Für die Ausbreitung der Verspätungen wird folgender Zusammenhang definiert:

$$PD_{ij} = \max(TAD_i - Slack_{ij}, 0) \quad \text{Formel 4-7}$$

- PD_{ij} = Verspätung, die von Flug i zu Flug j übergeben wird.
 TAD_i = Gesamte Dauer der Verspätung; setzt sich aus propagierten und nicht-propagierten Verspätungen zusammen.
 $Slack_{ij}$ = Differenz zwischen geplanter Turn-Around und minimaler Turn-Around Zeit.

Da sich ein Flugzeugumlauf aus mehreren festgelegten und aufeinander folgenden Flügen zusammensetzt, die von einem Flugzeug geflogen werden, setzen sich Verspätungen innerhalb eines Umlaufs dann fort, wenn nicht genügend Pufferzeiten (eng. „Slack“) in den Flugplan eingebaut werden. Aus diesem Grund kann nach der Idee von Lan et al. jede Verspätung minimiert werden, wenn diese Pufferzeiten optimal positioniert sind. Da mögliche Verspätungen aus aufgezeichneten Daten analysiert werden können, ist es möglich über eine „string-based“ Formulierung des Flugzeugumlaufproblems mit Wartungsaspekten die erwarteten stochastischen Verspätungen zu minimieren. Als String wird eine Sequenz von Flugverbindungen bezeichnet, die an einer Wartungsstation startet und endet (siehe auch Lan et al., 2006, S.19). Die Verspätungen (Ankunftsverspätungen) aus der ASQP Datenbank (Airline Service Quality Performance) werden hierbei über als Gamma, Log-Normal oder Weibull Verteilung modelliert. Die Zielfunktion des Optimierungsproblems (RAMR = „Robust aircraft maintenance routing“) minimiert die erwarteten Verspätungen innerhalb des gesamten Transportnetzwerks. Für nähere Details zur mathematischen Formulierung und Lösung des Problems siehe Lan et al. S.20 und vor allem die Arbeiten von Barnhart (Cohn A. / Barnhart, C., 2003, S.387-396; Barnhart, C., Belobaba, P., Odoni, A., 2003, S.368-391; Rexing et al., 2000, S.1-20; Hane et al., 1995, S.211-232; Barnhart et al., 1998, S.208-220). Laut Lan et al. (siehe auch. Lan et al., 2006, S.22) konnten für eine große amerikanische Fluggesellschaften durch diese Vorgehensweise die Verspätungen um 44% und die Anzahl der verpassten Umsteigeverbindungen um 11% reduziert werden.

Weiterhin wurde noch Auswirkungen des neuen robusten Flugplans auf Umsteigeverbindungen der Passagiere untersucht. Hierfür wird folgender Zusammenhang als Entscheidungsgrundlage definiert (vgl. Lan et al., 2003, S.22):

$$\begin{aligned}
 PCT &= PDT - PAT, \\
 Slack &= PCT - MCT, \\
 ACT &= ADT - AAT, \\
 ACT &< MCT
 \end{aligned}$$

PCT	=	Planned connecting time
PDT	=	Planned departure time
PAT	=	Planned arrival time
MCT	=	Minimum connecting time
ACT	=	Actual connecting time
ADT	=	Actual departure time
AAT	=	Actual arrival time
Slack	=	Pufferzeit

Wenn demnach die aktuelle Umsteigezeit kleiner als die minimale Umsteigezeit ist, dann liegt eine Störung in der Umsteigeverbinding vor. Durch das Optimierungsmodell gelingt es Lan et al. die Anzahl der Personen, deren Umsteigeverbindungen durch Störungen unterbrochen werden, um 11% zu reduzieren (vgl. Lan et al., 2003, S. 23), wobei die minimale Umsteigezeit auf 30 Minuten gesetzt wurde.

4.1.6. Entwicklung einer Heuristik zur Wiederherstellung des regulären Flugbetriebs nach irregulären Bedingungen

Die Grundlage für diese Vorgehensweise bildet das ASRP (Airline Schedule Recovery Problem) von Clarke (vgl. Clarke, M. / Button, K., 1997; Clarke, M. / Haight, F., 1997 und Clarke, M. / Laporte, G., 1997). Der Flugplan wird über ein Time-Space Netzwerk als gerichteter Graph modelliert, in dem sich die Flugzeuge entlang von Pfeilen, denen Kosten zugeordnet sind, von Knoten zu Knoten bewegen. Verspätungen und Wartungsintervalle werden über eigene Pfeile modelliert. Als Unterproblem wird hierbei die Findung eines Flugzeugumlaufs gesehen, der als beschränktes Minimum Flow Problem gelöst wird. Das ASRP löst hierbei laut Clarke (vgl. Clarke, M. / Laporte, G., 1997, S.7) sowohl das Fleet-Assignment als auch das Aircraft Rotation Problem. Die Zielfunktion wird hierbei wie folgt formuliert:

$$\min \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} C_{nk} X_{nk} + \sum_{(i,j) \in F} C_{ij} Y_{ij}$$

Formel 4-8

X_{nk} und Y_{ij} stellen typische 0-1 Variable, die zur Lösung des Problems benötigt werden. Der erste Teil der Zielfunktion berechnet hierbei die

Kosten C_{nk} , die durch die Zuordnung eines Flugzeugs zu einer Flugsequenz X_{nk} entstehen. In einer Menge von N möglichen Flugsequenzen entspricht n einer Flugsequenz und k einem Flugzeug aus der Flugzeugflotte K . Der Kostenanteil C_{nk} besteht aus den direkten Betriebskosten, Spill-Kosten durch Überbuchung und dem Umsatz aus dem Flugbetrieb. Der Umsatz wiederum beinhaltet neben dem Beladefaktor-abhängigen Anteil auch den s.g. Goodwill der Passagiere. Der zweite Teil der Zielfunktion fügt die Kosten C_{ij0} der Annullierung der Strecke Y_{ij} hinzu. Die Laufparameter i und j stehen für den Start und Endpunkt eines Fluges. Die Randbedingungen werden nicht weiter aufgeführt, können aber unter Clarke, M. / Laporte, G., 1997, S.9-11 nachgelesen werden. Die Besonderheit neben der gleichzeitigen Lösung des Aircraft-Assignment und der Schedule Recovery Problems stellen hierbei die Beachtung der Verfügbarkeit der Crew, von ATC-Slots, von Gate-Positionen und von Wartungsintervallen in den Randbedingungen dar, die separat als einzelne Optimierungsprobleme bisher gelöst wurden. Das gesamte Problem wird sowohl mit Hilfe einer Heuristik („greedy heuristic“) als auch über eine klassische Optimierung gelöst. (vgl. Clarke, M. / Haight F., 1997, S.10-26). Beide Vorgehensweisen orientieren sich an einem 3-stufigen Entscheidungsprozess(vgl. Clarke, M. / Haight F., 1997, S.11):

1. Generiere alle Flugsequenzen, denen alle Randbedingungen genügen, mit Hilfe eines modifizierten Tree-Searching Algorithmus
2. Ordne Flugsequenzen Flugzeugen nach dem Prinzip der Gewinnmaximierung zu. Flüge, die nicht zugeordnet werden können, werden als Annullierungen behandelt
3. Überarbeite die Netzwerkstruktur und passe Abflugs- und Ankunftszeiten gemäß Schritt 1 und 2 an.

Die Heuristik arbeitet hierbei mit einem speziellen Tree-Searching Algorithmus, der auf der Network-Flow Theorie aufbaut. Hierfür wurde der Ford-Bellman Algorithmus zur Findung des kürzesten Pfads in einem Graphen, der aus Kanten bzw. Pfeilen besteht, die Flüge, Verspätungen, Bodenaktivitäten und Wartungsarbeiten repräsentieren, adaptiert (vgl. Clarke, M. / Haight F., 1997, S.14). Die Zuordnung der Flugzeuge zu Flugsequenzen erfolgt über eine 2-stufige „greedy“ Heuristik. Zuerst werden wartungskritischen Flugzeugen Flugsequenzen zugeordnet, daraufhin werden allen restlichen Flugzeugen nach der Profitmaximierung Flugsequenzen zugeordnet. Jede Stufe der Heuristik arbeitet hierbei nach dem 3-stufigen Entscheidungsprozess „Generate-Assign-Revise“. Der Optimierungsansatz verläuft nach der „State-of-the-Art“ Vorgehensweise

und soll an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden (für näherer Informationen siehe Clarke M, 1998, S.96-104)

Bei der Umsetzung der Vorgehensweise jedoch werden besonders Annullierungen nicht direkt simuliert (vgl. Clarke , M. / Laporte , G. , 1997 , S.17). Aufgrund der Datenlagen argumentieren Clarke und Laporte, dass der Ursprung von Betriebsstörungen nicht analysiert werden kann und verwenden daher nur den „End-Effekt“ als Basis für die Simulation. Dieser wird als Begrenzung der Flugzeugbewegungen über die Anzahl der Lande-Slots, über Randbedingungen durch die Crew oder eine Kombination beider an den Flughäfen implementiert. Grundsätzlich ist das Ziel entweder die Anzahl der ankommenden bzw. abfliegenden Flugbewegungen zu begrenzen. Aus diesem Grund zeigen die Ergebnisse der Studie, dass überproportional viele Annullierungen entstehen im Vergleich zu den realen Daten (vgl. Clarke , M. / Laporte , G. , 1997 , S.22), wodurch die Nutzung der Flugzeug (eng. „Utilization“) nur 85% der realen Werte entspricht. Eine Optimierung des Flugplans nach Betriebsstörungen ist jedoch möglich.

Sowohl Verspätungen und Annullierungen als auch die auftretenden Kosten werden nicht gesondert modelliert, sondern sind Eingabegrößen des Modells.

4.1.7. Eine Systemarchitektur für die Bearbeitung von Störungen im Flugbetrieb

Mathaisel hat Mitte der 90iger Jahre eine Umgebung entwickelt, die mit Hilfe von mathematischen Optimierungsmodellen und Heuristiken versucht, Fluggesellschaften bei der Behebung von Betriebsstörungen zu unterstützen. Über graphische Benutzerelemente können Routenplaner auf zahlreiche Informationen zurückgreifen, die für bei der Bearbeitung von Störungen notwendig sind. Seine Motivation beruht auf der Tatsache, dass es eine Vielzahl von exzellenten Teillösungen für beispielsweise den Flugzeugumlauf mit Wartungs- und Crewaspekten gibt, aber keine Umgebung, die mit einheitlichem Input und Output von Flight Dispatchern leicht zu bedienen ist. Aus diesem Grund hat Mathaisel ASC (Airline Schedule Control) als holistische Lösung entwickelt (vgl. Mathaisel, D., 1996,S.1083-1084).

Die Vorgehensweise für die Behandlung von Störungen im Flugplan basiert auf dem „Out-of-Kilter“ Algorithmus von Nasser (vgl. Nasser, 1990) und baut auf einem gerichteten Graphen mit Knoten und Pfeilen auf. Über einen Tree-Searching Algorithmus werden hierbei innerhalb des OFK-

Algorithmus mögliche Lösungen generiert. Eine Besonderheit des verwendeten Graphen ist, dass Pfeile sowohl Boden- als auch Flugbewegungen (Groundarcs und Service Arcs) repräsentieren. Groundarcs dienen zur Feststellung der Anzahl der Flugzeuge am Boden und Service Arcs verbinden die Flughäfen im Netzwerk. Da das beschriebene Modell von sich täglich wiederholenden Flugplänen ausgeht, wird jeder Tag mit einem „Overnight“ bzw. „Cycle“- Pfeile in die ursprüngliche alltägliche Situation zurückgeführt. Jeder Verbindung wird zusätzlich im Falle von Servicearcs der monetäre Wert und für Overnight-Arcs die Leasing bzw. Mietkosten für das Flugzeug zugeordnet.

Betriebsstörungen werden per Eingabe modelliert, indem beispielsweise der betroffene Knoten einen anderen Zeitwert bekommt und somit zeitlich nach hinten verschoben wird oder verschiedene Verspätungsoptionen durch zusätzlich Pfeile in das Modell eingebaut werden. Mathaisel (vgl. Mathaisel, D., 1996, S.1092-1094) diskutiert verschiedene Möglichkeiten und Auswirkungen von Störfällen besonders für den Fall der Schließung von Flughäfen. Um die Auswirkung von Verspätungen auf die Kosten abbilden zu können, wird folgende qualitative Funktion (siehe Abbildung 17) aufgestellt, die den Umsatzverlust in Relation zur Verspätungsdauer ausdrückt (vgl. Mathaisel, D., 1996, S.1094-1095).

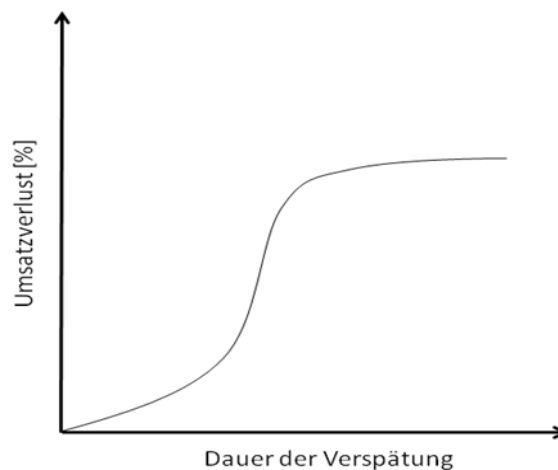


Abbildung 17: Qualitative Darstellung der Abschätzung des Umsatzverlusts als Funktion der Verspätungsdauer

Der negative Gesamtwert einer Flugverbindung entspricht somit der negativen Differenz aus Umsatz und Umsatzverlust durch Verspätungen addiert zu den Grenzkosten für den Betrieb des Flugzeugs; d.h.: der berechnete Wert stellt als positives Vorzeichen Kosten und als negatives Vorzeichen Gewinn dar. Die Anwendung dieses Kostenansatzes zur

Minimierung der Kosten zeigt, dass beim Auftreten einer Verspätung durch ein ungeplantes Wartungsereignis der Gesamtgewinn des Flugplans um 45,4% sinkt (vgl. Mathaisel, D., 1996, S. 1095). Mathaisel selbst weiß jedoch daraufhin, dass der reine Vergleich der Kosten als Orientierungshilfe schlechtere Lösungen erzielt, als das reale Verhalten von Dispatchern. Dies liegt daran, dass das beschriebene Modell keine Crew- und Wartungsaspekte beinhaltet und das Umbuchen von Passagieren nicht berücksichtigt. Stattdessen entsteht immer ein Umsatzverlust, sobald eine Verspätung auftritt. Der Grund für die Erhöhung der Kosten bzw. der Schmälerung des Gewinns liegt somit in der Formulierung der Kostenfunktion, die jedoch nicht nachvollzogen werden kann.

4.1.8. Entscheidungsunterstützung bei Störungen des Flugplans

Für die Diskussion von Möglichkeiten der Implementierung von irregulären Ereignissen in Flugplänen sind besonders die Veröffentlichungen von Yan et al. (Yan S. / Young H. 1996, Yan S. / Yang D. 1996 / Yan S. / Lin C. 1997, Yan S. / Tu Y. 1997) darzustellen. Aufgrund von Ineffizienzen im Prozess der Flugplanerstellung in Taiwan (vgl. Yan S. / Young H. 1996, S.379) werden in den Veröffentlichungen aus dem Jahr 1996 Systeme bzw. Gerüste entwickelt, mit deren Hilfe Airlines den Prozess der Flugplanerstellung automatisieren und optimieren können. Als Eingangsgrößen wird eine Aufstellung von An- und Abflugzeiten, die Anzahl an verfügbaren Flugzeugen, die Anzahl an verfügbaren Airport-Slots, Miet- bzw. Leasingkosten von Flugzeugen und alle notwendigen Informationen zur Bestimmung des Gewinns benötigt. Über eine Auswahl an verschiedenen Strategien sollen daraufhin die Airlines die Möglichkeit haben, die besten Routen auszuwählen unter folgender Fragestellung: „*how to create the basic model and the strategic models and the strategic models for fleet routing and flight scheduling*“ (Yan S. / Young H. 1996, S.380). Im Mittelpunkt der Forschungen stehen one-stop und non-stop Flüge, die in einem Time-Space Netzwerk modelliert werden, das keine Wartungs- und Crewaspekte beinhaltet. Typischerweise werden Knoten verwendet, um Flughäfen zu repräsentieren und Pfeile, um Aktivitäten zu modellieren.

Für jeden Flugzeugtyp wird basierend auf einer Knoten&Pfeil Topologie das Netzwerk aufgestellt, das für die mathematische Formulierung des Grundproblems als Multi-Commodity Modell (siehe Yan S. / Young H. 1996, S.385) grundlegend ist. Diese Vorgehensweise wurde an Hand einige Fallstudie für eine Fluggesellschaft aus Taiwan getestet. Es konnte

nachgewiesen werden, dass das Modell und die Lösungsmethode über eine nicht näher spezifizierte Version des Simplex-Algorithmus kombiniert mit einer Lagrangian Heuristik zu guten Ergebnissen geführt haben.

In einer weiterführenden Arbeit (vgl. Yan S. / Yang D. 1996, S.405-419) wurde die Methode auf Störungen ausgehend von Flugzeugen im Ablauf des Flugplans ausgeweitet. Der bisher in Taiwan angewendete Prozess zur Behebung von Störungen beruht auf dem Zufallsprinzip und findet nur zufällig die optimale Lösung. Die Methodik beruht wiederum auf der Formulierung des Grundproblems (BSPM = Basic Schedule Perturbation Model) über ein Time-Space Netzwerk, in das verschiedene Strategien zur Behandlung des Problems eingebracht werden. Im Unterschied zur Arbeit von Yan (1996) wird diesmal nur eine Flotte bestehend aus einem Flugzeugtyp und Non-Stop Flügen behandelt. Die Störung im Netzwerk wird nur durch ein Flugzeug hervorgerufen (vgl. Yan S. / Yang D. 1996, S.406) unter der Begründung, dass es für kleine Fluggesellschaften ungewöhnlich sei, dass mehr als ein Flugzeug defekt ist. Auch werden wiederum Wartungs- und Crewthemen ausgeblendet. Nach Beseitigung des Defekts wird das betroffene Flugzeug durch einen Ferry-Flight in den originalen Flugplan eingebracht. Das zugrundeliegende mathematische Grundproblem wird als Minimum Cost Flow Problem formuliert. Es werden vier Lösungsstrategien formuliert:

- (1) Nur die Annullierung von Flügen wird in Betracht gezogen, wenn diese keine hohen Kosten innerhalb des Netzwerks verursachen. Die Kostenfunktion für eine Annullierung wird hierbei wie folgt definiert (vgl. Yan S. / Yang D. 1996, S.410):

$$Z = C_{cij} + C_{dij} \cdot X_{ij} \quad \text{Formel 4-9}$$

X_{ij} : Bei Durchführung der Annullierung 1, ansonsten 0
 C_{cij} : Kosten der Annullierung des Fluges von i nach j
 C_{dij} : Kosten für die Durchführung des Fluges von i nach j

Die daraus resultierende Zielfunktion minimiert somit nur Annullierungskosten. Der Tausch von Flugzeugen („Aircraft Swapping“ wird hierbei nicht in Betracht gezogen)

- (2) Neben der Annullierung von Flügen werden ebenfalls Ferry-Flights von Ersatzflugzeugen betrachtet. Diese werden durch frei festlegbare Knotenpunkte im Netzwerk modelliert. Hierbei gilt nach

Yang (vgl. Yan S. / Yang D. 1996, S.412): je mehr dieser zusätzlichen Knotenpunkte eingebunden werden, desto höher wird die Systemprofitabilität.

- (3) Es werden Annullierungen und Verspätungen von Flügen in das Modell integriert. Verspätungen werden hierbei als Mittel verstanden, Annullierung zu vermeiden, und werden als zusätzliche Arcs integriert.
- (4) Strategie 4 ist eine Summe aus (1)-(3) und beinhaltet somit Annullierungen, Ferry-Flights und Verspätungen.

Da es sich durch die Formulierung um ein nicht-deterministisches Problem handelt, wird von Yan (Yan S. / Yang D. 1996, S.413) die Lösung über eine Heuristik vorgeschlagen. Im Rahmen einer Fallstudie zu einem Flugplan zwischen August und Oktober 1992, der 15 Flughäfen und 319 Flüge mit 12 Flugzeugen einer Fluggesellschaft aus Taiwan enthält, wurden die unterschiedlichen Strategien erfolgreich getestet. Störungen wurden gleichverteilt über alle Flughäfen modelliert und zufällig in das System induziert. Die mittlere Reparaturzeit wurde mit 1-7 Tage angesetzt mit einer Standardabweichung von 2-4h (vgl. Yan S. / Yang D. 1996, S.414-418).

Die Arbeiten aus der Formulierung eines Gerüsts zur Behandlung von Störungen in Netzwerken haben daraufhin zur Anwendung der Methodik auf die Thematik Schließung von Flughäfen durch unvorhersehbare Ereignisse wie Schlechtwetterlagen geführt (vgl. Yan S. / Lin C. 1997, S.72-82). Wiederum wurden verschiedene Kombinationen von Strategien getestet, um Verspätungen von maximal 30 Minuten behandeln zu können. Die reine Annullierung von Flügen schneidet hierbei am schlechtesten bezogen auf die Werte der Zielfunktion ab. Die besten Werte der Zielfunktion und für den Grad der Störung des Netzwerks erreicht Yan mit einer Kombination aller Strategien (1)-(3). Da jedoch alle Lösungen nicht nach Wartungs- und Crewaspekten optimiert wurden, müssen diese in einem separaten Modell überprüft werden. Die Erweiterung dieses Modells auf mehrere Flugzeugtypen wurde daraufhin 1997 nachgereicht (vgl. Yan S. / Tu Y. 1997, S.155-169).

4.1.9. Wiederherstellung des Flugplans unter minimaler Abweichung

Thengvall et al. haben in ihrer Veröffentlichung das Ziel, das Problem der Wiederherstellung des Flugplans mit minimalen Änderungen am ursprünglichen Flugplan zu lösen, da jede Verspätung oder Annullierung zu Änderungen im Flugplan und somit konsequenterweise zu Kosten führt. Thengvall et al. legen hierfür verschiedene Maßnahmen zugrunde (vgl.

Thengvall et al., 2000, S. 181): (1) bewusste Verspätungen anderer Flüge, (2) Annullierungen von Flügen, (3) der Einsatz von Ersatzflugzeugen oder Leerflügen, wobei letztere aufgrund enormer Kosten sehr selten zum Einsatz kommen. Bei Verspätungen werden als Haupttreiber für die Minimierung einerseits Restriktionen durch die Crew als auch der Verlust des Wohlwollens der Kunden gesehen. Gleichzeitig führen kleine Veränderungen in System abgeleitet aus computergestützten Entscheidungshilfen zu stark unterschiedlichen Lösungen (vgl. Brown et al., 1997). Thengvall et al. versuchen daher das Problem der Irregularitäten in Flugplänen so zu lösen, dass eine minimale Änderung vom ursprünglichen Flugplan zu erwarten ist. Das Problem wird hierbei als ganzzahliges Single-Commodity Problem formuliert, das auf den Veröffentlichung von Yan et al. aufbaut (vgl. Yan 1996a, Yan 1996b und Yan 1997). Grundsätzlich wird hier ein Time-Space Netzwerk verwendet, in dem entlang einer Zeitachse über Pfeile die Bewegung der Flugzeuge im Flugplan dargestellt werden. Knoten werden zusätzlich verwendet, um Ereignisse an Flughäfen darzustellen. Der Zeitraum, für den eine Lösung des Problems gesucht wird, ist ein Tag. Verspätungen werden als eigene Pfeile in das Modell integriert und über eine zeitabhängige Komponente vom gegebenen Umsatz abgezogen (vgl. Thengvall et al., 2000, S.184). Eine nähere Spezifikation der Verspätungsfunktion wird nicht vorgenommen. Damit wie ursprünglich gefordert der Originalflugplan abgeflogen wird, werden Incentives in Form von Zusatzumsätzen, wie in Abbildung 18 dargestellt, eingefügt, die die Erhaltung von Direktflügen in der Modellierung und späteren Lösungsfindung unterstützen.

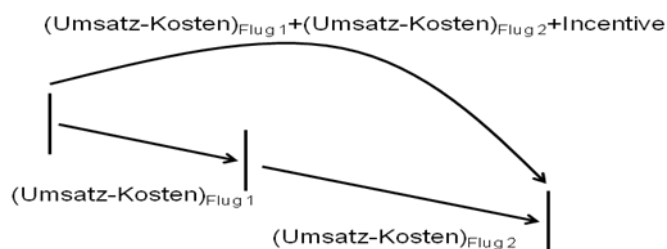


Abbildung 18: Einführung Incentives in die Modellierung von Netzwerken zur Aufwertung von Direktflügen in der Modellierung (s.a. Thengvall et al., 2000, S.185)

Die Zielfunktion, die maximiert wird, beinhaltet folglich Erträge sowohl aus protegierten Flügen als auch aus verspäteten Flügen und gibt somit als Maximum einen künstlichen Netto-Ertrag aus, der durch den Einbau der Incentives keinen realen Bezug hat. Das Modell wurde an Hand eines B757 Flugplans von Continental Airlines getestet, der insgesamt aus 16 Flugzeugen und 42 täglichen Verbindungen besteht. Der Ertrag aus den

Flügen wurde über folgende künstliche Funktion bestimmt (Thengvall et al. 2000, S.187):

$$\text{Ertrag} = 1000 + 2 \cdot \text{Flugzeit} - 0,2 \cdot \text{Verspätungsdauer} \quad \text{Formel 4-10}$$

Als Inzentiv wird für jeden protegierten Bogen 10 hinzuaddiert:

$$\text{Ertrag} = 1000 + 2 \cdot \text{Flugzeit} - 0,2 \cdot \text{Verspätungsdauer} + 10 \cdot \text{Anzahl}_{\text{Arcs}} \quad \text{Formel 4-11}$$

Verschiedene Testläufe haben hierbei gezeigt, dass mit diesem Modell 83,2% des originalen Flugplans beibehalten werden können, wobei dies stark von der Anzahl der am Boden gehaltenen Flugzeuge und der Höhe der Incentives abhängt.

Für eine große Anzahl an Flugzeugen und Flugverbindungen schlägt Thengvall 2000 die Anwendung einer Heuristik vor, die Flugzeuge sequentiell bearbeitet und nach vorgegebenen Endpunkten der Flugroute in Verbindung mit der Maximierung von Erträge den optimalen Umlauf auswählt. Nachfolgende Flugzeuge werden daraufhin einem Vorsorgeplan unterworfen, der bestimmte Verbindungen erzwingt. Testläufe haben hierbei gezeigt, dass mit dieser Heuristik eine Abweichung von 0,59% vom Optimum erzielt werden kann.

In einer weiteren Veröffentlichung weiten Thengvall et al. (Thengvall et al. 2001) den ursprünglichen Ansatz auf ein Multi-Commodity Problem aus, das sich in der Anzahl der Flugzeugtypen und in der Konkretisierung des Verspätungsgrunds unterscheidet. Zwischen verschiedenen Flugzeugtypen werden diesmal Substitutionen, die vorher festgelegt sind, zugelassen (vgl. Thengvall et al. 2001, S.292). Das Modell der ehemaligen Arbeiten wird hier um Ferry-Flights erweitert (s.a. Thengvall et al., 2001, S.296). In einer weiteren Veröffentlichung wird ein verbesserter Algorithmus zur Lösung des Multi-Commodity Problems bei der Schließung von Flughäfen präsentiert (vgl. Thengvall et al., 2003, S.393).

4.1.10. Berücksichtigung von Verspätungen in der Planung von Flugplänen

Abdelghany et al. beschreiben in ihrem wissenschaftlichen Beitrag ein Modell zur Berücksichtigung von Verspätungen im Flugverkehr in der Planung von Flugplänen, das für eine große US-amerikanische Fluggesellschaft angewendet wurde. Die Motivation für das beschriebene

Modell beruht auf den Folgen von Ground Delay Programmen der FAA, die im Falle beispielsweise schlechtem Wetters an US-amerikanischen Flughäfen vorbeugend initiiert werden, um möglichen Verspätungen und Cancellations entgegenzuwirken. Insbesondere der Kaskadeneffekt von Verspätungen, der zu Sekundärverspätungen von Anschlussflügen führt, motiviert Abdelghany et al. (2004). Der Flugplan einer Fluggesellschaft wird hierbei über einen direkten azyklischen Graph mit Nodes und Arcs dargestellt und das Problem mit Hilfe des Shortest Path gelöst. Nodes repräsentieren Einzelereignisse wie An- und Abflugzeit oder Start und Endpunkt von Wartungsarbeiten oder Arbeitszeiten von Crews. Arcs dagegen zeigen die Aktivität zwischen den Nodes dar. Im Mittelpunkt des Modells steht die Modellierung von Regeln und Regularien zum Thema Crew-Pairings. Gleichzeitig wird die Bedeutung von „Flight Slack Times“ – also Pufferzeiten in der Planung der Ressource Flug bei der Auflösung von Verspätungen hervorgehoben. Als Eingabedaten fungieren Regularien zu Arbeitszeiten der Crew, historische Informationen über Taxi-Zeiten, Flugzeiten und Wartungszeiten. Auch der Zeitpunkt verspäteter Flüge bei der Durchführung eines GDP liegt vor. Selbige Daten sind ebenfalls für alle Ressourcen (beispielsweise Crews) vor der Bearbeitung des Problems bekannt. Das Ziel des Modells ist es somit die Abflugs- und Ankunftszeiten (inkl. Wheels-Up und Down) zu prognostizieren und somit auf mögliche Störungen im Betrieb aufmerksam zu werden. Die Anwendung des Modells auf United Airlines zeigt, dass 42% der Flüge (Abdeghany, 2004, S. 391-392) dadurch verspätet sind, dass das ursprünglich eingeplante Flugzeug nicht zur Verfügung stand. Konsequenterweise wurde 2004 am häufigsten die Strategie des Flugzeugwechsels zur Reduktion von Verspätungen angewendet.

In 2008 haben Abdelghany et al. dieses Modell zur Entscheidungshilfe bei Fluggesellschaften für Verspätungssituationen erweitert und eine mathematische Formulierung des Problems aufgezeigt. Das verwendete Modell setzt sich hierbei aus einer Simulation des ungestörten Flugplans und einer Optimierung bei irregulären Vorkommnissen zusammen. Die auftretenden Verspätungen werden hierbei durch eine eigene Methodik abgeschätzt (Abdelghany 2004). Die Optimierung des verspäteten Flugplans wird hierauf über einen 4-stufigen Prozess durchgeführt, der alle beteiligten Ressourcen kosten-optimal allokiert. Unter dem Begriff Kosten werden Verspätungs-, Cancellation und Allokationskosten verstanden, die vom User spezifiziert werden müssen.

(Abdelghany 2008) schreibt bei der Diskussion der bekannten Autoren zum Thema „Recovery Models“ auf S.826, „one drawback of these models ist

that they consider only one resource type. In other words, they ignore evaluating the impact of recovery actions generated for one resource on other unconsidered resources". Ähnlich zur Arbeit von 2004 werden Gründe für die Verletzung von Crew-Restriktionen als kritische Ressource identifiziert (Abdelghany 2008, S.827-829): „Misconnect violation“, „Rest violation“, „Duty time violation“ und „Open position“. Über den Begriff der „Slack time“ werden Zeiträume zwischen Flügen definiert, die als Pufferzeit für Verspätungen dienen können. Gleichzeitig werden die Möglichkeiten in der praktischen Umsetzung von Controllern diskutiert. Fluggesellschaften unterhalten an Hubs Standby bzw. Reserveressourcen, die zum Einsatz kommen können, Tauschen Ressourcen aus, bestimmen neue Ankunfts- und Ankunftszeiten (verspäten Flüge somit bewusst) oder annullieren Flüge, wenn keine andere Recovery-Action gefunden werden konnte. Laut Abdelghany 2008, S.831 werden Recovery-Aktions praktisch auf einer Flug-zu-Flug-Basis durchgeführt, wodurch keine Optimierung des Gesamtsystems stattfindet. Die Vorgehensweise von Abdelghany beginnt bei der Simulation eines ungestörten Flugplans, in den eine Störung in Form eines GDP eingebracht wird. Dessen Auswirkungen werden auf den gesamten Zeitraum der Simulation projiziert und in einem 4-stufigen Prozess nach Abdelghany 2004 optimiert. In der mathematischen Formulierung der Zielfunktion finden sich nach einer Erweiterung von Abdelghany 2004, der nur Kosten in Verbindung mit der Crew betrachtet, Kosten für die Allokation von Ressourcen, Verspätungs- und Annullierungskosten. Das Problem wird hierbei als „Mixed Integer Program“ (MIP) formuliert.

4.1.11. GRASP – ein greedy Algorithmus zur Findung von Flugrouten bei Groundings und Verspätungen

Durch die Schließung von Flughäfen bei schlechtem Wetter werden in den USA so genannte „*Ground Delay*“-Programme initiiert, die zu großen Verspätungen im Flugplan führen. Arguello und Bard haben sich aus dieser Motivation heraus das Ziel gesetzt, eine *greedy* Heuristik zu entwickeln, die American Airline bei der Findung neuer Flugzeugumläufe in Echtzeit unterstützt. Diese Entscheidungen orientieren sich hierbei zumeist an der Regel, die einfachste Alternative mit der geringsten Anzahl an Annullierungen als Lösung des Problems zu wählen (vgl. Arguello, M. / Bard, J., 1997, S.213). Auch werden mögliche Routen nicht nach Crew-Aspekten überprüft, sondern werden als fertige Lösung an den Crew Koordinator weitergegeben. Folgende Voraussetzungen müssen jedoch erfüllt sein (vgl. Arguello, M. / Bard, J., 1997, S.214):

- An- und Abflugort müssen für ein Flugzeug identisch sein, d.h: es sind keine Leerflüge erlaubt.
- Zwischen An- und Abflug muss die minimale Turn-Around Zeit beachtet werden
- Der Zeitraum, der für die Wiederherstellung des Flugplans zur Verfügung steht, erstreckt sich bis ans Tagesende.
- Nachtflugverbote an Flughäfen müssen beachtet werden.
- Flugzeugumläufe, die während der Wiederherstellungsphase Wartungsarbeiten beinhalten, werden nicht verändert.

Die Zielfunktion von Arguello und Bard minimiert die Summe der Kosten durch die Zuordnung eines Fluges zu einem spezifischen Flugzeug und der Kosten für Annullierungen. Im Vorfeld der Optimierung müssen jedoch diese Kosten gegeben sein. Die Lösung des Problems erfolgt über eine modifizierte Version der Heuristik GRASP („greedy randomized adaptive search procedure“), die ähnlich dem Tabu-Search oder Simulated Annealing funktioniert. In einem ersten Schritt werden über eine greedy Bewertungsfunktion zulässige Lösungen geschaffen, die in einem zweiten Schritt solange modifiziert werden, bis das Haltekriterium erreicht ist. Die Auswahl der geeigneten Kandidaten geschieht bei Arguello und Bard zufällig. Die Veränderung der Basislösung wird über drei Verfahren bewerkstelligt. Ähnlich der Operation des Crossovers in genetischen Algorithmus werden durch die „flight route augmentation“ Teile von Routen vertauscht. Eine weitere Möglichkeit besteht im Hinzufügen von geschlossenen Zyklen in einer Route. Auch die Veränderung der ersten Position in der Rotation wird in Betracht gezogen.

Der Test an Hand eines Flugplans von 16 B757 mit 42 Flügen zu 16 Flughäfen wird über die Annahmen eines Beladefaktors von 75% und einer Gewinnmarge von 10% durchgeführt. Für jeden Flug sind einer Tabelle Annullierungskosten gegeben, die sich aus der Gewinnmarge und dem durchschnittlichen Ticketpreis errechnen. Die Verspätungskosten werden mit \$20 pro Minute angenommen. Die Testergebnisse haben gezeigt, dass im Vergleich zu einem zeitintensiven Optimierungsalgorithmus die Lösungen innerhalb eines akzeptablen Toleranzbereichs liegen. In einer weiteren Veröffentlichung haben Bard et al. (vgl. Bard et al., 2001, S.931-947) ein reines Optimierungsverfahren untersucht.

4.2. Vergleich der existierenden Ansätze mit den Anforderungen an eine Bewertung der technischen Zuverlässigkeit

Basierend auf der Definition der Anforderungen in Kapitel 3 werden in folgender Tabelle die existierenden Ansätze hinsichtlich der Anwendbarkeit für die Bewertung der TDR überprüft:

Tabelle 2: Diskussion existierender Methoden hinsichtlich der Anwendbarkeit für die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit

Kapitel:	Teodorovic	SIMAIR	Kanafani	Jarrah	Lan et al.	Clarke	Mathaisel	Yan et al.	Thengvall	Abdelghany	GRASP
✓ = Anforderung erfüllt (✓) = teilweise erfüllt											
Bereitstellung verschiedener Reaktionsmöglichkeiten auf Verspätungen	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
Eingabe des Zusatzaufwands (Kosten, Zeit, etc.)	(✓)	✓	✓	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)
Bewertung auf Grundlage von Rotationen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Modellierung der Zufälligkeit der TDR		(✓)								✓	
Modellierung der Verspätungsdauer als Funktion						(✓)		(✓)			
Beherrschung des Zufalls		(✓)									
Wiederholbarkeit mit verschiedenen Randbedingungen											

Die Diskussion der bestehenden Ansätze zeigt, dass bereits eine Vielzahl von Methoden zur Integration von Verspätungen bzw. Annullierungen in Flugpläne während des laufenden Betriebs einer Fluggesellschaften in den

letzten Jahrzehnten geschaffen wurden. Verschiedene Lösungsalgorithmen und Modellierungskonzepte haben hierbei immer zur Lösung einzelner punktueller Fallbeispiele geführt. Eine gesamtheitliche Betrachtung der technischen Zuverlässigkeit in Flugplänen wurde jedoch bisher nicht diskutiert.

Aus dem Ansatz nach Lösungen für Einzelereignisse zu suchen, ergibt auch die klare Bewertung in Tabelle 2. Sowohl Reaktionsmöglichkeiten als auch der Zusatzaufwand werden in allen Veröffentlichungen detailliert beschrieben und diskutiert. Die Grundlage für die Diskussion bilden in allen Veröffentlichungen Rotationen, die für das punktuelle Ereignis verändert werden. Sobald es jedoch um die klare Integration und Wiederholbarkeit des Zufallselements geht, konnten keine Veröffentlichungen für die gestellte Fragestellung genutzt werden. Beispielsweise sind die Position, Dauer und vor allem Kosten der Störung zumeist vorgegeben, was eine Bewertung der Veränderung der technischen Zuverlässigkeit, wie in Kapitel 3 formuliert, nahezu unmöglich macht. Auch die Integration der technischen Zuverlässigkeit in eine Monte-Carlo Simulation ist nicht vorhanden.

Alle dargestellten Ansätze zeigen hierbei Möglichkeiten auf mit dem Thema Verspätungen in Netzwerken umzugehen. Für die vorliegende Arbeit jedoch kann keiner der Ansätze alle gestellten Anforderungen erfüllen. Dies beruht natürlich auf den unterschiedlichen Perspektiven, die für jede Veröffentlichung eingenommen wurden und aufgrund derer die Lösungsalgorithmen und Rahmenbedingungen angepasst wurden. Hierbei war die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit bisher kein Thema, das verfolgt wurde.

5. Die Verbindung von Monte-Carlo Simulation und Heuristik zur Bewertung der TDR als stochastische Größe

Im vorliegenden Kapitel wird basierend auf den Anforderungen an eine Methodik zur Bewertung des Einflusses von technischen Störungen auf Flugpläne eine Heuristik, die in eine Monte-Carlo Simulation integriert wird, vorgestellt. Diese kombiniert einen GRASP-Algorithmus mit quantitativen Kostenfunktionen zu einer Bewertungsgrundlage, die generisch für Kurzstreckennetzwerke eingesetzt werden kann. Zu diesem Zweck wird ausgehend von einer Beschreibung der Architektur der Methodik die prinzipielle Erstellung der Eingangsdaten für die Monte-Carlo Simulation dargelegt. Hierauf wird die Erstellung von gültigen Flugzeugrotationen als Grundlage der Monte-Carlo Simulation von Flugplänen erklärt. Im Anschluss daran wird der Kern der Heuristik bestehend aus der Modellierung von Recovery-Maßnahmen und Kostenfunktionen erläutert. Außerdem werden die modellierten Recovery-Strategien einzeln vorgestellt und deren Konsequenzen und Kosten hinsichtlich der Szenario-Auswahl diskutiert. Den Abschluss bilden eine Diskussion des Einsatzgebiets bzw. der Randbedingungen und Einschränkungen dieser Methodik.

5.1. Architektur der Methodik

5.1.1. Das Konzept der Methodik

Der Einfluss der technischen Zuverlässigkeit auf Flugpläne äußert sich auf verschiedene Art und Weise: jede Störung des Systems führt zu unterschiedlichen Reaktionen bei den Teilnehmern des Luftverkehrssystems, die wiederum verschiedene Wirkungen haben. Der Kern der Methodik muss demnach die Modellierung der Ursache, Reaktion und Wirkung einer Störung derart beinhalten, dass eine Änderung der TDR – als primäre Ursache – bewertet werden kann.

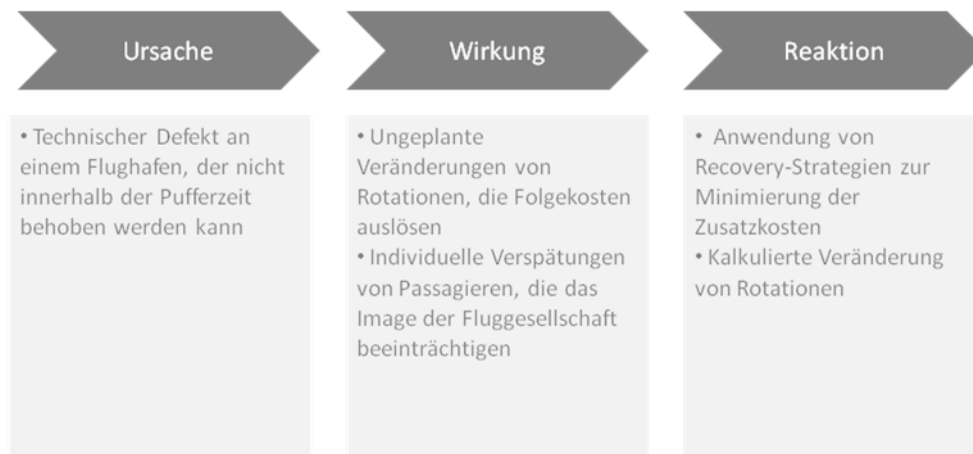


Abbildung 19: Ursache, Wirkung und Reaktion bei ungeplanten Ereignissen

Aus Sicht der Fluggesellschaft ist vor allem das Netzmanagement gefordert. Dieses wendet entwickelte Notfallpläne (Recovery-Strategien) an, klärt die Verfügbarkeit von Personal und die Nutzung der Infrastruktur (beispielsweise des Luftraums oder der Abstellpositionen am Flughafen) und leitet somit schlussendlich die Maßnahmen der Fluggesellschaft ein, die die Ursache minimieren. Jeder Flugzeugausfall ist daher durch eine bestimmte Prozesskette mit Ursache, Reaktion und Wirkung gekennzeichnet, deren Modellierung der Grundlage der vorliegenden Arbeit bilden soll. Die Ursache, also der ungeplante technische Defekt eines Flugzeugsystems, wird über die relative Größe der technischen Zuverlässigkeit modelliert, die wiederum einen stochastischen Charakter besitzt, der kontrolliert werden muss. Die Reaktion der Fluggesellschaft zeigt sich vor allem im Umgang mit der Dauer der technischen Störung. Da es für jede Situation eine Vielzahl von Möglichkeiten gibt, arbeitet diese Bewertungsmethodik mit Szenarien. Diese werden basierend auf allen möglichen Recovery-Entscheidungen generiert und daraufhin bezüglich der finanziellen Wirkung auf das Netzwerk analysiert und ausgewählt. Die Basis für die Entscheidungsfindung bilden daher zeit-abhängige Kostenfunktionen, die jede ungeplante Situation modellieren können. Da durch jede Störung sowohl taktische als auch strategische Kosten entstehen, müssen beide Anteile beachtet werden. Auf taktischer Basis muss zwischen tatsächlichen Kosten und Opportunitätskosten unterschieden werden, die getrennt zu modellieren und zu bewerten sind. Strategische Kosten müssen basierend auf der Produktivität des Flugzeugs bewertet werden. Jede Kostenfunktion muss hierbei als generisches Modell interpretiert werden, das die Realität nur durch Modifizierung der Funktionswerte genau abbildet. Die Bewertung jeder Störung geschieht hierbei immer in Relation zum ungestörten Betrieb.

Zusammenfassend beruht die Bewertungsmethodik auf drei Fundamenten, die Ursache, Reaktion und Wirkung von Verspätungen modellieren:

- **Dem stochastischen Fundament:** die Modellierung der technischen Zuverlässigkeit als Zufallsgröße für Zeit, Ort, Dauer und Eintrittswahrscheinlichkeit
- **Der Entscheidungsmenge:** die Modellierung aller möglichen Entscheidungsszenarien gemäß vorgegebener Recovery-Strategien
- **Der Entscheidungsfindung:** die Modellierung von Zusatzkostenfunktion zur Bewertung jedes Szenarios und schlussendlichen Auswahl der optimalen Alternative

5.1.2. Architektur der Methodik

Die vorgestellte Methodik arbeitet mit 3 unterschiedlichen Teilprozessen: der Bereitstellung von Eingabedaten und / oder der Erzeugung von gültigen Flugzeugumläufen, der Simulation von Flugplänen mit unterschiedlicher technischer Zuverlässigkeit und schlussendlich der Bewertung verschiedener Simulationsszenarien. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich hierbei auf den mittleren Prozess, der über eine Heuristik, die zur Erstellung der verschiedenen Recovery-Optionen verwendet wird, in Verbindung mit der Monte-Carlo Simulation die Datengrundlage für das Verständnis der TDR schafft. Eine Übersicht der Architektur ist in Abbildung 20 dargestellt.

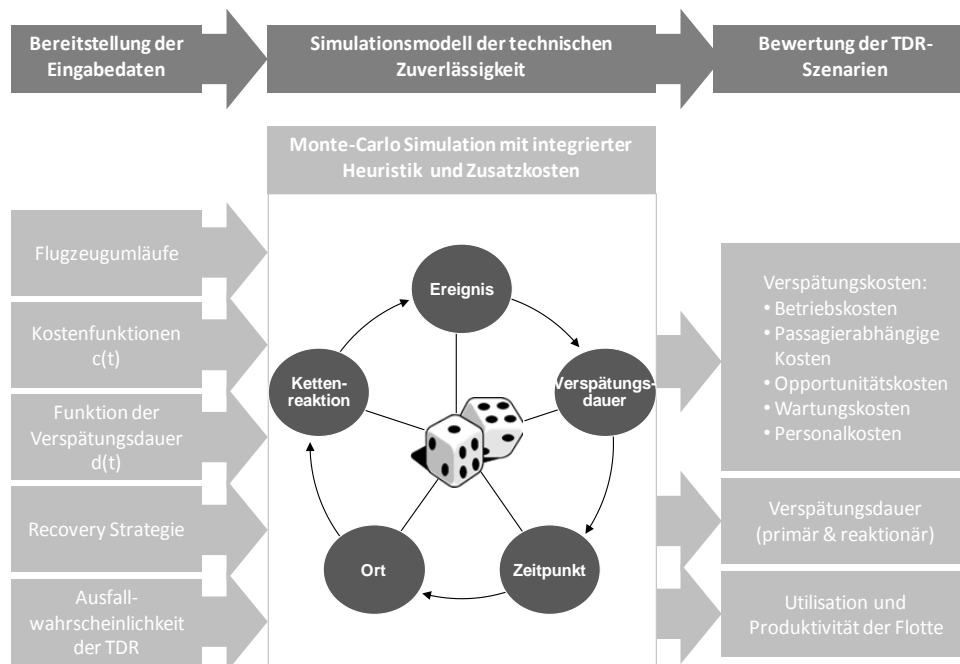


Abbildung 20: Architektur der Bewertungsmethodik

Der Eingabedatensatz setzt sich aus verschiedenen Aspekten zusammen; Die Grunddaten für die Erstellung eines Flugplans bilden Flugzeugumläufe, welche die geflogenen Streckenverbindungen, die Frequenz der Verbindungen und die geplanten An- und Abflugzeiten widerspiegeln.

Hieraus können zusätzlich die Blockzeiten und Start- und Endpunkte der Flugzeuge gewonnen werden. Für die Simulation der technischen Zuverlässigkeit muss ein gültiger Flugzeugumlauf generiert oder vorhanden sein. Dieser beinhaltet neben der Rotation auch die Festlegung oder Berechnung der Mindestanzahl an Flugzeugen für den operationellen Betrieb des Flugplans. Die Erstellung der Umläufe kann hierbei über gängige wissenschaftliche Methoden geschehen. Hierzu stehen exakte Optimierungsverfahren, Heuristiken oder Simulationsmethoden zur Verfügung (Barnhart et al., 1997, S.208-220 oder Hane et al., 1995, S.211-232). Der Flugplan einer Fluggesellschaft ist hierbei als das Ergebnis eines langfristigen Optimierungs- und Abstimmungsprozesses zu verstehen. Die Herausforderung für die Fluggesellschaft besteht darin die Position jedes einzelnen Fluges im Flugplan so zu optimieren, dass schlussendlich der Ertrag, der aus dem Angebot des Flugplans entsteht, bei minimalem Ressourceneinsatz maximiert wird. Es wird hierbei nicht als Aufgabe der vorliegenden Arbeit verstanden, diesen Prozess abzubilden. Die vorliegende Methodik sieht hierfür eine einfache Vorgehensweise (vgl.

Goplan R., Talluri K.T, 1998, S.176 und Grönkvist M., 2005, S:23) vor, die jedoch durch jede beliebige höhewertige ersetzt werden kann.

Des Weiteren müssen für jeden Flughafen die Nachtflugverbote und Turn-Around Zeiten angegeben werden. Gerade bei letzteren ist zu beachten, dass hier die tatsächliche minimale Zeitangabe auszuwählen ist, die zumeist durch den Hersteller des Flugzeugs bekanntgegeben wird (siehe beispielsweise Airbus, Aircraft Characteristics, 2009). Aus der Turn-Around Zeit und den geplanten Ankunfts- und Abflugzeiten ergibt sich die Bodenzeit jedes Flugzeugs. Darüber hinaus müssen die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verspätungen beziehungsweise die Ausfallwahrscheinlichkeit der TDR für die spätere Simulation gegeben sein. Neben diesen obligatorischen Daten kann die Berechnung der direkten Betriebskosten, die nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, für jede Strecke und somit den gesamten Flugplan aktiviert werden.⁶

Eine weitere Nebenbedingung, die jedoch vernachlässigt wurde, stellt die Slot-Vergabe an Flughäfen dar, die am Kapazitätseckwert arbeiten. Das Haben oder Nicht-haben eines solchen bestimmt über die Startfreigabe und damit auch über die Verspätungsdauer. Die Problematik in diesem Zusammenhang ist jedoch die Kenntnis der individuellen Slots einer Fluggesellschaft an jedem Flughafen, der durch den Flugplan angefliegen wird. Diese Information ist zum Zeitpunkt der Arbeit nicht verfügbar und konnte daher nicht verwendet werden.

Die Flugzeuggröße bzw. der Flugzeugtyp wird hierbei ebenfalls als zu diskutierender Parameter ausgeschlossen: er ergibt sich vielmehr aus dem verwendeten Flugplan bzw. den erstellten Flugzeugrotationen und ist somit implizit durch den Flugplan vorgegeben. Die folgende Methodik ist daher als unabhängig von der Flugzeuggröße zu betrachten.

Die Simulation des Flugplans mit Hilfe der Monte-Carlo Simulation bildet den Rahmen des Kernelements der Methodik. Dieses Element wird sooft wiederholt bis das Konvergenzkriterium, das im Folgenden diskutiert wird, eintritt, oder der Ablauf durch den Anwender unterbrochen wird. Innerhalb dieses Prozesses wird jedes Element des Flugplans schrittweise angesprochen und das Eintreten eines Zufallsereignisses abgefragt. Tritt ein solches ein, wird die Heuristik in Gang gesetzt, die abhängig vom Zeitpunkt, vom Ort und von der Dauer der Verspätung Ausweichszenarien

⁶ Die Berechnung der direkten Betriebskosten richtet sich nach Boeck et al., 2008

generiert. Diese wiederum werden mit Hilfe der Zusatzkostenfunktionen bewertet und wiederum durch die Heuristik optimiert. Das Ergebnis in Form eines „Zusatzkosten-minimalen“ Flugzeugumlaufs wird in den Flugplan eingebaut und der nächste Flug wird angesprochen. Für jedes so erzeugte ungeplante Ereignis werden alle Kosten und Verspätungsergebnisse für die weitere Analyse gespeichert. Somit laufen zwei verschiedene Ebenen während einer Simulation ab: der übergeordnete Monte-Carlo Prozess und der detaillierende Optimierungsprozess der Heuristik.

Den abschließenden Schritt bildet die Variation verschiedener TDR-Szenarien, deren Simulationsergebnisse analysiert werden, um Aussagen über den Einfluss der technischen Zuverlässigkeit zu erhalten.

5.1.3. Prozess der Methodik

Der Ablauf der Methodik ist hierzu in Abbildung 21 dargestellt. Ausgehend von der Erstellung der Rotationen auf Basis der Eingabedaten und Randbedingungen, wird der so generierte Flugplan so lange mit ungeplanten Ereignissen gestört, bis das Konvergenzkriterium erfüllt ist. Die Einbettung des Flugplans in die Monte-Carlo Simulation ermöglicht es zusätzlich die stochastische Natur der TDR zu kontrollieren und bei Konvergenz zu analysieren.

Der Prozessablauf zeigt ebenfalls deutlich die Notwendigkeit der Bausteine auf, die aus den Anforderungen in Kapitel 3 entwickelt wurden. Die Rotationen bilden das Fundament der Monte-Carlo Simulation. Diese werden durchlaufen, gestört und verändert. Die Hilfsmittel hierfür sind die Zufallswerte für die TDR und deren Dauer, verschiedene Recovery-Strategien und die Monte-Carlo Simulation, die über die Konvergenz gesteuert wird. Für jeden Bewertungsschritt wird dieser Prozess durchlaufen mit jeweils veränderter technischer Zuverlässigkeit.

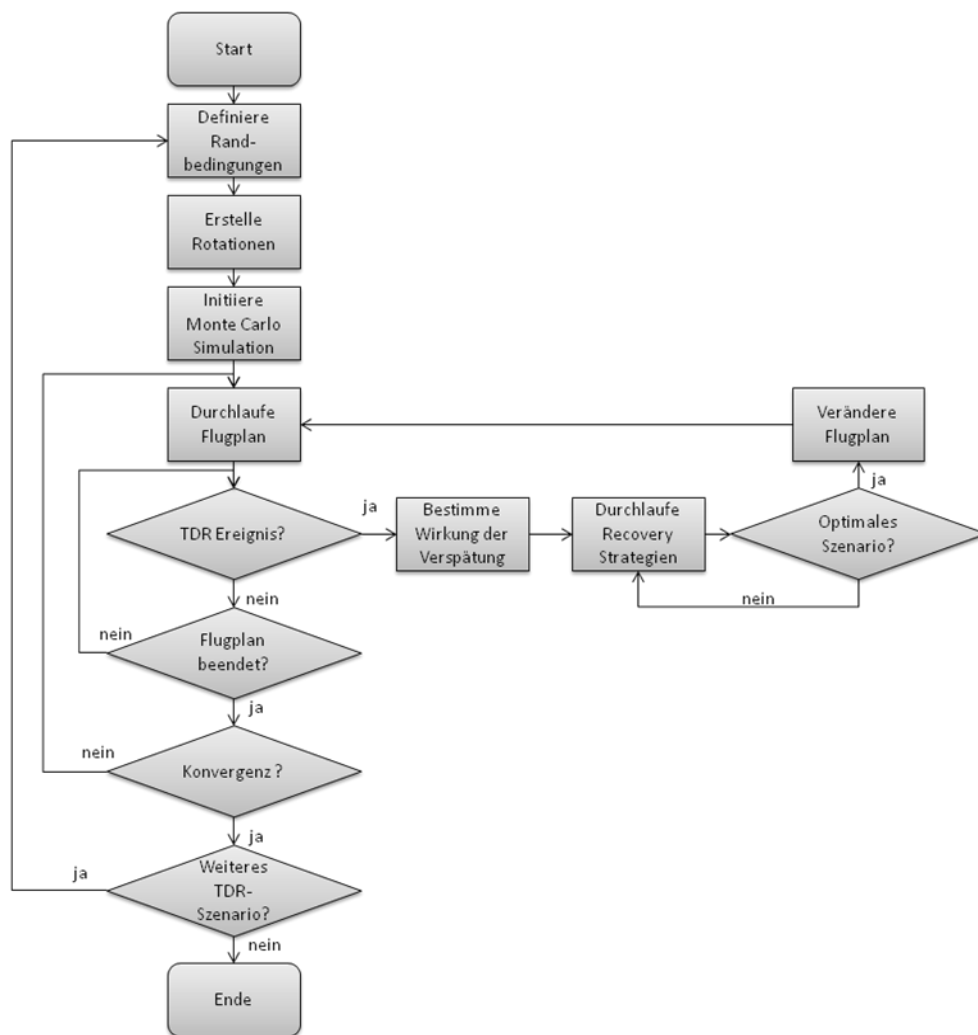


Abbildung 21: Übergeordneter Prozessablauf der Methodik

Sowohl Architektur als auch der Prozess der vorliegenden Methodik baut auf vorhandenen als auch neuen Elementen auf. Grundsätzlich wurden hierzu die Kapitel 3 folgende Anforderungen identifiziert:

- Die Bereitstellung von Reaktionsmöglichkeiten zur Minimierung von Verspätungen
- Die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen für spezifische Reaktionsszenarien auf deterministischer Basis
- Den Aufbau der Monte-Carlo Simulation auf Rotationen
- Die Zufälligkeit der TDR
- Die Modellierung der Verspätungsdauer
- Die Beherrschung des Zufalls

Wie die Diskussion des Status-Quo gezeigt hat, befindet sich besonders die Optimierung von Verspätungsszenarien mit verschiedenen Optionen in einem fortgeschrittenen Stadium der wissenschaftlichen Forschung. Aus diesem Grund wird für die Optimierung an dieser Stelle auf eine modifizierte Version des GRASP Algorithmus von Arguello und Bard zurückgegriffen. Hierbei wird dessen grundsätzliches Konzept der zufallsgesteuerten Optimierung übernommen und um weitere Szenarien erweitert, die sich aus der Literaturrecherche (siehe Kapitel 2.2) ergeben haben.

Alle anderen Elemente der Methodik sind in der dargelegten Form bisher nicht veröffentlicht worden. Insbesondere die Kombination von deterministischen Zusatzkostenfunktionen, die von der Verspätungsdauer abhängen, mit Reaktionsszenarien im Rahmen einer Monte-Carlo Simulation stellt die Neuartigkeit dieses Ansatzes dar, der im Folgenden diskutiert wird. Dieser Ansatz erweitert die Optimierungsfrage eines einzelnen Falles auf die Frage, welchen Einfluss zahlreiche solcher Ereignisse auf einen Flugplan haben.

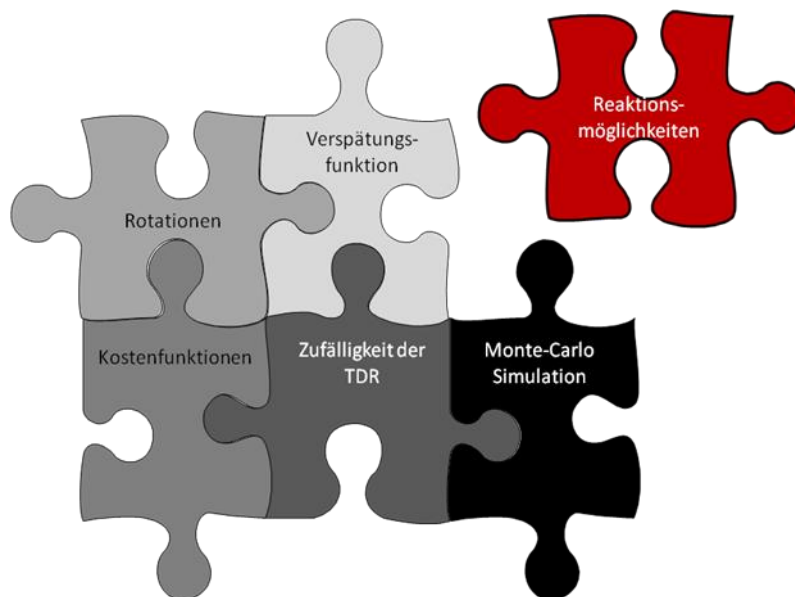


Abbildung 22: Neuartige Bausteine der Methodik

5.2. Erstellung der Eingabedaten

Die Erstellung der Flugzeugumläufe kann entweder als Eingabeparameter direkt vorhanden sein oder über Optimierungsansätze bzw. Heuristiken erzeugt werden. Der folgende Abschnitt gibt hierzu einen kurzen Überblick zu Möglichkeiten, wie Flugzeugumläufe einfach und schnell generiert

werden können. Der Flottenumlauf setzt sich hierzu aus drei Teilgebieten zusammen. Der Berechnung der Mindestanzahl der Flugzeuge, der Festlegung der Start- und Endpunkte der Umläufe und der abschließenden Erstellung der Flugzeugumläufe. Wie bereits in Kapitel 5.1 angedeutet, handelt es sich bei dieser Funktion um ein Blackbox-System, das beliebig ausgetauscht werden kann. Für die Bewertungsmethodik spielt nur das Ergebnis in Form von Flugzeugumläufen eine Rolle, die die Basis für die Anwendung der Recovery-Strategien bildet. Jeder Flugzeugumlauf repräsentiert hierbei eine exakt festgelegte Reihenfolge von Verbindungen, die das Flugzeug in einem Zeitraum abarbeitet. Die Bedeutung für die Recovery Strategie liegt hierbei darin, dass alle Flugzeugumläufe beliebig kombiniert werden, indem einzelne Teile der Verbindungsabfolge ausgetauscht oder weggelassen werden.

5.2.1. Festlegung der Mindestanzahl an Flugzeugen für den Betrieb des Flugplans

Die Anzahl der Flugzeuge, mit denen der Flugplan betrieben wird, unterscheidet sich von der Anzahl der Flugzeuge, die eine Fluggesellschaft insgesamt betreibt und in Veröffentlichungen angibt. Im Allgemeinen kann man davon ausgehen, dass ca. 2-8% der Flugzeuge durch Wartungszyklen oder Reserverollen am Boden gehalten werden. Für Erstellung eines Flugplans ergibt sich nun mehr die Frage, welche Anzahl an Flugzeugen ist mindestens notwendig?

Die Festlegung einer unteren Grenze beeinflusst zusätzlich das Verhalten des Systems bei technischen Ausfällen. Unter der Annahme, dass die Anzahl der Flugverbindungen, die zyklisch bedient werden müssen, durch die Nachfrage der Passagiere nach Dienstleistungen fest ist, schränkt die Anzahl der Flugzeuge den Gestaltungsspielraum stark ein. So sinkt die Flexibilität beispielsweise durch strategische Pufferzeiten stark mit sinkender Anzahl der Flugzeuge, indem die Frequenzen und somit die Nutzung des Flugzeugs ansteigt. Netzwerke bzw. Systeme, in denen die Ressource Flugzeug daher knapp bemessen ist, was in der Realität durch die hohe Kapitalbindung durch das Flugzeug passiert, reagieren deutlich stärker auf Störungen.

Zur Bestimmung der Mindestanzahl an Flugzeugen wird daher auf die Methodik von Bartlett (Bartlett, 1957, S.139-149) und Dantzig (Dantzig et al., 1954, S.217-222) zurückgegriffen, die basierend auf dem FIFO-Prinzip für Tanker und Bahnen dieses Problem gelöst haben. Hierbei wird durch die First-In-First-Out Vorgehensweise für jede Transporteinheit die

minimale Standzeit genutzt, um das Problem zu lösen. Laut Orlin löst die Vorgehensweise nach dem FIFO-Prinzip das Problem optimal, wenn keine Randbedingungen vorgegeben sind (Orlin, J., 1982, S.760 und vgl. Gopalan et al., 1998, S.162). Die Mindestanzahl U an Transportmitteln lässt daher wie folgt bestimmen (Bartlett, 1957, S.147):

$$U = \alpha + \sum_j \beta_j$$

Formel 5-1

Der Parameter α^7 bezeichnet die Anzahl an Bewegungen, die bei Übergang zwischen 2 Perioden unterwegs sind und β_j die maximale Anzahl an Flugzeugen an einem Flughafen j . Sowohl α als auch β_j lassen sich hierbei einfach durch Summation von Starts und Landungen an jedem Flughafen aus den Eingabedaten berechnen. Hierbei gilt natürlich, dass die kumulative Summe von Starts und Landungen an jedem Flughafen am Ende jeder Periode 0 ergibt. β_j beschreibt daher nicht den kumulativen Wert, sondern den maximalen Wert der Summe von Starts und Landungen.

Beträgt der Zeitraum, der für die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit gewählt wird, mehr als ein Tag, muss der dargestellte Ansatz für jede Periode wiederholt werden. Die berechnete Mindestanzahl an Flugzeugen geht hierbei direkt für jeden Tag in die Erstellung der Flugzeugumläufe ein. Dadurch können Unterschiede in der Anzahl der Flugzeuge pro Periode entstehen, die durch geplante Wartungsarbeiten erklärt werden können.

⁷ Aufgrund des Nachtflugverbots und des fehlenden Angebots von Flügen zwischen 23:00 und 4:00 kann der Parameter α bei der Berechnung von Mindestanzahl auf 0 gesetzt werden.

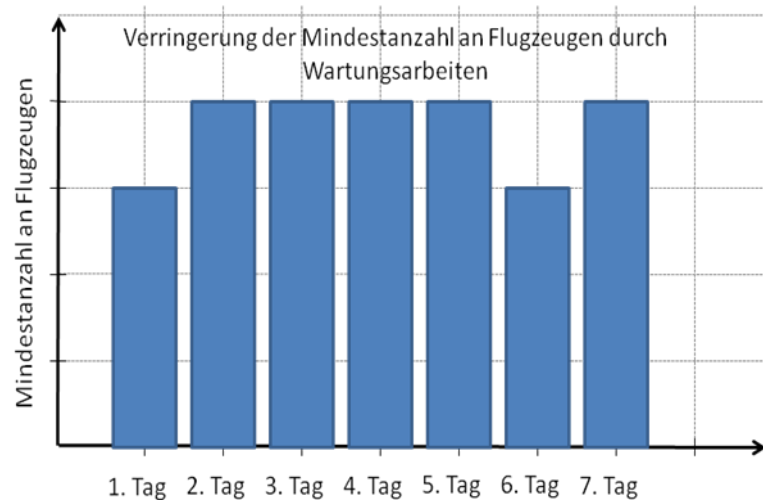


Abbildung 23: Verringerung der Mindestanzahl an Flugzeugen durch beispielsweise geplante Wartungsarbeiten

5.2.2. Generierung der Flugzeug-Start- und Endpunkte

Die Festlegung der Startpunkte der Flugzeuge im Flugzeugumlauf ist auf den Eingaben der Startzeiten begründet. Mit Hilfe der Kombination eines einfachen Sortieralgorithmus und eines Regelwerks können die Positionen bestimmt werden, an denen Flugzeuge am Anfang positioniert werden müssen.

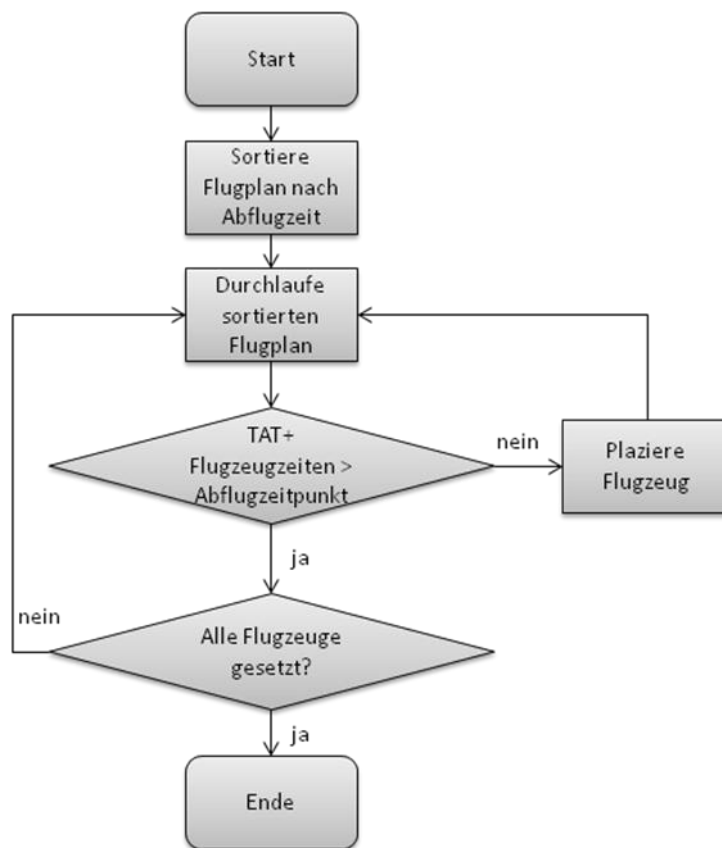


Abbildung 24: Flussdiagramm zur Bestimmung der Startpunkte der Flugzeuge

Die Sortierung kann hierbei über typische Bubble-Sort oder Quicksort Algorithmen geschehen. Dies geschieht, indem die Startzeiten absteigend nach der Zeit sortiert werden und mit Hilfe der Blockzeiten berechnet wird, wo sich die Flugzeuge nach Durchführung eines Fluges befinden. Das verwendete Regelwerk imitiert den operativen Betrieb einer Fluggesellschaft. Dieses wird solange angewendet, bis alle Flugzeuge den frühestmöglichen Startpunkt besetzt haben. Über den Vergleich der geplanten Abflugzeiten und der ebenfalls bekannten Blockzeiten können die Flughäfen bestimmt werden, die bereits zu einem frühen Zeitpunkt im Flugplan angefliegen werden.

Alle Flughäfen, denen ein Flugzeug durch diese Vorgehensweise zugewiesen werden kann, sind daher als Startpunkte für die Festlegung der Rotationen zu verstehen.

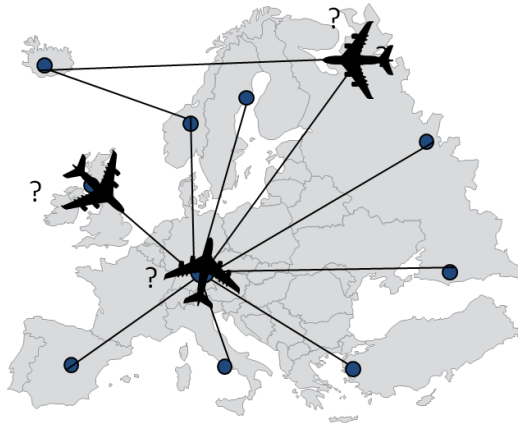


Abbildung 25: Festlegung der Flugzeugstartpunkte

Durch die Umkehrung des Algorithmus können zusätzlich die Endpunkte der Rotationen bestimmt werden. Hierzu muss der Flugplan in aufsteigender Reihenfolge sortiert werden, wobei über den Vergleich der Blockzeiten und Ankunftszeiten wiederum die Standorte determiniert werden können. Dadurch sind für die Erstellung der Rotation neben der Anzahl der Flugzeuge auch die Start- und Endpunkte bekannt.

Diese spielen für die Bewertung der Recovery-Szenarien eine entscheidende Rolle als Ausschlusskriterium. Durch die Kombination verschiedener Umlaufsegmente von maximal zwei Flugzeugen, entsteht eine Vielzahl von neuen Umläufen, die den Randbedingungen des mathematischen Modells oder einfacher des ursprünglichen Flugplans nicht entsprechen. Durch die Bestimmung der Start- und Endpunkt der Umläufe bzw. der Flugzeuge wird daher ein Ausschlusskriterium erzeugt, das die bei der Entscheidungsfindung des optimalen Szenarios die Wahl deutlich einschränkt.

5.2.3. Erstellung der Flugzeugumläufe

Die Erstellung der Flugzeugumläufe bildet den wesentlichen Teil der Vorbereitung zur Bewertung der technischen Zuverlässigkeit. Indem die genaue Abfolge der abzufliegenden Flugverbindungen determiniert wird, wird auch das Potential festgelegt, über das die Fluggesellschaft zur Reaktion auf Störungen verfügt. So werden durch den Flugzeugumlauf vor allem Pufferzeiten im Flugplan festgelegt, die Störungen kompensieren oder zumindest teilweise reduzieren können. Gerade die Optimierung dieser Zeitpuffer definiert die Robustheit eines Flugplans (vgl. Lan et al., 2006, S. 17-20).

Da Flugzeugumläufe nach einer Vielzahl von Kriterien formuliert und optimiert werden können, existieren eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Erstellung dieser. Neben der reinen Optimierung werden häufig hierfür Heuristiken verwendet, die durch ein geschicktes Regelwerk versuchen den Lösungsweg zu verkürzen. Die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit baut daher auf Flugzeugumläufen auf, die aus einem Blackbox-System entstanden sind. Die Generierung dieser steht hierbei nicht im Mittelpunkt der Arbeit.

Konventionelle Heuristiken arbeiten nach dem Prinzip, dass ein klar definiertes Regelwerk, das den Prozess zur Lösungsfindung nachbildet, eine zulässige Lösung des Problems findet. Für die Erstellung von Flugzeugumläufen bietet sich daher die allgemeine Vorgehensweise „Generiere-Weise zu-Ändere“ an. Abbildung 26 zeigt nach Clarke (Clarke, M., 1998, S.93) eine mögliche Vorgehensweise nach diesem Prinzip. Ausgehend von den bekannten Start –und Endpunkten kann über verschiedene Pfadfindungsalgorithmen⁸ für jedes Flugzeug ein Feld von möglichen Flugrouten vom Start- zum Endpunkt errechnet werden. Der Inhalt des Feldes wird daraufhin mit Hilfe eines frei definierbaren Bewertungskriteriums (z.B.: Kosten der Wegstrecke) analysiert und die günstigste dem Flugzeug zugewiesen. Anschließend wird in einem letzten Schritt die Datengrundlage entsprechend der gewählten Route abgeändert. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt bis allen Flugzeugen ein Umlauf zugewiesen ist. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass diese Heuristik sequentiell alle Möglichkeiten für jedes Flugzeug durchspielt und dann basierend auf einem Entscheidungskriterium den Flugzeugumlauf festlegt. Nachteilig hierbei ist sicherlich, dass die Modellierung der Entscheidung ein detailliertes Wissen über das zugrundeliegende Netzwerk fordert. So müssen Wartungskriterien und die Verfügbarkeit der Crew bekannt sein (Clarke, M., 1998, S.58-59).

⁸ z.B.: Out-of-Kilter-, Ford-Bellman-, Dijkstra Algorithmus, etc.

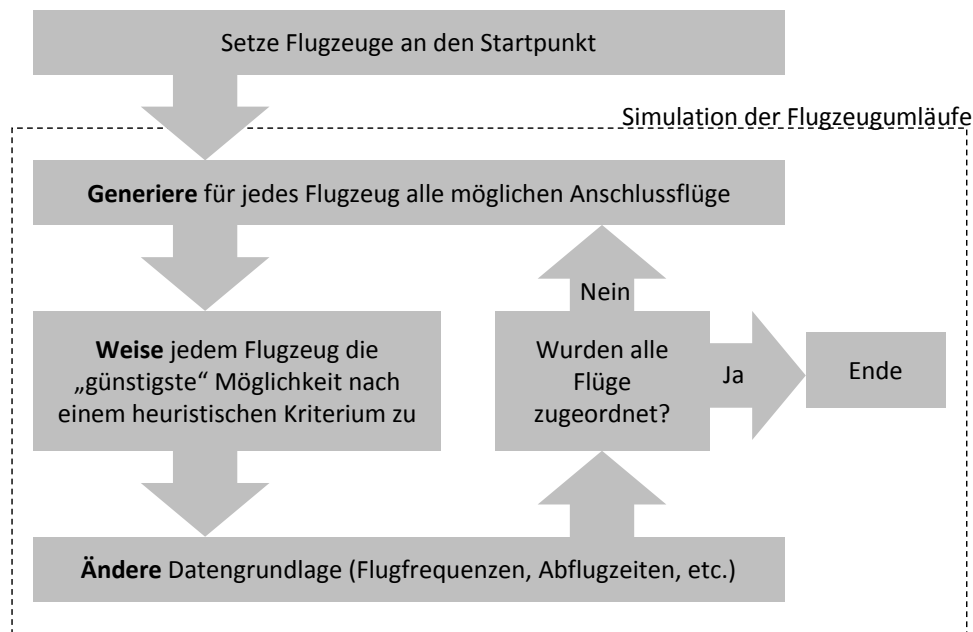


Abbildung 26: Heuristik zur Erstellung von Flugzeugumläufen über die sequentielle Suche nach Umläufen für jedes Flugzeug

Betrachtet man nun den Ablauf aus operationeller Sicht, so kann als Alternative zur sequentiellen Heuristik folgender Ansatz verfolgt werden: betrachtet man jeden Flug als Einzelereignis im Flugplan entlang einer Zeitachse, so können über zeitlich diskrete Zeitschritte die Bewegungen des Flugzeugs durch das Netzwerk nachvollzogen werden. An jedem Flughafen muss daher die Entscheidung neu getroffen werden, welcher Anschlussflug gewählt wird, solange bis allen Flügen Flugzeuge zugeordnet werden. Der Vorteil hierbei liegt in der einfachen Formulierung des Entscheidungskriteriums, das sich nur an der nächsten Möglichkeit innerhalb des Flugplans orientiert und nicht nach der Optimalität des gesamten Umlaufs. Hierfür eignen sich vor allem Algorithmen wie das FIFO-Prinzip. Möchte man die Unsicherheit in der Entscheidung ebenfalls berücksichtigen, bietet sich hierfür die Grey-Theorie an (Hsu, C./ Wen, Y., 2000, S.44-68) Der Simulationscharakter dieser Heuristik bietet zusätzlich den Vorteil, dass die Implementierung der technischen Zuverlässigkeit als stochastisches Element deutlich einfacher möglich ist. Durch die zeitliche Komponente können sowohl Verspätungen als auch Annullierungen als zeitliche Verschiebung direkt integriert werden. Der entscheidende Nachteil liegt sicherlich in der Qualität der Lösung, die nur zufällig optimal sein kann. Die Interaktion der Flugzeuge an den Flughäfen verhindert hierbei, dass für jedes Flugzeug aus einer Menge von möglichen Umläufen eine optimale gefunden wird.

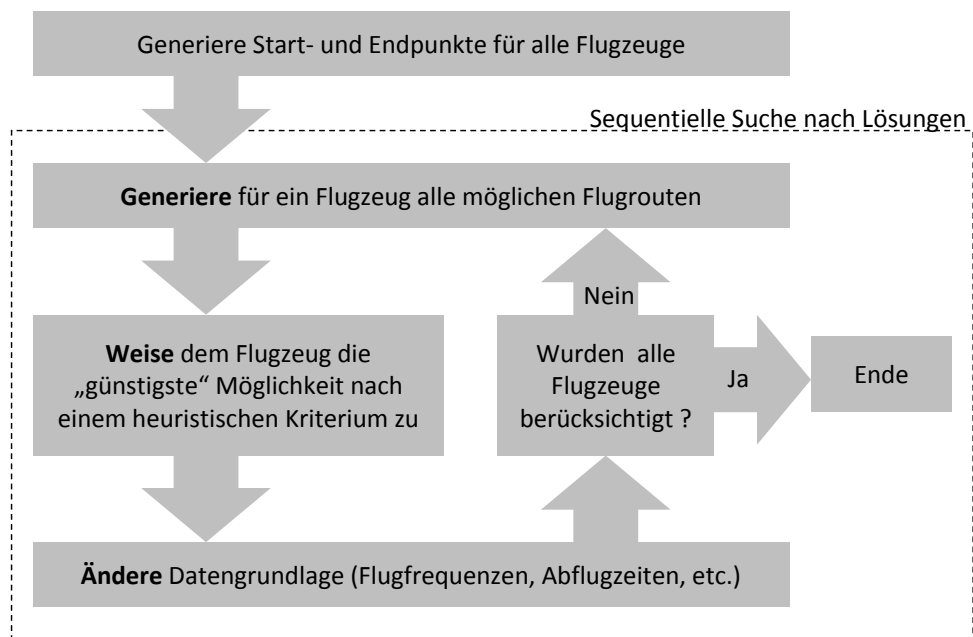


Abbildung 27: Heuristik zur Erstellung von Flugzeugumläufen über die Simulation von Flugzeugbewegungen

5.3. Einbau der Störgröße TDR in die Simulation

Aufgrund der stochastischen Natur von technischen Störungen müssen diese auch in einer gleichgearteten Simulationsumgebung modelliert werden, die es erlaubt, die Wahrscheinlichkeit der Ereignisse zu kontrollieren und auszuwerten. Zu diesem Zweck schlagen Lan et al. die Verwendung einer Monte-Carlo Simulation vor (vgl Lan et al., 2006, S.20), die es ermöglicht, komplexe kombinatorische Systeme zu simulieren und sinnvoll auszuwerten. Hierbei steht die Simulation des statistischen Verhaltens der TDR im Vordergrund. Im Folgenden wird dieser Ansatz vorgestellt beginnend mit der Systemstruktur des Monte-Carlo Modells, der Modellierung der stochastischen Größen und der Bestimmung des Konvergenzkriteriums, das die Qualität der Ergebnisse festlegt. Abschließend werden die beiden noch fehlenden Fundamente der Methodik vorgestellt, indem eine generische Kostenfunktion definiert wird und die Modellierung der Recovery-Strategien erfolgt.

5.3.1. Eingaben und Ergebnisse der Monte-Carlo Simulation

In die Systemstruktur zur Integration des Einflusses der technischen Zuverlässigkeit in Flugpläne fließen verschiedene Funktionstypen, Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Informationen ein, um durch das Simulationsmodell Aussagen über die Wirkung von technischen Ausfällen

treffen zu können. Das Ergebnis beinhaltet somit Verspätungskosten, Verspätungsdauern (vor allem primäre und reaktionäre Anteile) als auch Produktivitätseinflüsse hinsichtlich der Flotte.

Das zentrale Modell der Simulation bildet die Graphentheorie, über die ein Flugplan als zeitliches Kontinuum von Knoten und Pfeilen dargestellt werden kann. Die Basis der Simulation bilden daher die Flugzeugumläufe als Ergebnis der heuristischen Betrachtung von Graphen, die den ungestörten Flugplan darstellen und zur theoretischen Modellierung dienen. Aufgrund der zufälligen ungeplanten Natur von technischen Ausfällen müssen Flugpläne jedoch im Rahmen der Modellbildung in einem stochastischen System abgebildet werden. Hierfür eignet sich die Monte-Carlo Simulation, die das Zufallsexperiment „gestörter Flugplan“ solange wiederholt bis ein Haltekriterium erreicht ist. Jeder Simulationsschritt beinhaltet somit das einmalige Durchspielen eines Flugplans mit zufälligen Störungen. Die zugrundeliegenden Störungen basieren auf der Ausfallwahrscheinlichkeit von technischen Störungen, durch die Verspätungen in das System induziert werden können. Die Dauer einer Verspätung würde sich hierbei einerseits nach dem ausgefallenen technischen System des Flugzeugs und dem Grad des technischen Defekts richten. In der vorliegenden Arbeit jedoch wird dieser Zusammenhang vernachlässigt und auf die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems Flugzeug reduziert, das sich aus der Summe der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Einzelsysteme zusammensetzt. Zusätzlich zu der Eigenschaft der Zufälligkeit einer Störung, sind somit ebenfalls die Dauer, der Zeitpunkt und der Ort im Vorfeld unbekannt und somit stochastischer Natur. Die Monte-Carlo Simulation nimmt all diese Zufallsgrößen auf und verarbeitet diese über die Heuristik zu einem neuen Flugplan. Diese Interaktion von Simulation und Heuristik bilden damit den Kern des Bewertungsprozesses, der solange wiederholt werden muss, bis sich eine Konvergenz der Ergebnisse einstellt. Schlussendlich löst jede Störung auch eine Kettenreaktion aus, die ebenfalls bestimmt werden muss. In das Simulationsmodell müssen daher bewertbare Elemente der genannten Wahrscheinlichkeiten implementiert werden. Die Monte-Carlo Simulation wird für jeweils eine feste, nicht veränderbare TDR durchlaufen. Zur Bewertung der Veränderung der TDR müssen daher verschiedene Monte-Carlo Simulationen mit verschiedenen TDR-Werten durchlaufen werden.

5.3.2. Modellierung der stochastischen Störgrößen

Zu Anfang führt jedes ungeplante Ereignis zu einer Störung des Systems, wie in Abbildung 28 dargestellt. Dies führt jedoch nicht linear zu einer Änderung der Bewertungskriterien. Es sind vielmehr verschiedene andere Faktoren für die Auswirkung auf das Gesamtsystem zuständig. So ist das Ereignis an sich nur als Urheber einer ganzen Reihe von weiteren zufallsbedingten Elementen zu verstehen. Die Verspätungsdauer determiniert direkt die zugrundeliegenden Verspätungskosten. Im Einklang mit der Recovery-Maßnahme der Fluggesellschaft ergibt sich dadurch die Entscheidung für eine Verspätung, Annullierung oder Kombination beider.

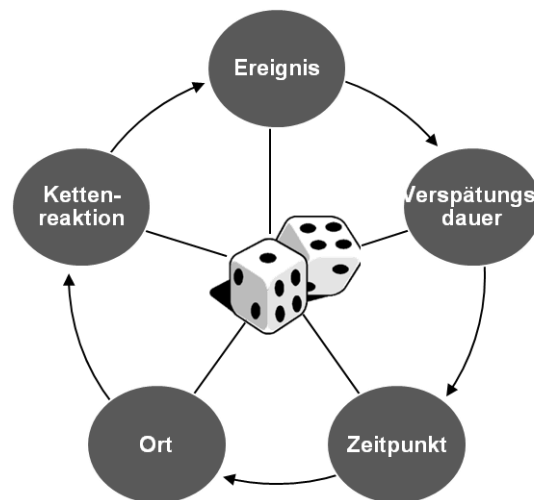


Abbildung 28: Verkettung von Zufallseffekten in der Simulation der technischen Zuverlässigkeit

Gleichzeitig werden mit dem Zeitpunkt und dem Ort der Störung ein weiteres Zufallselement in das System induziert, das durch die Bewertungsumgebung beherrscht werden muss. Je nach Flughafen und Uhrzeit der Störung werden unterschiedliche Kettenreaktionen ausgelöst; hierbei gilt, dass je früher die Störung in einer Rotation stattfindet, desto weiterreichender können die Konsequenzen für die folgenden Flüge sein. Gleichzeitig ist jedoch natürlich die Anzahl der Optionen höher, auf die Störung zu reagieren. Findet die Störung an Flughäfen mit vielen Frequenzen (aus dem betrachteten Flughafen) statt, ergeben sich automatisch mehr Möglichkeiten durch die Hinzunahme von anderen Rotationen die Konsequenzen einer Störung zu verhindern. Es zeigt sich daher, dass durch Dauer, Zeitpunkt und Ort der Störung eine beliebige Anzahl verschiedener Kettenreaktionen ausgelöst werden, die durch die Methodik aufgefangen werden müssen. Jede Kettenreaktion führt zu einem reaktionären Ereignis an einem Folgeflughafen. Die Anzahl der Ereignisse der Kettenreaktion ist dabei nach oben offen und richtet sich nach der

Anzahl der betroffenen Rotationen (Beispiele für die Anzahl möglicher Szenarien in Kapitel 6.2). Gleichzeitig darf nicht die Anzahl dieser Kettenreaktionen für eine Fluggesellschaft alleinstehend betrachtet werden; vielmehr der Gesamteffekt auf das Netzwerk steht im Vordergrund. Diese wiederum richtet sich nach Art und Anzahl der Reaktionsmöglichkeiten, die in Kapitel 5.3.5.2 diskutiert werden.

Die vorgestellte Methodik wird alle Szenarien generieren und dasjenige auswählen, das den geringsten Einfluss auf das Netzwerk hat. Die Modellierung der stochastischen Größen für das Simulationsmodell hat somit entscheidenden Einfluss auf dessen Verhalten und Reaktionen. Der folgende Unterabschnitt gibt hierzu einen Überblick.

5.3.2.1. Modellierung der technischen Zuverlässigkeit als Zufallszahl

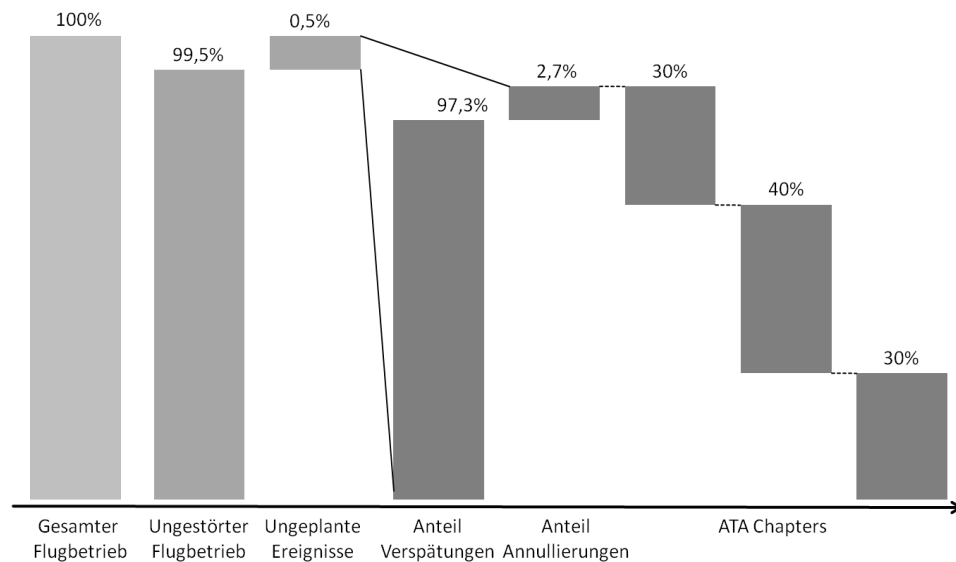


Abbildung 29: Exemplarische Zusammensetzung der Ausfallwahrscheinlichkeit der technischen Zuverlässigkeit

Grundsätzlich treten technische Störungen auf oder nicht; die zugrundeliegende Entscheidung beschränkt sich somit auf die Modellierung einer Zufallszahl zwischen 0 und 1, die, falls das Intervall der technischen Zuverlässigkeit getroffen wird, eine technische Störung auslöst. Abbildung 29 zeigt hierfür einen typischen Anteil von 0,5% ungeplanter technischer Ereignissen gemessen an allen Abflügen für Kurzstreckenflugzeuge; d.h.: bei jedem 200sten Flug findet ein ungeplantes Ereignis statt.

Dieses wiederum setzt sich rein statistisch aus dem dominierenden Anteil für Verspätungen und dem sehr geringen Anteil an Annullierungen zusammen. Die gesamte Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall setzt zusätzlich aus den Ausfallwahrscheinlichkeiten aller Subsysteme des Flugzeugs zusammen. Dieser Aufbau ermöglicht folgende Entwurfsoptionen für den Wert der TDR: die einfachste Modellierung erfolgt über die reine Nutzung der TDR-Werts, wobei dessen Zusammensetzung für die weitere Simulation keine Rolle spielt. Dieser Wert kann auf Verspätungen und Annullierungen, auf verschiedene ATA-Kapitel oder auf Systemebene aufgeteilt werden. Der Informationsbedarf wächst hierbei überproportional mit dem Detailniveau.

Versteht man die technische Zuverlässigkeit auch als Investitionsaufwand einer Fluggesellschaft in einen assoziierten MRO-Betrieb, dann kann die stochastische Abbildung einzelner ATA-Systeme vernachlässigt werden. Gerade die Qualität und Leistungsfähigkeit des MRO-Betriebs ist für die Erhaltung der Lufttüchtigkeit und somit konsequenterweise der einzelnen ATA-Systeme verantwortlich. Die Stochastik lässt sich daher nur auf die Fähigkeiten des MRO-Betriebs beziehen nicht auf die einzelnen ATA-Systeme, die dieser nachgelagert sind.

5.3.2.2. Aufstellen der Verspätungsfunktion

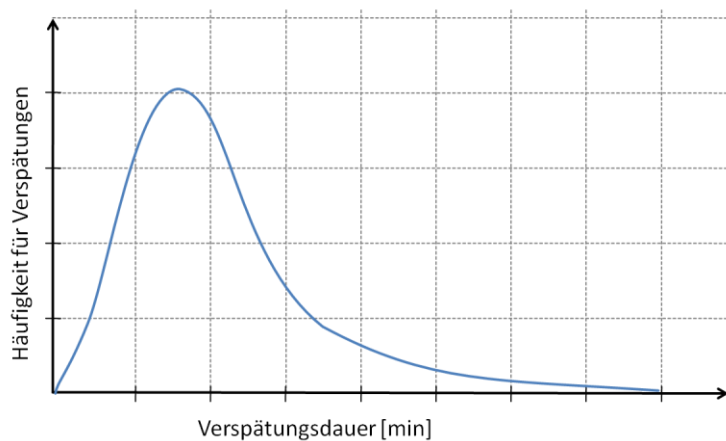


Abbildung 30: Modellierung der Verspätungsdauer durch eine Gamma-Verteilung

Die Berechnung der Verspätungsdauer durch eine technische Störung erfolgt hierbei durch eine Normal-, Exponential-, Gamma-, Logarithmische-Normal oder Weibull Verteilung (Lan et al., 2006, S.19), wie beispielhaft in Abbildung 30 gezeigt. Der qualitative und quantitative Verlauf und das Verhalten der Kurve wurden hierbei von Luftfahrtexperten bestätigt, wobei

jedoch aufgrund sensibler Daten keine exakten Größen wiedergegeben werden können. Im vorliegenden Fall wurde basierend auf den Annahmen von Lan (siehe Lan, S., 2003, S.45) der Verlauf einer Gamma-Verteilung modelliert (Rade et al., 1995, S.417). Diese eignet sich vor allem für die Beschreibung von Lebensdauern und Bedienzeiten.

$$f(x; \alpha, \beta) = x^{\alpha-1} \cdot \frac{e^{-\frac{x}{\beta}} \beta^{-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \quad \text{Formel 5-2}$$

Der Verlauf der Gamma-Funktion lässt sich hierbei über den Stirlingsche Formel approximieren (vgl. Hartung et al., 1989, S.904):

$$\Gamma(\alpha) \cong e^{-\alpha} \alpha^{\alpha-0.5} \sqrt{2\pi} \left(1 + \frac{1}{12\alpha} + \frac{1}{288\alpha^2} - \frac{139}{51840\alpha^3} - \frac{571}{2488320\alpha^4} \right) \quad \text{Formel 5-3}$$

Die Parameter α und β legen Form und Skala der Funktion und somit der Verteilung fest und ergeben sich aus statistischen Analysen. Gleichzeitig kann sowohl der Erwartungswert $E(x)$ als auch die Varianz $\text{Var}(x)$ einfach berechnet werden:

$$E(x) = \alpha \cdot \beta \quad \text{Formel 5-4}$$

$$\text{Var}(x) = \alpha \cdot \beta^2 \quad \text{Formel 5-5}$$

Der asymmetrische Charakter der Kurve zeigt auch den unterschiedlichen Einfluss von Ausfällen auf die Verspätungsdauer. So führt nur ein kleiner Anteil an Ausfällen zu kurzen Verspätungen. Der Großteil jedoch kann zu erheblichen Störungen des Systems führen, deren zeitliche Auswirkung eine große Bandbreite hat.

5.3.3. Bestimmung des Konvergenzkriteriums

Aufgrund der stochastischen Natur der Monte-Carlo Simulation muss ein Stopp-Kriterium definiert werden, um die Konvergenz der Berechnungen zu überprüfen. Jeder Durchlauf des Flugplans innerhalb der Simulation entspricht einem Zufallsexperiment mit gleichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Das Ergebnis jedes Iterationsschrittes ist damit zufällig und hat als Einzelergebnis keine Aussage für die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit. Erst bei der Konvergenz der Zahlenfolgen entsteht durch die Annäherung an den Grenzwert eine aussagekräftige Bewertungsgrundlage. Hierfür existieren verschiedene Ansätze wie die L^P -Konvergenz oder das Gesetz der großen Zahlen, das zwischen einer

schwachen und starken Ausführung differenziert. Das Gesetz der großen Zahlen besagt, dass sich bei unabhängiger Wiederholung eines Zufallsexperiments die zufälligen Werte um den Erwartungswert stabilisieren. Zahlreiche Testläufe haben hierbei gezeigt, dass sich durch die Verkettungswirkung der ungeplanten Störung (siehe Einleitung zu 5.3.2) das schwache Gesetz der großen Zahlen am besten eignet⁹ (Feller, 1968):

$$\lim_{x \rightarrow \infty} P(|X_n - \mu| \geq \epsilon) = 0 \quad \text{Formel 5-6}$$

Das Gesetz besagt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die Differenz des aktuellen Ergebnisses X_n und dem Mittelwert μ bei n Durchläufen des Flugplans kleiner als der Grenzwert ϵ sind, gegen null geht. Für die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit eignet sich demnach die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verspätungsdauer, aus der sich der Erwartungswert für eine mittlere Verspätung berechnen lässt:

$$\mu_{\text{Berechnung}} = n_{\text{Flüge}} \cdot TDR \cdot \mu_{\text{Gamma}} \quad \text{Formel 5-7}$$

$$\mu_{\text{Gamma}} = E(x) = \alpha \cdot \beta \quad \text{Formel 5-8}$$

Über die Anzahl der Flüge in einem Flugplan und der Ausfallwahrscheinlichkeit TDR multipliziert mit der mittleren Verspätung der Gamma-Funktion erhält man die mittlere erwartete gesamte Verspätungsdauer als Funktion der technischen Zuverlässigkeit TDR.

Die Konvergenz der Simulation ist demnach dann erreicht, wenn folgender Zusammenhang gilt:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} P(|\mu_{\text{Simulation}} - \mu_{\text{Berechnung}}| \geq \epsilon) = 0 \quad \text{Formel 5-9}$$

Die erwartete Verspätungsdauer muss demnach gleich der berechneten sein, damit das Kriterium der Konvergenz erfüllt ist.

5.3.4. Formulierung der Kostenfunktionen

Die Modellierung der Verspätungskosten ist ein wesentlicher Bestandteil der Bewertung der technischen Zuverlässigkeit. Im folgenden Abschnitt

⁹ Mit Hilfe des LP-Gesetzes konnte nur basierend auf den Erwartungswerten weniger häufig Konvergenz festgestellt werden.

werden daher ausgehend von einer theoretischen Darstellung des Verlaufs von Verspätungskosten die relevanten Kostenfunktionen dargestellt.

5.3.4.1. Theoretische Modellierung der Kostenfunktion

Verspätungskosten haben je nach Dauer eine unterschiedliche Wirkung auf den Gesamtkostenverlauf. Der Zeitraum, über den sich das ungeplante Ereignis erstreckt, determiniert nicht nur den Betrag der Gesamtkosten, sondern auch den Verlauf. So wird der Einfluss einer Verspätung bei kurzen Verspätungen gering sein, da Kostenfaktoren wie Passagierkompensationen oder Ersatzcrews nicht notwendig sind. Es ist jedoch davon auszugehen, dass mit steigender Dauer einer Verspätung der Einfluss verschiedenster Faktoren zunimmt bis zu einem maximalen Punkt, bei dem alle Kostenfaktoren mit maximaler Stärke anfallen. Die Fluggesellschaft hat zu diesem Zeitpunkt bereits Maßnahmen zur Eindämmung der Verspätungseffekte ergriffen. Dies führt daraufhin dazu, dass ab diesem Maximum die Verspätungskosten pro Minute wieder absinken. Die absoluten Kosten dagegen steigen kontinuierlich an. Der theoretische Verlauf der Kosten wurde bisher in Veröffentlichungen oder anderen wissenschaftlichen Beiträgen sehr wenig diskutiert. Mathaisel beispielsweise spricht in Anlehnung an Li und Albert von einem nicht-linearen Kostenverlauf. (vgl. Mathaisel, D., 1996, S.1094-1095), diskutiert diesen jedoch nicht an Hand von Beispielen oder Illustrationen. Der Grund hierfür ist daher vornehmlich in der hohen Abhängigkeit der Kosten von der Unternehmenspolitik der Fluggesellschaft zu suchen bei gleichzeitig sehr hoher Sensitivität der Daten hinter den Kostenfunktionen. Vor diesem Hintergrund wurde in Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts durch die ITA jedoch folgender plausibler Verlauf für Verspätungskosten angenommen: (vgl. ITA, 2000, S.5):

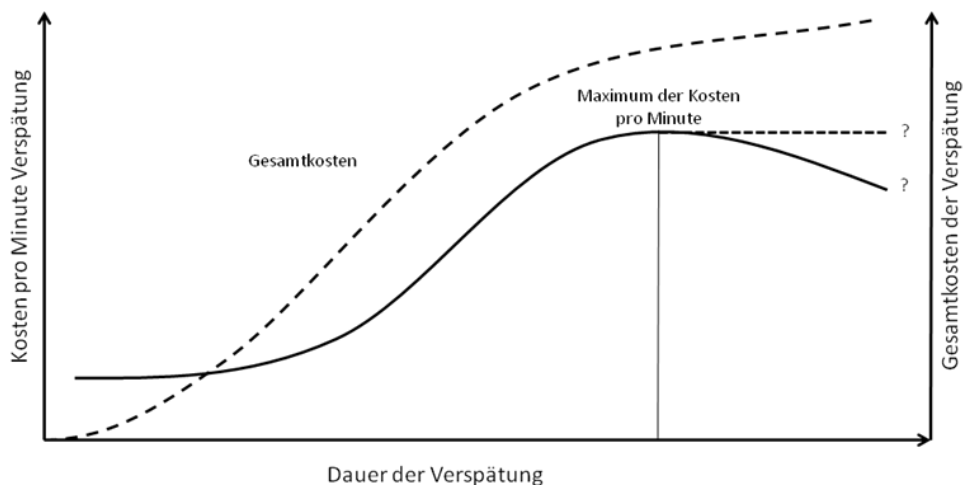


Abbildung 31: Theoretischer Verlauf von Verspätungskosten (vgl. ITA, 2000, S.5-6)

Im Gegensatz zum Verlauf haben sich verschiedene Studien mit dem punktuellen Wert von Verspätungskosten beschäftigt und zumeist Ergebnisse in Form von Kosten pro Minute für kurze, mittlere oder große Verspätungen veröffentlicht. So wird in der Studie der Universität von Westminster (Cook, A., 2004) zwischen einer kurzen (15 Minuten) und langen (65 Minuten) Verspätung unterschieden. Die Studie der ITA (ITA, 2000) entscheidet sich für die Betrachtung der Grenzkosten der Crew und differenziert zwischen einer Verlängerung der Blockzeit von 5% und 10%. Weitere Veröffentlichungen, die bei der Eurocontrol (Eurocontrol 2007) nachzulesen sind, unterscheiden neben kurzen und langen Verspätungen auch noch Verspätungen, die am Boden und in der Luft entstehen. Zusammenfassend ergeben sich hierbei folgende Werte:

	Kurze Verspätung	Lange Verspätung	Verspätung
UK Civil Authority	7 €/min	37 €/min	
IATA			27 €/min
ITA⁽¹⁾			47 €/min (Primär) 33 €/min (Reaktionär)
Westminster			47 €/min (Primär) 31 €/min (Reaktionär)

(1) Die Werte der ITA-Studie betreffen nur die Grenzkosten der Crew

Abbildung 32: Übersicht zu Ergebnissen zu Verspätungskosten (vgl. Eurocontrol, 2007, S.7-8)

Für den weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit werden sowohl der theoretische Verlauf der ITA-Studie als auch die veröffentlichten punktuellen Kostenwerte als Verifizierungsgrundlage in einer Fallstudie in Kapitel 6 verwendet werden.

5.3.4.2. Passagierabhängige Kosten

Die passagierabhängigen Kosten richten sich im Wesentlichen nach der EU Verordnung No. 261/2004, die die Leistungen und Kompensationszahlungen bei Verspätungen und Annullierungen festlegt und drei verschiedene Kompensationszahlungen bzw. Reaktionen der Fluggesellschaft festlegt. §7 regelt hierbei das Recht auf Kompensationen, §8 das Recht auf Rückerstattung des Flugpreises oder auf Umbuchung des Flugs und §9 das Recht auf Versorgung und Obhut wie in Abbildung 33 dargestellt.

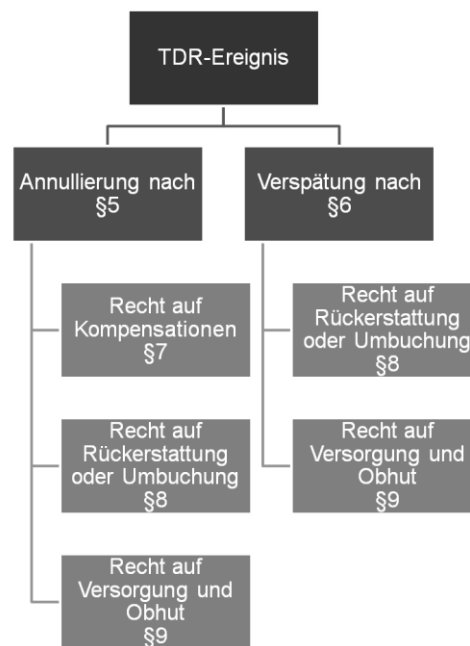


Abbildung 33: Zusammenfassung der verschiedenen Rechte für Passagiere aufgeteilt nach Annullierungen und Verspätungen (s.a. EU, Regulation (EC) No. 261/2004)

Da hierbei zwei unterschiedliche Faktoren zur Anwendung der Paragraphen zum Tragen kommen, ergeben sich für jeden Passagier unterschiedliche Kostenwerte. Der wesentlichste Unterschied zu anderen Kostenfunktionen besteht darin, dass nicht die Verspätung des Flugzeugs die Kompensationszahlungen und Reaktionen bestimmt, sondern die

Verspätung, die der betroffene Passagier erfährt. Zusätzlich wird die Flugstrecke, auf der das Ereignis stattfindet unterschieden.

Die Kostenfunktion C_{Pax} setzt sich daher aus Kompensationszahlungen §9, Rückerstattungen §8 und Versorgungsleistungen §7 zusammen und ist nicht wie andere Kostenfunktionen von der reinen Verspätungsdauer, sondern von der individuellen Verspätung t_i eines Passagiers i abhängig. Die Kosten für einen betroffenen Passagier P_i werden daher wie folgt abgeschätzt:

$$C_{P,i}(t_i) = C_{Kompensation}(t_i) + C_{Rückerstattung}(t_i) + C_{Versorgung}(t_i)$$

Formel 5-10

Die gesamten Kosten über alle betroffenen Passagiere lassen sich daher wie folgt berechnen:

$$C_{Pax} = \sum_{i=1}^n C_{P,i}(t_i)$$

Formel 5-11

Das Recht auf Versorgung und Unterbringung der Passagiere nach §9 regelt, dass je nach Verspätung verschiedene Leistungen durch die Fluggesellschaft vollbracht werden müssen. So sind neben Mahlzeiten und Erfrischungen auch die Unterbringung von Passagieren in Hotels und der Transport zwischen Flughafen und Hotel zu berücksichtigen. Da eine Fluggesellschaft aus organisatorischen Gründen diese Leistungen nach bestimmten Zeitgrenzen ausführen wird, ist anzunehmen, dass als generelle mathematische Form der Funktion eine Treppenfunktion ausreicht. Diese wird entlang der Verspätungsdauer t für den Verspätungsfall folgendermaßen definiert:

$$C_{Versorgung}(t_i) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot l_{Ai}(t)$$

Formel 5-12

$$l_{Ai}(t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn das Intervall gewählt wird} \\ 0 & \end{cases}$$

Im Fall einer Annullierung hängen die Zahlungen nicht von der Verspätungsdauer, sondern von der individuellen Wartezeit auf einen Anschlussflug ab. In der Kostenfunktion muss daher die Verspätungsdauer t durch die individuelle Verspätung t_i ersetzt werden. Für die Berechnung der individuellen Verspätung jedes einzelnen Passagiers müssen der Umsteigeanteil und die Umsteigedauer vorgegeben werden. Zusätzlich zur Umsteigedauer kann die MCT (Minimum Connecting Time) an einem

Flughafen verwendet werden, die Aufschluss zur minimalen Umsteigezeit gibt. Für die individuelle Verspätung eines Passagiers ergibt sich somit folgende Logik:

$$t_i = \begin{cases} t - MCT, & \text{wenn } t - MCT > 0 \\ t_{\text{Anschluss}}, & \text{wenn } t - MCT \leq 0 \end{cases} \quad \text{Formel 5-13}$$

Ist die Differenz zwischen MCT und Verspätung des Fluges größer null, bedeutet dies, dass der Passagier den Anschlussflug noch erreichen kann. Im umgekehrten Fall muss ein Anschlussflug gebucht werden.

Der Werte jedes Schrittes i wird hierbei über den Multiplikator α_i festgelegt, je nachdem ob das betrachtete Intervall A_i über die Entscheidung $I_{A_i}(t)=[0;1]$ berücksichtigt wird. Der Faktor α_i definiert die Höhe der Leistung, die von der Fluggesellschaft festgelegt werden kann. Die Lage der Sprünge wird durch Gierlich et al. in Anlehnung an die allgemeingehaltene EU Verordnung (EU, 2004, §6 und §9) wie folgt definiert (Gierlich et al., 2005, S.78-79):

Tabelle 3: Intervallwerte der Verspätungsfunktion für Passagierkosten

Sprungintervall	Intervallwert
$A_0=[0, \dots, 90]$	$\alpha_0 = 0\text{€}$
$A_1=]90, \dots, 120]$	$\alpha_1 = 10\text{€}$
$A_2=]120, \dots, 180]$	$\alpha_2 = 40\text{€}$
$A_3=]180, \dots, 240]$	$\alpha_3 = 60\text{€}$
$A_4=]240, \dots, 300]$	$\alpha_4 = 100\text{€}$
$A_5=]300, \dots, \infty]$	$\alpha_5 = 150\text{€}$

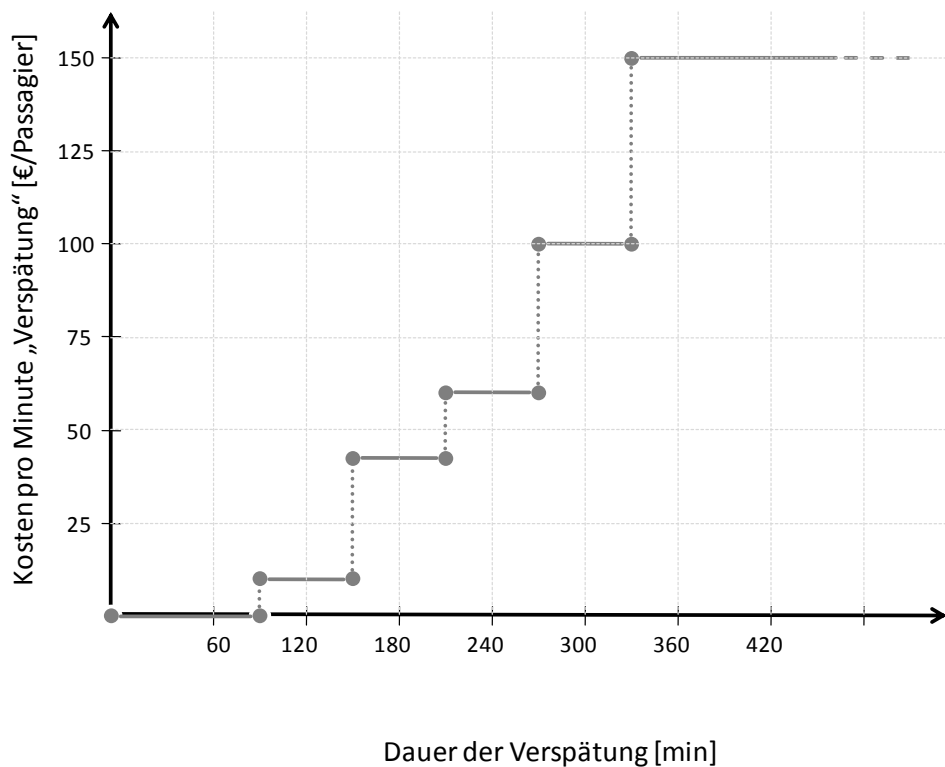


Abbildung 34: Kostenfunktion zur Berechnung der Leistungen nach §9 von Passagieren bei Verspätungen

Im Falle von Annullierungen, die nicht Umständen höherer Gewalt zugerechnet werden können, schlägt die EU folgende Regelung vor (Lufthansa, 2008 und EU, 2004, §5 und §7), die im Gegensatz zu reinen Verspätungen auch abhängig von der Distanz des Fluges ist:

Tabelle 4: Kompensationszahlungen für Annullierungen von Flügen bei „Denied Boardings“ und der Umbuchung auf andere Flüge (EU, 2004, §5 und §7)

	Abweichung von der planmäßigen Ankunftszeit	Entschädigung
0 – 1.500 km	< 2h	€125
	> 2h	€250
1.500 – 3.500km und alle innereuropäischen Flüge	< 3h	€ 200
	> 3h	€400
< 3.500 km	< 4h	€ 300
	> 4h	€ 600

Die Werte der Kostenfunktion müssen daher um den Parameter Distanz wie folgt erhöht werden:

Tabelle 5: Intervallwerte der Annullierungsfunktion für Passagierkosten

Sprungintervall	Intervallwert
$A_0 =]0, \dots, 120]$	$\alpha_0 = 125\text{€}$
$A_1 =]120, \dots, \infty]$	$\alpha_1 = 250\text{€}$
$A_2 =]0, \dots, 180]$	$\alpha_2 = 200\text{€}$
$A_3 =]180, \dots, \infty]$	$\alpha_3 = 400\text{€}$
$A_4 =]0, \dots, 240]$	$\alpha_4 = 300\text{€}$
$A_5 =]240, \dots, \infty]$	$\alpha_5 = 600\text{€}$

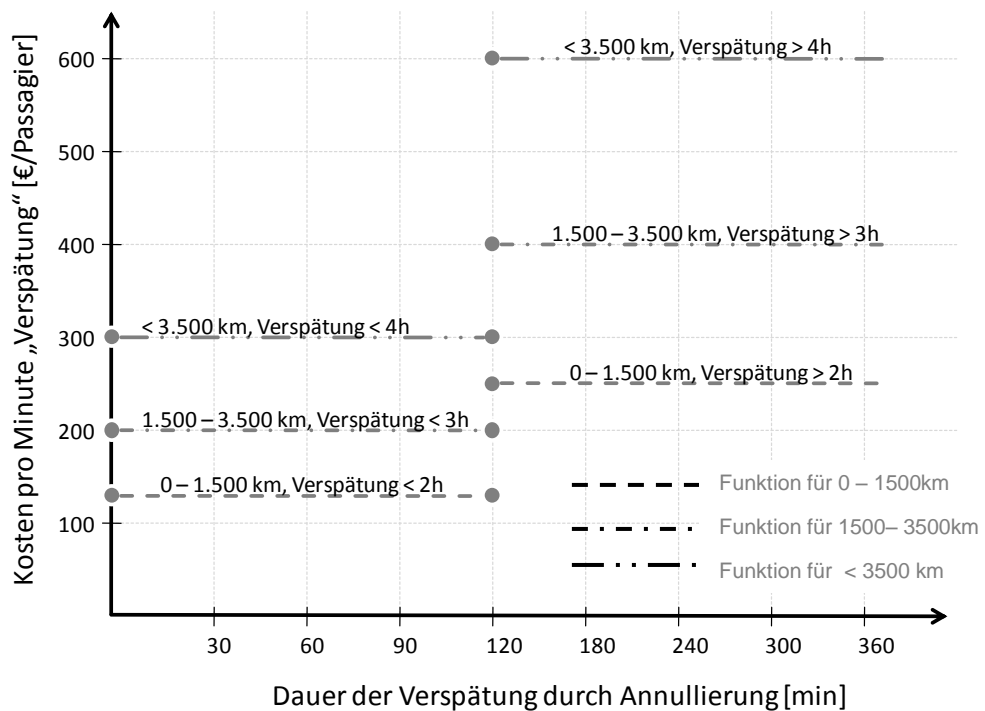


Abbildung 35: Unterschiedliche (nach der Dauer der Verspätung und der Flugstrecke des betroffenen Fluges) Kostenfunktion für Kompensationszahlungen bei Verspätungen durch Annullierungen.¹⁰

¹⁰ Die Verspätung betrifft hierbei die individuelle Verspätung des Passagiers und ist somit zumeist größer als die Verspätung des Fluges.

Da die Kompensationen vor allem von der Unternehmenspolitik einer Fluggesellschaft abhängen, sollten die jeweiligen Eingabeparameter entsprechend gewählt werden. Hierdurch ist auch eine Unterscheidung des Betriebsmodells der Fluggesellschaft gewährleistet.

Neben §7 und §9 müssen, wie in Abbildung 33 gezeigt, zusätzlich entweder der Ticketpreis erstattet werden oder eine Umbuchung durchgeführt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden diese nicht durch eine eigene Funktion abgeschätzt sondern durch den allgemein Wert der ITA-Studie von 0,07 €/h bezogen auf die anfallende Verspätung des Fluges berechnet (ITA, 2000,S.38), denn eine Modellierung des Umsteigeverhaltens soll nicht Gegenstand der vorliegenden Studie sein. Hierzu müssten Umbuchungen auf einen anderen Flug innerhalb der eigenen Fluggesellschaft bedacht werden. Stehen hierbei keine Verbindungen zur Verfügung müsste die Suche auf Allianzpartner ausgeweitet werden. Nur in sehr wenigen Fällen wird hierbei auf andere Fluggesellschaften ausgewichen werden, deren Ticketpreis mit dem IATA Standard Tarif verrechnet wird. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass statt des Ticketpreises ein Gutschein ausgegeben wird, der aus Sicht der Fluggesellschaft dazu führt, dass der getätigte Umsatz durch den Passagier im Unternehmen bleibt und nicht zurückgezahlt werden muss.

5.3.4.3. Kosten aus dem Betrieb des Flugzeugs

Durch die Standzeit des Flugzeugs am Boden entweder an der Abstellposition am Gate oder auf dem Vorfeld entstehen Kosten aus dem Betrieb des Flugzeugs. Grundsätzlich können die so genannten direkten Betriebskosten in fünf Hauptkategorien unterteilt werden: Wartungskosten, Personalkosten, Treibstoffkosten, Flughafen- und ATC-Gebühren und Kapitalkosten wie Abschreibungen und Renten für Versicherungen. Im Falle einer technischen Störung, der am Boden detektiert wird, fallen nur Treibstoffkosten und Flughafengebühren an, die im Folgenden behandelt werden. Zusätzliche Personalkosten werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, sondern in Kapitel 5.3.4.6 detailliert dargestellt. Dies liegt darin begründet, dass der Anteil an zusätzlichen Personalkosten bei Verspätungen nicht durch den Betrieb des Flugzeugs anfällt, sondern auf der tariflich festgesetzten maximalen Arbeitszeit begründet liegt.

Die Funktion für Kosten aus dem Betrieb des Flugzeugs sieht daher wie folgt aus:

$$C_{\text{Betrieb}} = C_F(t) + C_{\text{GPU}}(t) + C_{\text{Park}}(t) \quad \text{Formel 5-14}$$

Während der Standzeit des Flugzeugs am Boden werden die notwendigen Systeme entweder über die flugzeuginterne **APU** (Auxiliary Power Unit) oder über eine **GPU**¹¹ (Ground Power Unit) der Flughafeninfrastruktur betrieben¹². Der Betrieb der APU hängt vor allem von der Außentemperatur ab. So wird diese ab 6° zum Heizen und über 12° zur Kühlung des Flugzeugs genutzt. Der Einsatz der APU oder der GPU zur Erzeugung von Strom hängt hier jeweils von der vorhandenen Infrastruktur und der Unternehmenspolitik der Fluggesellschaft ab.

Die Kosten für den Betrieb der APU hängen vor allem vom Treibstoffverbrauch FF linear und dem Treibstoffpreis C_{Fuel} ab. Die korrespondierende Funktion wird daher wie folgt formuliert:

$$C_F(t) = FF \cdot C_{Fuel} \cdot t \quad \text{Formel 5-15}$$

Für die vorliegende Studie wurde ein aktueller Treibstoffpreis von $C_{Fuel} = 208$ Cents / Gallon (Energy Information Administration, 2008)) gewählt und ein durchschnittlicher Verbrauch einer typischen APU von 105,15 kg/h (siehe auch Fleuti, E., Hofman, P, 2005, S.12).

¹¹ Die GPU wird zumeist nur an Außenpositionen für die Stromerzeugung verwendet.

¹² Eine Ausnahme stellen hierbei sicherlich die Flughäfen Zürich, Genf und Hamburg dar, bei denen die Kühlung und Beheizung der Flugzeuge über ein Ground Power Support System (GPSS) geschieht, um die Emissionen durch APU und GPU (zumeist Dieselmotoren) einzugrenzen.

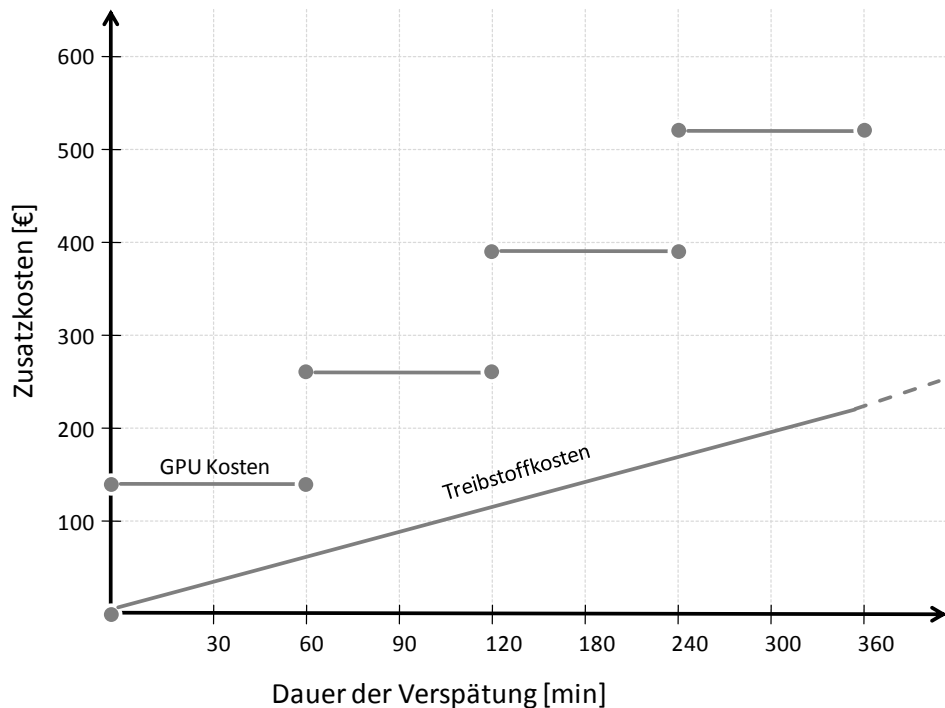


Abbildung 36: Treibstoffkosten und Kosten für die Nutzung der GPU

Durch die Standzeit des Flugzeugs am Boden werden **Gebühren für die Nutzung der Infrastruktur** des Flughafens fällig. Diese sind ebenfalls bei der Berechnung von Zusatzkosten durch Verspätungen zu beachten. Der Verbrauch der GPU kann hierbei linear oder stundenbasiert abgerechnet werden. Im vorliegenden Fall wird von einer stundenbasierten Abrechnung ausgegangen, die wie folgt definiert ist:

$$C_{GPU}(t) = \sum_{i=0}^n \alpha \cdot l_{Ai}(t) \quad \text{Formel 5-16}$$

Der Faktor α legt wiederum die Kosten pro Intervall l_{Ai} fest. Basierend auf der Studie von Gierlich et al. (Gierlich et al., 2005, S. 72) wird die Steigung der Funktion mit $\alpha = \text{€}130$ festgelegt, wobei die Länge des Zeitintervalls eine Stunde beträgt.

Die Flughafengebühren setzen sich aus den Gebühren für Starts und Landungen, die zumeist abhängig vom Gewicht des Flugzeugs berechnet werden (vgl. Commission for Aviation Regulation, 2008), Gebühren für das Abstellen bzw. Parken des Flugzeugs auf dem Vorfeld oder am Gate und Gebühren für die Abfertigung der Passagiere zusammen. Da sich die vorliegende Arbeit mit Verspätungen aus technischen Gründen beschäftigt,

können sowohl zusätzliche Lande- und Startgebühren als auch Passagierbezogene Gebühren ausgeschlossen werden. Beide Kostenanteile sind weitestgehend unabhängig von einem technischen Defekt und fallen grundsätzlich immer an. Gebühren für Standzeiten am Flughafen jedoch sind abhängig von der Zeitdauer bzw. dem Überschreiten eines Zeitlimits. Auf Basis einer Studie (s.a. Gierlich et al., 2005, S.38, Trautmann, 2008, Vorlesung 4, S.48, BAA Heathrow, 2007, S.16, Fraport, 2006, S.13-14, IATA, 2001) zu den Flughäfen LHR, MUC und FRA wurde für Hub-Flughäfen folgende Kostenfunktion aufgestellt:

$$C_{Park}(t) = \alpha_p \cdot t + 65,2 \quad \text{Formel 5-17}$$

Der Faktor $\alpha_p=46,7$ beschreibt hierbei die Steigung der linearen Funktion. Für alle anderen Flughäfen wird ein Mittelwert von €60 unabhängig zur Verspätungsdauer verwendet.

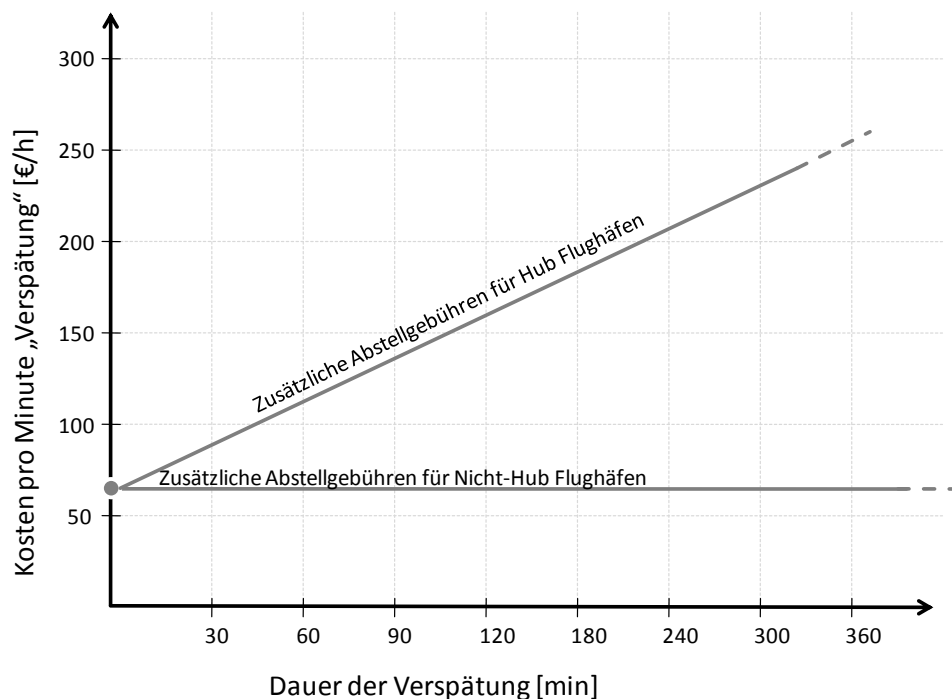


Abbildung 37: Zusätzliche Kosten für Abstellpositionen an Flughäfen

5.3.4.4. Wartungskosten

Werden bei einer typischen regulären Wartungscheck technische Defekte entdeckt, besteht besonders an Hubs die Möglichkeit über das vertragliche Wartungsunternehmen zertifiziertes Personal anzufordern. Diese Wartungsarbeiten auf Standby-Basis wird „On-Call Maintenance“ genannt

und wird über eine Pauschale abgegolten, die Arbeitsstunden und Personal abdeckt. Da dies ein einmaliges Ereignis ist, können die Kosten als Konstante pro Ereignis hinzugefügt werden. Nach Gierlich et al. (s.a. Gierlich et al., 2005, S. 73) können einmalige Kosten durch „On-Call Maintenance“ von €370 angenommen werden.

$$C_{On-Call} = Konst. = 370 \quad \text{Formel 5-18}$$

Hierzu müssen die anfallenden Materialkosten für das ausgefallene System berechnet werden.

$$C_{Material} = Konst. \quad \text{Formel 5-19}$$

Die gesamten Kosten für die ungeplante Wartung berechnen sich somit wie folgt:

$$C_{Wartung} = C_{Material} + C_{On-Call} \quad \text{Formel 5-20}$$

5.3.4.5. Opportunitätskosten

Opportunitätskosten beschreiben die Quantifizierung von entgangenem Nutzen, den man bei alternativer Verwendung von Gütern hätte erzielen können. „Opportunitätskosten sind somit eine Vergleichsgröße für den entgangenen Gewinn, Ertrag oder Nutzen aus der besten der nicht gewählten Alternativen.“ (Meyers Lexikon Online, 2008). Für Fluggesellschaften ergeben sich zwei Faktoren für Opportunitätskosten. Einerseits entsteht durch Störungen ein Imageschaden, der zu Umsatzverlusten führen kann und andererseits sinkt die Produktivität jedes Flugzeugs.

Verspätungen und Annullierungen können zu einem **Imageverlust** der betroffenen Fluggesellschaft führen. Dieser wiederum hat zur Folge, dass sich Passagiere bei der Wahl der nächsten Flugreise möglicherweise für eine andere Fluggesellschaft entscheiden. Der Imageverlust durch eine Verspätung kann hierbei dem Nutzenverlust des Passagiers gleichgesetzt werden. Dieser persönliche Nutzen setzt sich nach Hess et al. (vgl. Hess et al., 2007, S.224) aus einer Vielzahl von Faktoren zusammen. Hierzu zählen Informationen zu Vielfliegerprogrammen, die Anzahl der Zwischenstopps bei einem Flug, der Flugzeugtyp, persönliche Präferenzen, subjektive Empfindungen und auch die Pünktlichkeit (eng. OTP = On-Time Performance) der Fluggesellschaft. Letztere wird als die Relation von verspäteten zu nicht-verspäteten Flügen verstanden. Verändert sich nun

die Pünktlichkeit durch eine Verspätung sinkt auch der Nutzen und somit das Image der Fluggesellschaft. Da weder der Nutzen noch die Pünktlichkeit direkt monetär bewertet werden können, wird stattdessen das Nutzenpotenzial über die Preissensitivität berechnet. Das Modell von Hess et al. (vgl. Hess et al., 2007, S.224-225) sagt aus, dass der Gesamtnutzen eine Summe von Teilnutzen ist. Ändert sich nun ein ceteris paribus ein Teilnutzen, so kann daraus auf die Änderung des Gesamtnutzens geschlossen werden.

$$U = U_{\text{Pünktlichkeit}} + U_{\text{Preis}} + \dots \quad \text{Formel 5-21}$$

Der Nutzen aus der Pünktlichkeit OTP und dem Flugpreis berechnet sich wie folgt (vgl. Hess et al., 2007, S. 225):

$$U = \beta_{\text{OTP}} \cdot \text{OTP}^{\gamma_{\text{OTP}}} + \beta_{\text{Ticket}} \cdot \left(\frac{\text{Einkommen}}{\text{mittleres Einkommen}} \right)^{\gamma_{\text{Ticket}}} \cdot P_{\text{Ticket}}$$

Formel 5-22

Setzt man nun die Nutzenänderung durch den Ticketpreis gleich der Nutzenänderung durch OTP ergibt sich folgende Gleichung:

$$\Delta U = \beta_{\text{OTP}} \cdot \Delta \text{OTP}^{\gamma_{\text{OTP}}} = \beta_{\text{Ticket}} \cdot \left(\frac{\text{Einkommen}}{\text{mittleres Einkommen}} \right)^{\gamma_{\text{Ticket}}} \cdot \Delta P_{\text{Ticket}}$$

$$\Delta P_{\text{Ticket}} = \frac{\left(\frac{\beta_{\text{OTP}}}{\beta_{\text{Ticket}}} \cdot \Delta \text{OTP}^{\gamma_{\text{OTP}}} \right)}{\left(\frac{\text{Einkommen}}{\text{mittleres Einkommen}} \right)^{\gamma_{\text{Ticket}}}}$$

Als Ergebnis erhält man die Aussage, welchen monetären Wert eine Änderung der OTP hat. Jede Änderung der Pünktlichkeit OPT resultiert damit in einer Änderung des Ticketpreises, den die Passagiere für die Erhaltung ihres subjektiven Nutzens zahlen würden. Der gesamte Verlust an Umsatz durch Nutzenverlust der Passagiere berechnet sich über die Anzahl der verspäteten Passagiere:

$$C_{\text{Imageverlust}} = P_{\text{axVerspätung}} \cdot \Delta P_{\text{Ticket}} \quad \text{Formel 5-23}$$

Neben dem Imageverlust bedeutet auch jede zeitliche Verschiebung eines Fluges eine Einbuße an Produktivität für die Fluggesellschaft, die direkt über die Frequenzen pro Tag eines Flugzeugs gemessen werden kann. Hierbei gilt folgender Grundsatz: je mehr Frequenzen pro Tag geflogen werden, desto höher ist das Umsatzpotenzial des betreffenden Flugzeugs. Verspätungen oder Annullierungen führen in erster Linie dazu, dass die

tägliche Nutzung des Flugzeugs - die so genannten Utilisation – sinkt und somit auch die Anzahl der möglichen Frequenzen pro Tag. Schlussendlich wird dadurch die Produktivität des Flugzeugs und somit das Umsatzpotenzial der Fluggesellschaft reduziert. Der Zusammenhang zwischen Utilisation und Produktivität wird über die durchschnittliche Blockzeit hergestellt:

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Utilisation}}{\text{Blockzeit}} = \text{Anzahl an täglichen Frequenzen}$$

Die Bewertung der Produktivität wird an dieser Stelle nicht monetär, sondern nur qualitativ geschehen. Hierzu werden in der Fallstudie in Kapitel 6 die generellen Konsequenzen aus einer Produktivitätsänderung geschildert.

5.3.4.6. Kosten durch das Personal in der Luft und am Boden

Verspätungen führen dazu, dass die Arbeitszeit des Personals sowohl an Bord des Flugzeugs als auch am Boden verlängert werden muss. Hierzu zählen Personalkosten durch die Crew des Flugzeugs (Kabinencrew und Cockpitcrew) und der Bodenabfertigung. Die Kostenfunktion für das Personal in der Luft und am Boden setzt sich somit aus zwei Summanden zusammen:

$$C_{\text{Personal}}(t) = C_{\text{Crew}}(t) + C_{\text{Boden}}(t) \quad \text{Formel 5-24}$$

Die Studie der Universität Westminster zeigt für die Kosten der Bodenabfertigung, dass diese nur in sehr seltenen Fällen anfallen. Dies ist der Fall, wenn die Verspätungen dazu führen, dass der Schichtbetrieb des Bodenabfertigungsunternehmens gestört wird (Cook, A., 2004, S.48). In diesem Fall werden ab einer Verspätung von einer Stunde zusätzlich den Abfertigungsgebühren 10-15% aufgeschlagen. Die Kosten für die Bodenabfertigung können nach der AEA Methode wie folgt über den Zusammenhang der Masse der Nutzlast m_{Nutzlast} und der Reichweite s_{Block} abgeschätzt werden (Böck et al., 2008, S.56):

$$C_{\text{Boden,Basis}} = \frac{100 \cdot m_{\text{Nutzlast}} [\text{t}]}{s_{\text{Block}} [\text{km}]} \quad \text{Formel 5-25}$$

Die Zusatzkosten ab einer Stunde Verspätung berechnen sich daher wie folgt:

$$C_{\text{Boden}} = C_{\text{Boden,Basis}} \cdot 1,15 \quad \text{Formel 5-26}$$

Die vertraglichen Rahmenbedingungen des Kabinen- und Cockpitpersonal in Verbindung mit der gesetzlich festgelegten maximalen Arbeitszeit legen die Höhe der anfallenden Zusatzkosten fest. Die Luftverkehrsordnung in Deutschland regelt beispielsweise den täglichen Flugdienst bei 10 Stunden ab (vgl. Schmidt, E., 2000, S.75 und §8 und §9 LBA, 2008). Diese kann durch den Tarifvertrag, den Fluggesellschaft mit den Arbeitnehmern abschließt reduziert werden, oder unter Einhaltung von weiteren gesetzlichen Vorschriften erweitert werden. So beträgt die maximale Arbeitszeit pro Kalenderjahr 2000 Stunden (§8, Abs. (1) DVLuftBO) oder innerhalb von 30 aufeinanderfolgenden Tagen 210 Stunden (vgl. Schmidt, E., 2000, S.75).

Die Modellierung der Kostenfunktion setzt sich somit aus zwei kombinierbaren Faktoren zusammen: einerseits einer linearen stundenabhängigen Kostenfunktion der Personalkosten und einem Grenzwert, der die Überschreitung der maximalen Arbeitszeit anzeigt. Im vorliegenden Fall wird von einer maximalen Arbeitszeit von 10 Stunden ausgegangen, die abhängig von der Utilisation des Flugzeugs gemessen werden kann. Da keine Crew-Umläufe in der vorliegenden Arbeit hinterlegt sind, muss der Zeitpunkt der Überschreitung des Limits während der Simulation empirisch bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird folgende Regel aufgestellt: "Überschreitet die Utilisation als Maßzahl für die Arbeitszeit der Besatzung durch Verspätungen oder Annullierungen 10 Stunden, so wird eine Ersatzcrew notwendig". Da die Einplanung von Ersatzcrews unter strategische Kosten fällt, entstehen die weiteren zusätzlichen Kosten wiederum durch die Arbeitszeit. Die Funktion für die Berechnung der Personalkosten sieht daher wie folgt aus:

$$C_{Crew}(t) = \frac{C_{Gehalt}}{\text{Flugstunden pro Jahr}} \cdot N_{Crew} \cdot t \quad \text{Formel 5-27}$$

Die Personalkosten pro Stunden werden aus dem Quotient des Jahresgehalts C_{Gehalt} und den Flugstunden pro Jahr errechnet. Diese Funktion wird getrennt für die Kabinen- und Cockpitcrew aufgestellt und beinhaltet die Anzahl der relevanten Crew-Mitglieder N_{Crew} . In Anlehnung an Gierlich et al. (Gierlich et al., 2005, S.76) wurden folgende Parameter gewählt:

Tabelle 6: Eingabeparameter für die Berechnung zusätzlicher Personalkosten

Flugstunden pro Jahr in der Kabine	800
---	-----

Flugstunden pro Jahr im Cockpit	750
Jahresgehalt Kabine	€80.000
Jahresgehalt Cockpit	€130.000

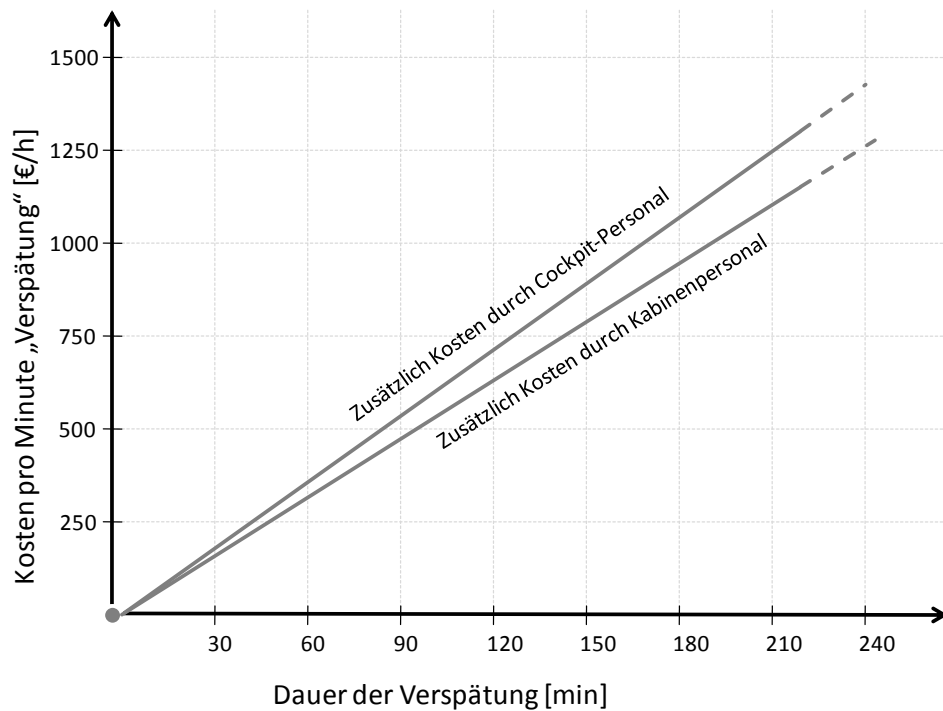


Abbildung 38: Zusatzkosten durch Kabinen und Cockpitpersonal

5.3.4.7. Zusammenfassung

Zusammenfassend werden für Verspätungen und Annullierungen folgende Kosten abgedeckt:

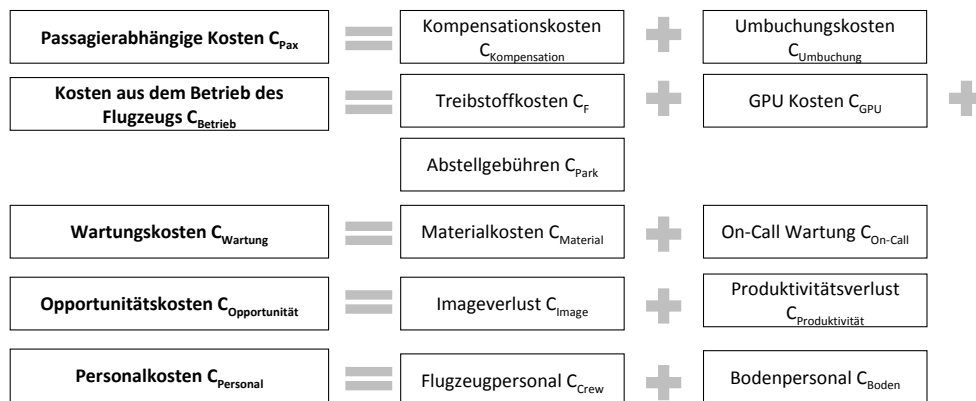


Abbildung 39: Modellierte Kosten für Verspätungen und Annullierungen

Das Ziel der Modellierung besteht darin alle Kosten als Funktion der Verspätungsdauer vorzusehen.

5.3.5. Modellierung der Recovery Strategien

Die Modellierung der Recovery-Strategien bildet das zweite Fundament der Bewertungsmethodik. Durch diese wird die Anzahl der Auswahlmöglichkeiten entwickelt und für das dritte Fundament – die Entscheidungsfindung – bereitgestellt.

5.3.5.1. Mathematisches Modell

Das mathematische Modell, das der Modellierung der Recovery Strategien zugrundeliegt, basiert auf dem Optimierungsgedanken in einem gerichteten Graphen. Der Flugplan wird in der vorliegenden Arbeit als zeitlich gerichteter Graph verstanden, indem jede Bewegung eines Flugzeugs als Pfeil und jeder Aufenthalt an einem Flughafen als Knoten dargestellt werden kann. Dieses System von Knoten und Pfeilen wird für den betrachteten Zeitraum entlang einer Zeitachse entwickelt. In Anlehnung an die Formulierung von Arguello et al. (Arguello et al., 1997, S.215) wird daher für die Lösung des Recovery-Problem folgendes mathematisches Modell verwendet, das es zu lösen gilt:

Tabelle 7: Indices und Mengen des mathematischen Modells

Verwendete Indices:	Mengen
i = Flug	F = Menge aller Flüge
j = Index einer Flugzeugroute	P = Menge aller gültigen Routen
k = Flugzeugindex	Q = Menge der verfügbaren Flugzeuge
t = Flughafenindex	S = Menge der Flughäfen

Tabelle 8: Binäre Entscheidungsparameter

Binäre Entscheidungsparameter	
a_{ij}	1 wenn Flug i Element der Route j ist, ansonsten 0
b_{ij}	1 wenn die Rotation j am Flughafen t endet, ansonsten 0
c_i	Kosten für die Annullierung von Flug i
d_j^k	Kosten für die Zuordnung von Flugzeug k zu Rotation j (beinhaltet auch Verspätungskosten)
h_t	Anzahl der Flugzeuge, die am Flughafen t den Umlauf beenden

Tabelle 9: Variablen

Variable	
x_j^k	Zuordnung von Flugzeug k zu Rotation j
y_i	Zuordnung einer Annullierung zu Flug i

Tabelle 10: Mathematisches Modell

Mathematisches Modell		
Zielfunktion:	$\sum_{k \in Q} \sum_{j \in P} d_j^k x_j^k + \sum_{i \in F} c_i y_i$	(1)
Abdeckung aller Flüge	$\sum_{k \in Q} \sum_{j \in P} a_{ij} x_j^k + y_i = 1 \quad \forall i \in F$	(2)
Sicherstellen der Endpunkte der Rotation	$\sum_{k \in Q} \sum_{j \in P} b_{tj} x_j^k = h_t \quad \forall t \in S$	(3)
Sicherstellen der Flugzuordnung	$\sum_{k \in Q} x_j^k = 1 \quad \forall j \in P$	(4)
Binäre Flugzeugzuordnung	$x_j^k \in \{0,1\} \quad \forall j \in P, k \in Q$	(5)
Binäre Annullierung	$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in F$	(6)

Die Zielfunktion (1) minimiert in diesem Modell die Kosten aus der Zuordnung der Flugzeuge zu Flügen in Kombination zu den Kosten durch Annullierung der Flüge. Die Einführung des zweiten Term $c_i y_i$ ist hierbei notwendig, um die Veränderung der Graphen durch eine Annullierung zu

integrieren. Alle weiteren Gleichungen (2)-(6) bilden Randbedingungen zur Einschränkung des Lösungsraums ab.

Die Lösung dieses Modells kann nun über zwei Möglichkeiten geschehen: mit Hilfe exakter Optimierungsverfahren oder Heuristiken. Erstere führen besonders durch die Integration des Modells in die Monte-Carlo Simulation zu sehr langen Laufzeiten durch die exponentielle Größe der Anzahl der zu überprüfenden Lösungen (siehe hierzu die Diskussion verschiedener Lösungsalgorithmen in Kapitel 2.1.2).

Im vorliegenden Fall wird daher mit Hilfe einer Heuristik die Laufzeit der Lösungsfindung verkürzt, wodurch jedoch auch die Qualität der Lösung eingeschränkt wird. Als Lösungsalgorithmus wird eine Variation des GRASP-Algorithmus verwendet, der sich vor allem durch die Integration verschiedener Reaktionsmöglichkeiten auszeichnet in Verbindung mit einer hohen Effizienz hinsichtlich der Lösungsdauer.

5.3.5.2. Konsequenzanalyse der Prozesskette „Verspätung“

Ein wesentlicher Teil nach der Einführung von stochastischen Elementen in die Monte-Carlo Simulation besteht in der Modellierung eines Maßnahmenkatalogs, mit dem eine Fluggesellschaft den Folgen von technischen Störungen entgegenwirken kann. Die Entscheidung, welche Strategie verfolgt wird und welche Konsequenzen daraus resultieren, steht hierbei am Ende einer Prozesskette, die im Folgenden beschrieben wird. Diese beginnt mit einem Zufallselement, das die Entscheidung trifft, ob es überhaupt zu einer Störung im System kommt. Ist dies der Fall, wird durch ein weiteres Zufallselement die Länge der Verspätung durch den technischen Defekt bestimmt. Ab diesem Zeitpunkt kann die Fluggesellschaft aktiv in die Geschehnisse eingreifen. Durch gezielte taktische Entscheidungen werden Flüge verspätet oder annulliert, um den Gesamteffekt auf das Streckennetz zu minimieren. Die Konsequenzanalyse trifft hierbei die Entscheidung, welche Strategie die „beste“ für die Fluggesellschaft ist. Abbildung 40 fasst diesen Prozess zusammen.

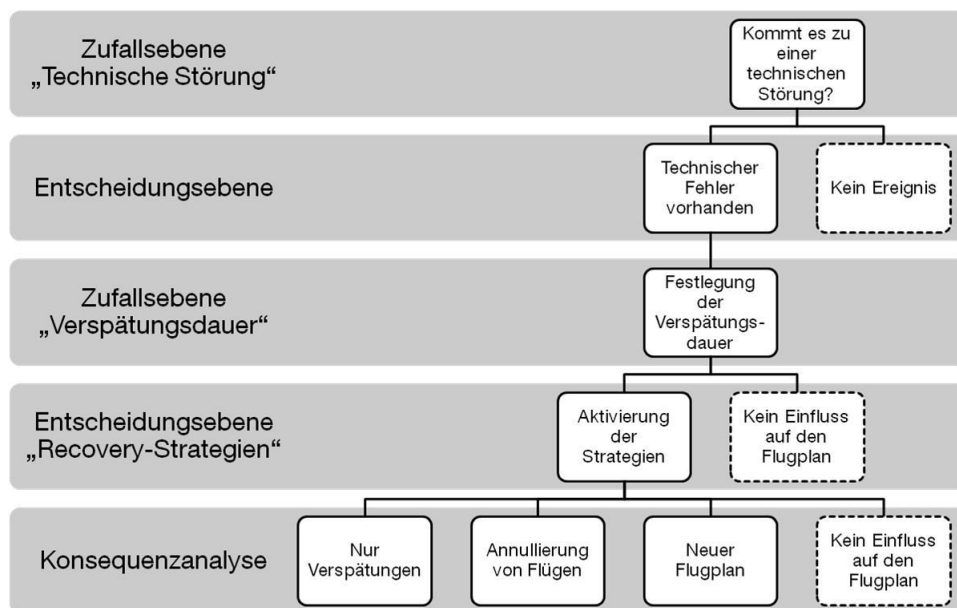


Abbildung 40: Zusammenhang zwischen Zufallsereignissen und Recovery-Strategien einer Fluggesellschaft.¹³

Im Rahmen der Entscheidungsebene „Recovery-Strategien“ (siehe Kapitel 2.2.5) werden alle Optionen, die in die Simulation implementiert sind, überprüft und miteinander auf Basis der entstehenden Zusatzkosten verglichen. Grundsätzlich muss hierbei zwischen zwei verschiedenen Strategietypen unterschieden werden;

auf der einen Seite ist nur der Flugzeugumlauf des defekten Flugzeugs von Veränderungen betroffen. Diese Single-Umlauf-Strategie stellt eine einfache und schnelle Möglichkeit dar die Störung zu beheben. Auf der anderen Seite können durch die Bildung von neuen Rotationen jedoch alle Flugzeuge der Flotte betroffen werden. Dieser Ansatz entspricht dem ganzheitlichen Optimierungsgedanken, der die Wirkung eines Ereignisses auf das gesamte Netzwerk minimieren will. Multi-Umlauf Strategien besitzen daher ein größeres Potential zur Reduktion von Verspätungen und Annullierung wenn gleich wesentlich komplexer als Single-Umlauf Strategien.

¹³ Gezeigt ist der Prozessverlauf der Simulation beginnend bei der Zufallsebene „technische Störung“, die das Zustandekommen einer Störung festlegt, bis hin zur Konsequenzanalyse, die die Reaktion der Fluggesellschaft bestimmt.

Folgende Maßnahmen werden dagegen nicht oder nur als Folgeerscheinung umgesetzt: die Umleitungen zu anderen Flugzeugen, die Bereitstellung von Ersatzflugzeugen und operative Maßnahmen werden nicht berücksichtigt. Die Durchführung von Leerflügen zu anderen Destinationen wird hierbei nicht als alleinstehende Entscheidung modelliert, sondern geht als Kostenblock in die Bewertung ein. Hierzu werden alle Recovery-Szenarien am Ende der Generierungsphase bewertet und alle Rotationen, die nicht am ursprünglich geplanten Flughafen enden, werden mittels eines fiktiven Leerfluges zur richtigen Destination weitergeleitet. Für diesen Leerflug werden die vollen DOC berechnet, was in nahezu 100% der Fälle dazu führt, dass das Szenario für die weitere Berechnung nicht mehr berücksichtigt werden kann. Der Grund hierfür liegt in den hohen Kosten, die durch den Leerflug entstehen, die im Verhältnis zu den Zusatzkosten überwiegen. Umleitungen von Flugzeugen geschehen zumeist wetterbedingt. Operative Maßnahmen, wie eine Erhöhung der Reisegeschwindigkeit, führen gerade auf der Kurzstrecke zu keinen nennenswerten Zeitersparnissen und müssen daher nicht berücksichtigt werden.

Je nach Strategie fallen unterschiedliche Kostenfaktoren an, die bei der Analyse der Konsequenzen zu beachten sind. In der vorliegenden Arbeit sind hierbei folgende drei Haupt-Recovery-Strategien implementiert: Pushback, Annullierung von einzelnen Flügen und die Bildung von neuen Rotationen.

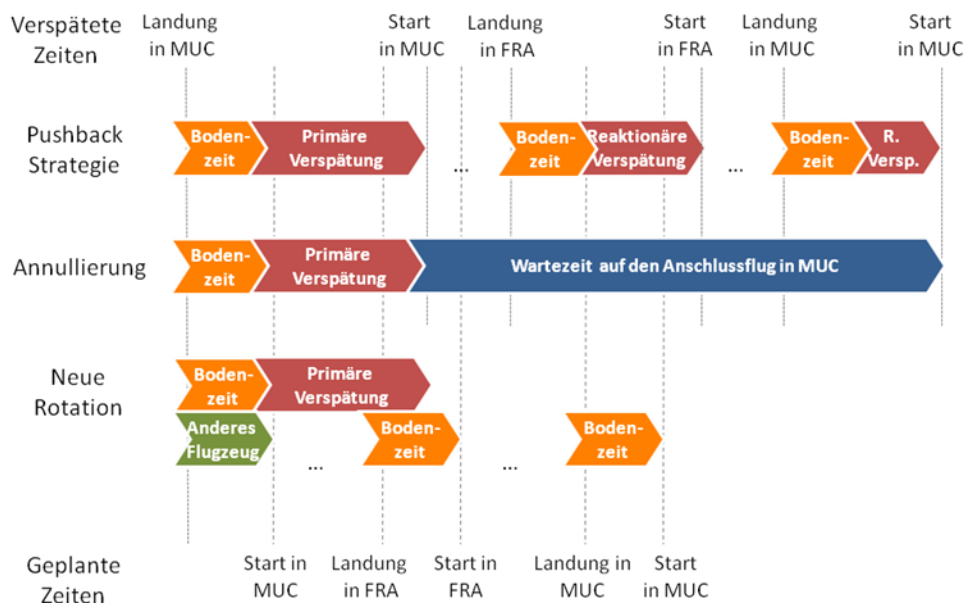


Abbildung 41: Übersicht zu den drei Grundtypen der Recovery Strategien¹⁴

Die **Push-Back Strategie** verändert die geplante Abflugzeit und die Verfügbarkeit des defekten Flugzeugs. Hierdurch wird wie in Abbildung 41 ersichtlich die Dauer der Verspätung als primärer Anteil direkt in das System „Flugplan“ induziert. Sowohl die Startzeit des Flugzeugs als auch die Verfügbarkeit des Flugzeugs werden um die Dauer des TDR-Ereignisses in einem ersten Schritt verschoben. Hierbei gilt es jedoch zwei unterschiedliche Reaktionen und Auswirkungen auf den weiteren Ablauf des Flugplans zu unterscheiden, die bei der Push-Back Strategie vom Zeitpuffer zwischen Turn-Around und Abflugzeit abhängen. Dieser kann die technisch-bedingte Verspätung im Verlauf der Rotation kompensieren und so zu einem ungestörten Flugbetrieb führen. In Folge kommt es zu primären oder reaktionären Verspätungen für den betroffenen Umlauf. Diese Strategie stellt die einfachste Form der Recovery-Form dar, da keine

¹⁴ Übersicht zur Behebung von technischen Störungen am Beispiel der Rotation MUC-FRA-MUC. Hierzu wird ausgehend von den beschriebenen drei Grundtypen der Effekt auf die Rotation MUC-FRA-MUC dargestellt: **Pushback Strategie:** Die Rotation wird um die primäre Verspätung verschoben, so dass alle nachgelagerten Flüge ebenfalls verspätete werden. Die ursprüngliche Rotation MUC-FRA-MUC bleibt erhalten. **Annullierung Strategie:** Alle Folgeflüge werden gestrichen. Der Flug von MUC nach FRA wird gestrichen. **Neue Rotation:** Mit Hilfe eines anderen Flugzeugs wird die ursprüngliche Rotation fortgesetzt. Die ursprüngliche Rotation MUC-FRA-MUC bleibt erhalten, wird aber von einem Flugzeug durchgeführt.

anderen Rotationen verändert werden müssen. Die Konsequenzen dieser Strategie hängen jedoch nur von der vorhandenen Robustheit des Flugplans gegenüber Störungen ab. Ist diese sehr gering (d.h: sind nahezu keine Pufferzeiten in die Rotation integriert), kann die technisch-bedingte Verspätung fast nicht kompensiert werden. In Folge treten hohe direkte Kosten auf, die sich durch den Schneeballeffekt der reaktionären Verspätungen potenzieren können. Die Gesamtkosten für die Push-Back Strategie bei einer Verspätungsdauer t_0 berechnen sich daher wie folgt:

$$C_{Push-Back}(t) = C_{Primär}(t_0) + \sum_{i=1}^n C_{Reaktionär}(t_i) \quad \text{Formel 5-28}$$

$$C_{Primär}(t_0) = C_{Pax}(t_{Pax}) + C_{Betrieb}(t_0) + C_{Wartung} + C_{Personal}(t_0) + C_{Opportunität}$$

$$C_{Reaktionär}(t_i) = C_{Pax}(t_{Pax}) + C_{Betrieb}(t_i) + C_{Personal}(t_i) + C_{Opportunität}$$

Ein weiterer Effekt, der die Nutzung der Push-Back Strategie einschränkt, sind die Nachflugbedingungen, die für jedes Szenario überprüft werden. Durch die zeitliche Verschiebung der Rotationselemente nach hinten, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass der letzte Flug in das Nachflugverbot geschoben wird. Die Konsequenz dieser Verschiebung besteht in der Verletzung der Nebenbedingung „Nachflugverbot“ und dem Ausschluss aus der weiteren Betrachtung. Die größte Vorteil dieser Strategie liegt in der einfachen Verschiebung der Elemente, durch die eine Verletzung der Nebenbedingung „Start und Endpunkt der Rotation“ nie verletzt werden kann.

Für die Modellierung der **Annullierungs-Strategie** werden nach dem Konzept von Rosenberger (s.a. Rosenberger et al., 2002, S.364-370) Annullierungsumläufe generiert. Diese kennzeichnet sich durch identische Start- und Endpunkte aus, wie Abbildung 42 dargestellt.

	Start- Flughafen	Ziel- Flughafen	Annullierungsumlauf	
Flug 1	AAA	BBB	AAA - BBB	AAA - BBB
Flug 2	BBB	CCC	1	BBB - CCC
Flug 3	CCC	AAA		2
Flug 4	AAA	CCC		
Flug 5	CCC	BBB		CCC - BBB
Flug 6	BBB	AAA	BBB - AAA	BBB - AAA

Abbildung 42: Exemplarische Darstellung zweier Annullierungsumläufe in einer Rotation mit 6 Flugverbindungen.¹⁵

Die gezeigte Rotation verbindet die Flughäfen AAA, BBB und CCC über 6 Verbindungen. Durch die gezielte Annullierung von Teilstrecken können 2 Annullierungsumläufe erzeugt werden, die immer dazu führen, dass sich das Flugzeug an der Position, an der der Umlauf beginnt, bleibt, bis die ursprüngliche Rotation zu diesem Ort zurückgekehrt. Zusätzlich existieren theoretisch 6 weitere Lösungen, die dazu führen würden, dass jeder einzelne Flug annulliert werden könnte. Diese Möglichkeit wird jedoch ausgeschlossen, da die Kosten aus Annullierung und Leerflug für eine weitere sinnvolle Verwendung zu hoch sind. Der Algorithmus sucht daher nur nach Annullierungsumläufen und nicht nach Einzelannullierungen.

Durch die Einführung des Umlaufs wird einerseits verhindert, dass Leerflüge zur Weiterführung des Flugbetriebs notwendig werden. Da eine Annullierungsumlauf so gestaltet ist, dass nur die Flüge annulliert werden, die zwischen einer Rückkehr zum Ausgangsflughafen liegen, bleibt das Flugzeug physisch vor Ort und kompensiert so die Verspätung durch die technische Störung. Andererseits sind verschiedene Reaktionen des Flugplans möglich: da ein Annullierungsumlauf nicht zwangsläufig am unmittelbaren Ort der technischen Störung initiiert werden kann, können

¹⁵ Ausgangslage ist der Rotationsumlauf AAA-BBB-CCC-AAA-CCC-BBB. Im ersten Annullierungsumlauf (1) werden die Flüge 2 bis 5 annulliert, im zweiten Annullierungsumlauf (2) nur die Flüge 3 und 4. Aus der ursprünglichen Rotation werden daher bei (1) die Flüge AAA-BBB-AAA und bei (2) die Flüge AAA-BBB-CCC-BBB-AAA durchgeführt.

sowohl vor als auch nach dem Umlauf noch Verspätungen in der Rotation enthalten sein. Der eindeutige Nachteil besteht in den vermutlich sehr hohen Kosten durch die Annullierung mehrerer Teilstrecken, die erst für sehr lange Verspätungen einen Kostenvorteil zur Push-Back oder „Auf einer neuen Rotations-„Strategie bedeuten wird. Dieser Schwellenwert ist theoretisch bestimmbar, indem die Kosten für eine Annullierung, die nicht von der Verspätungsdauer abhängen, mit den Kosten der Verspätungsszenarien verglichen werden. Das Gleichsetzen und Auflösen der Gleichung nach der Verspätungsdauer ergibt die Grenze, ab der das Annullierungsszenario einen Kostenvorteil liefert. Rosenberger beispielsweise setzt diese Grenze mit 3 Stunden fest (vgl. Rosenberger et al., 2003, S.418)

Der Kostenansatz für die Annullierungsstrategie setzt sich aus mehreren Teilen zusammen: Neben den reinen Kosten für die Annullierung der Flüge, sind zusätzlich Verspätungskosten zu beachten, die durch die Position der Annullierung um Umlauf auftreten. Hierbei können sowohl primäre als auch reaktionäre Verspätungen entstehen:

$$C_{\text{Annullierungsumlauf}} = C_{\text{Annullierung}} + C_{\text{Verspätungen}} \quad \text{Formel 5-29}$$

$$C_{\text{Annullierung}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{Pax}}(t_{\text{Pax}}) + C_{\text{Wartung}} + C_{\text{Opportunität}}$$

$$C_{\text{Verspätungen}} = C_{\text{Primär}}(t_0) + C_{\text{Reaktionär}}(t_i)$$

Die Kosten des Annullierungsumlaufs müssen für alle betroffenen Verbindungen i berücksichtigt werden. Die reinen Verspätungskosten hingegen hängen von der Reaktion des Flugplans auf die Verspätung t_0 ab.

Durch den **Aufbau einer neuen Rotation** werden für die Fluggesellschaft die umfangreichsten Veränderungen in den Flugplan eingebracht. Hierfür wird ausgehend vom Zeitpunkt der Störung ein neuer Flugplan über die Erstellung der Flugzeugumläufe generiert. Treten hierbei Verspätungen auf, werden diese nach der Vorgehensweise für die Bewertung reaktionärer Verspätungen bewertet. Durch das Hinzuziehen anderer Flugzeug kann hierbei die technisch bedingte Verspätung t auf $t - t_{\text{Einsatz}}$ durch eine frühere Verfügbarkeit verkürzt werden.

Die Generierung der neuen Flugzeugumläufe geschieht hierbei in Anlehnung an den GRASP von Arguello und Bard (Arguello, M., Bard, J.,

1997, S.216-221; Arguello et al., 1996, S.103-111; Feo et al., 1991, S635-643). Diese schlagen vor über eine heuristische Strategie, die eine Hybridlösung zwischen evolutionärer Strategie und Tabu-Search darstellt, Lösungen durch Verknüpfung zweier Umläufe zu generieren und zu bewerten. Der evolutionäre Anteil besteht aus Operationen, die aus bestehenden Umläufen neu generieren, diese abspeichern und anschließend über eine Fitnessfunktion bewerten. Die Methodik des Tabu-Search erzeugt in diesem Zusammenhang Nachbarschaftslösungen, die in einer Liste abgespeichert werden. Grundsätzlich stehen daher neben der Einführung von Annullierungsumläufen und der Push-Back Strategie zwei Multi-Umlauf Optionen zur Verfügung, wie in Abbildung 43 gezeigt: der Tausch von Umlaufteilen ohne und mit Veränderung der Gesamtlänge des gesamten Umlaufs:

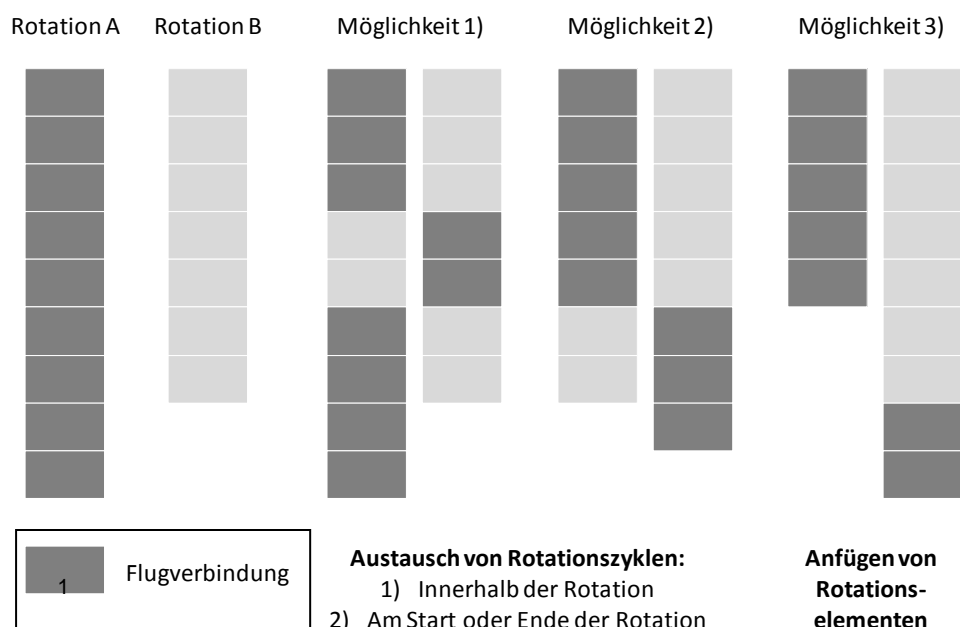


Abbildung 43: Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeiten zu Generierung neuer Rotationen anhand zweier Rotationen A und B.¹⁶

¹⁶ Jedes Kästchen steht hierbei für eine Flugverbindung. Beide Rotationen sind unterschiedlich lang (d.h. es werden unterschiedliche viele Flüge wahrgenommen), was aber für die Logik keine Rolle spielt. Für die Verwendung der Logik wird vorausgesetzt, dass zum Zeitpunkt des Tausches beide Flugzeuge am selben Flughafen sind. Möglichkeit 1) und 2) tauschen hierbei Flugverbindungen innerhalb der Rotation. Möglichkeit 3) arbeitet mit dem Anfügen von Flugverbindungen an das Ende der anderen Rotation.

Ersterer schneidet aus einem bestehenden Umlauf einen Teil so heraus, dass dieser in einen anderen Umlauf eingepasst werden kann. Dies kann am Anfang oder Ende des Umlaufs geschehen. Innerhalb eines Umlaufs können Teile nur als eigener Zyklus eingefügt werden. Beim Tausch von Umlaufsegmenten werden einzelne Teile ausgetauscht, die im Start und Endpunkt identisch sind. Durch beide Operationen werden Flüge durch die unterschiedliche Verfügbarkeit der Flugzeuge verschoben. Konsequenterweise werden daher Verspätungen oder auch Annullierungen notwendig. Annullierungen entstehen, wenn durch den Algorithmus zur Erstellung der Flugzeugumläufe nicht alle Flugfrequenzen abgedeckt werden können. Dies geschieht beispielsweise durch sich akkumulierende reaktionäre Verspätungen, die zu Flugverbindungen führen, die wiederum das Nachtflugverbot an den Flughäfen verletzen. Für diese Flüge werden daraufhin die Kosten einer Annullierung angesetzt.

Im Gegensatz zu Arguello und Bard werden diese Operationen nicht für jede mögliche Kombination von Umläufen durchgeführt, sondern nur auf den Routen, die eine direkte Verbindung zur gestörten Route haben. Eine direkte Verbindung ist dann gegeben, wenn die Routen im Laufe des auslaufenden Flugtages eine Überschneidung haben. Hierfür werden alle sinnvollen Kombinationen aufgestellt und mit Hilfe der Kostenfunktionen bewertet. Die Überprüfung der neuen Umläufe auf Einhaltung der Abflugzeiten und besonders der Nachtflugverbote an Flughäfen schränkt hierbei die Anzahl der möglichen Rekombinationsmöglichkeiten stark ein. Durch diese Vereinfachung wird die Laufzeit des Algorithmus erheblich verkürzt und das Gesamtergebnis bezüglich der Optimalität fast nicht beeinträchtigt.

Die gesamten Kosten berechnen sich für die Erstellung einer neuen Rotation daher in Anlehnung an Rabbani (s.a. Rabbani, F., 2004, S.78) wie folgt:

$$C_{\text{Neue Rotation}}(t) = C_{\text{Primär}}(t_0) + C_{\text{Reaktionär}}(t_i) + C_{\text{Annullierung}}$$

Formel 5-30

Der Zeithorizont für den Einsatz der Strategien beträgt 1 Tag. Befinden sich am Ende des Tages Flugzeuge nicht an den geplanten Endpositionen, die der Ausgangspunkt für die nächste Rotation bilden, so werden diese durch einen Leerflug bewegt. Hierzu fallen die allgemeinen direkten Betriebskosten für diesen Flug an.

$$C_{\text{Leerflug}} = C_{\text{DOC}} \quad \text{Formel 5-31}$$

Insgesamt ergibt sich daher folgendes Bild für den Einsatz der Recovery-Strategien:

	Push-Back Strategie	Short-Cycle Strategie	
Passagierabhängige Kosten C_{Pax}	primär / reaktionär	primär	Neue Rotation
Kosten aus dem Betrieb des Flugzeugs C_{Betrieb}	primär / reaktionär		
Wartungskosten C_{Wartung}	primär	primär	
Opportunitätskosten $C_{\text{Opportunität}}$	primär / reaktionär	primär	
Personalkosten C_{Personal}	primär / reaktionär		

Abbildung 44: Zuordnung der Kostenfaktoren zu den Recovery-Strategien.

Zusammenfassend ergeben sich daher 3 verschiedene Grundtypen mit 6 möglichen Subtypen, die als Werkzeugkasten bei jeder Störung angewendet werden können.

Tabelle 11: Übersicht zu den 3 Grundtypen und 6 Subtypen an möglichen Recovery-Strategien

Recovery Typ	Zusammenfassung
Push-Back	Die Elemente einer einzelnen Rotation werden um die Verspätungslänge verschoben.
Annullierungsumlauf (Short Cycle)	Nur Annullierungszyklen werden bewertet.
Post-Szenario	Ein Zyklus einer anderen Rotation wird ans Ende einer Rotation gestellt.
Pre-Szenario	Ein Zyklus einer anderen Rotation wird an den Start einer Rotation gestellt.
Exchange-Int Szenario	Rotationselemente werden innerhalb der Rotation zwischen 2 Rotationen ausgetauscht.
Exchange Szenario	Rotationselemente werden ans Ende oder an der Anfang einer Rotation gestellt, ohne dass sich die

Länge der Rotation verändert.

Zur Verdeutlichung der Typen werden diese nochmals grafisch im folgenden Abbildungen dargestellt.



Abbildung 45: Ausgangssituation in jeder Verspätungssituation am Beispiel zweier Flugzeuge (AC #1 und AC #2), wobei nach Flug 1 einer Verspätungssituation eintritt.

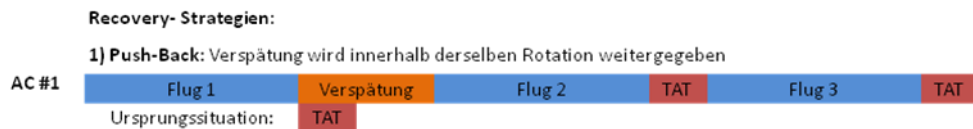


Abbildung 46: Mögliche Recovery Strategien als Reaktion auf die Verspätungssituation aus Abbildung 45: Die Pushback Variante verschiebt alle Flüge der Rotation von AC #1 um die Verspätungslänge. Unterschied zu Abb. 45 besteht darin, dass Flug 2 und Flug 3 später stattfinden.



Abbildung 47: Mögliche Recovery Strategien als Reaktion auf die Verspätungssituation aus Abbildung 45: Der Annullierungsumlauf streicht die Flüge 2 und 3

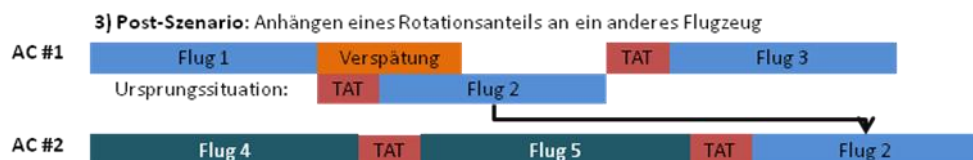


Abbildung 48: Mögliche Recovery Strategien als Reaktion auf die Verspätungssituation aus Abbildung 45. Im Post-Szenario wird der primär verspätete Flug 2 an die Rotation von AC #2 angehängt und erfolgt somit nach Flug 5.

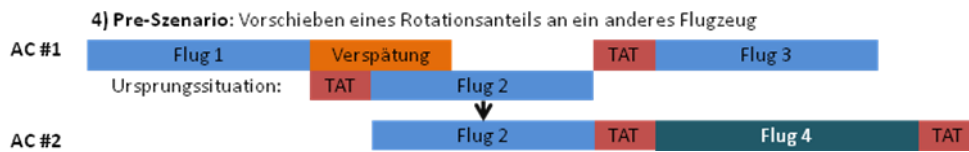


Abbildung 49: Mögliche Recovery Strategien als Reaktion auf die Verspätungssituation aus Abbildung 45. Im Pre-Szenario wird der primär verspätete Flug an den Anfang der Rotation von AC #2 gestellt.

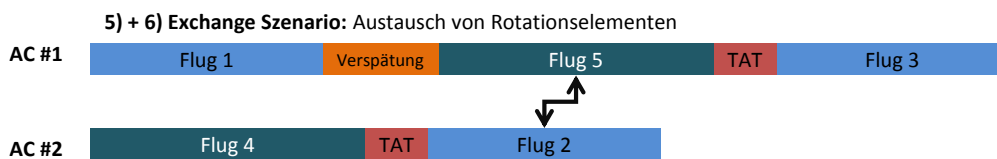


Abbildung 50: Mögliche Recovery Strategien als Reaktion auf die Verspätungssituation aus Abbildung 45. Im Exchange-Szenario werden verschiedene Flüge innerhalb beider Rotationen ausgetauscht, so dass Flug 5 und Flug 4 jetzt von AC #1 und Flug 2 und Flug 6 von AC #2 durchgeführt werden.

5.3.5.3. Aufbau der Heuristik zur Generierung und Bewertung von Recovery-Szenarien

Die Umsetzung der Tausch- und Modifikationsoperatoren, die für die Erstellung der Verspätungsszenarien verantwortlich sind, führt zu der Fragestellung, welches Szenario für den weiteren Verlauf des Flugplans die beste Möglichkeit darstellt. Zu diesem Zweck wird basierend auf dem Konzept von Arguello und Bard (Arguello, M., Bard, J., 1997, S.216-221; Arguello et al., 1996, S.103-111; Feo et al., 1991, S635-643) eine Heuristik verwendet, die eine Wahl aus den generierten Szenarien trifft. Grundsätzlich setzt sich die angewendete Heuristik aus folgenden Grundschrinen zusammen:

1. **Isoliere** alle betroffenen Rotationen
2. **Generiere** mit Hilfe der Tausch- und Modifikationsoperatoren **alle relevanten Szenarien**, des verspäteten Flugzeugs.
3. **Bewerte diese Szenarien** gemäß den anfallenden Verspätungs- bzw. Annullierungskosten.
4. **Schließe** alle **Szenarien aus**, die den Randbedingungen nicht genügen.
5. **Speichere die besten Szenarien** in einer RCL ab und **wähle** zufällige ein **Szenario aus**.
6. **Überprüfe**, welche Flugzeuge des gewählten Szenarios noch **Verspätungen** enthalten.

7. **Wiederhole den Vorgang** ab 1. bis ein Haltekriterium gefunden wird oder eine maximale Anzahl an Durchläufen erreicht ist.

Der 1. Schritt wird einmalig für jedes zufällige TDR-Ereignis durchgeführt, indem nur die Rotationsanteile des gesamten Flugplans isoliert werden, für die eine sinnvolle Lösung in Frage kommen. So spielen Rotationselemente, die vor dem Zufallselement und am nächsten Tag geschehen, keine Rolle für die Reduzierung der Verspätungen im Flugplan. Diese Randbedingung hilft sowohl den Rechenaufwand zu reduzieren, in dem der Zeithorizont der Heuristik eingeschränkt wird. Auch ist es aus operationeller Sicht nicht praktikabel und realistisch, dass Verspätungen gerade in Kurzstreckennetzwerken über den Betrieb an einem Tag hinaus Konsequenzen haben.

Während des 2. Schrittes wird ausgehend von den Rotationen, die noch Verspätungen enthalten, eine Vielzahl von Nachbarschaftsszenarien gebildet, indem die „verspätete Rotation“ mit allen anderen Rotationen kombiniert wird. Hierfür stehen drei grundsätzliche Operationen zur Verfügung – Push-Back, Annullierungsumlauf und der Austausch von Rotationselementen, der sich wiederum auf den reinen Austausch (Exchange Operator) oder das Anfügen von Rotationselementen an eine andere Rotation (Augmentation Operator) stützt. Diese werden immer zwischen der „verspäteten Rotation“ und jeder anderen Rotation des Szenarios paarweise durchgeführt.

Beim Austausch von Rotationselementen wird zwischen Rotationspaar nach Austauschumläufen gesucht, die über identische Start- und Endpunkte definiert sind. Hierdurch wird sichergestellt, dass alle keine Diskrepanz innerhalb der Positionen der Flugzeuge entsteht. Ein Austauschumlauf hat hierbei eine Mindestgröße von einer Verbindung und kann maximal alle Verbindungen einer Rotation umfassen. Auswertungen haben hierbei gezeigt, dass typischerweise 2-6 Verbindungen innerhalb der Austausch-Operation getauscht werden.

Das Anfügen von Rotationselementen sucht ebenfalls nach geeigneten Teilumläufen, die in andere Rotationen an einer beliebigen Stelle integriert werden können. Zu diesem Zweck müssen der Start- und Endpunkt des Teilumlaufs mit dem Endpunkt der n-ten und dem Startpunkt der (n-1)-ten Verbindung übereinstimmen. Das Anfügen der Elemente kann hierbei vor der Rotation (Prä-Szenario), innerhalb der Rotation (Inter-Szenario) und nach der Rotation (Post-Szenario) geschehen.

Sind durch diese Operationen alle Szenarien generiert, werden zusätzlich die Single-Umlauf Strategien angewendet. So wird immer auf die durch das TDR-Ereignis betroffene Rotation die Push-Back Strategie angewendet. Auf alle anderen Szenarien, in denen Verspätungen vorhanden sind, wird die Short-Cycle Strategie verwandt. Insgesamt entstehen daher bei n -Rotationen $(n-1)$ Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Rotationen. Innerhalb jeder der $(n-1)$ Kombinationen sind maximal m Operationen möglich, wodurch $m \cdot (n-1)$ Szenarien entstehen.

Der 3.Schritt der Heuristik bewertet jedes Szenario daraufhin nach dem Einfluss des TDR-Ereignisses und der anfallenden Verspätungen, wobei letztere vor allem durch die Operationen in andere Rotationen nach dem Schneeballprinzip verteilt werden. Die Flugverbindungen innerhalb jeder Rotation werden bezüglich der Verspätungslänge analysiert und gegebenenfalls angepasst, so eine „verspätete“ Rotation entsteht, die primäre als auch reaktionäre Verspätungen enthält. Es werden die definierten Kostenfunktionen auf jede Verbindung jeder Rotation angewendet, so dass schlussendlich jedem Szenario ein fester analytischer Kostenwert zugeordnet werden kann.

Im 4. Schritt wird die Menge der Szenarien durch Randbedingungen reduziert. Hierzu zählen vor allem die Einhaltung der Nachtflugverbote und die Kontrolle der Start- und Endpunkte der Rotationen. Besonders die Einhaltung letzterer ist wesentlicher Bestandteil der mathematischen Formulierung des zugrundeliegenden Problems. Wird eine Verletzung einer Randbedingung gefunden, wird das betreffende Szenario endgültig ausgeschlossen.

Der 5. Schritt trifft die Auswahl aus der reduzierten Menge der Szenarien. Hierfür werden die maximal 10 besten Szenarien ausgewählt und in einer RCL abgespeichert. Hieraus wird zufällig ein Szenario ausgewählt, das als Grundlage für die nächste Iteration der Heuristik dient. Sowohl die Beschränkung der Lösung durch die Auswahl der Top 10 als auch die zufällige Auswahl verfolgen das Ziel, möglichst schnell eine optimale Lösung zu finden. Die Vorauswahl reduziert die Möglichkeiten hierbei auf Lösungen, die sich nahe am Optimum bewegen. Die Zufälligkeit schließt hierbei den Fehler aus, den Methoden des nächsten Nachbarn generieren; d.h.: wählt man immer die naheliegenste also die für diesen Schritt optimale Lösung aus, so besteht die Möglichkeit, dass bei Betrachtung aller Teilschritte nicht der optimale Weg gewählt wird, da dieser bei der Bewertung einer Teillösung zugunsten der optimalen nicht gewählt wurde. Die Zufälligkeit in Kombination mit der Beschränkung der Lösung

ermöglicht daher eine Steuerung der Heuristik zur optimalen Lösung. Gleichzeitig wird mit der Auswahl einer Lösung das Kriterium für Wahl der Top10 im nächsten Iterationsschritt gesetzt, so dass nie eine schlechtere Lösung gewählt werden kann.

Im 6. Schritt wird das ausgewählte Szenario hinsichtlich möglicher Restverspätungen untersucht, wobei der Fokus darauf liegt, die Rotationen zu identifizieren, in denen Verspätungen vorhanden sind. Diese Information wird wiederum für die Generierung von Szenarien im nächsten Iterationsschritt der Heuristik benutzt. Für jede gefundene verspätete Rotation werden alle Kombinationen in der folgenden Iteration überprüft. Die Anzahl der maximal möglichen Szenarien kann sich daher in jedem Schritt durch die Anzahl der verspäteten Rotationen auf $k^2 \cdot m \cdot (n-1)$ erhöhen. k bezeichnet hierbei die Anzahl der Iterationsschritte innerhalb eines Optimierungsschritts der Heuristik. Der quadratische Einfluss ergibt sich aus folgender Überlegung: im ersten Durchlauf einer Optimierungsiteration gibt es immer nur eine Rotation, in der Verspätungen durch das TDR-Ereignis vorhanden sind. Im folgenden Durchlauf dieses Iterationsschritts ist es möglich, dass durch die Modifikationsoperationen (Austausch, Anfügen von Rotationselementen) maximal zwei Rotationselemente Verspätungen enthalten. Im dritten Schritt ergeben sich somit folglich 4 und in einem vierten Schritt 8 potenziell verspätete Rotationen.

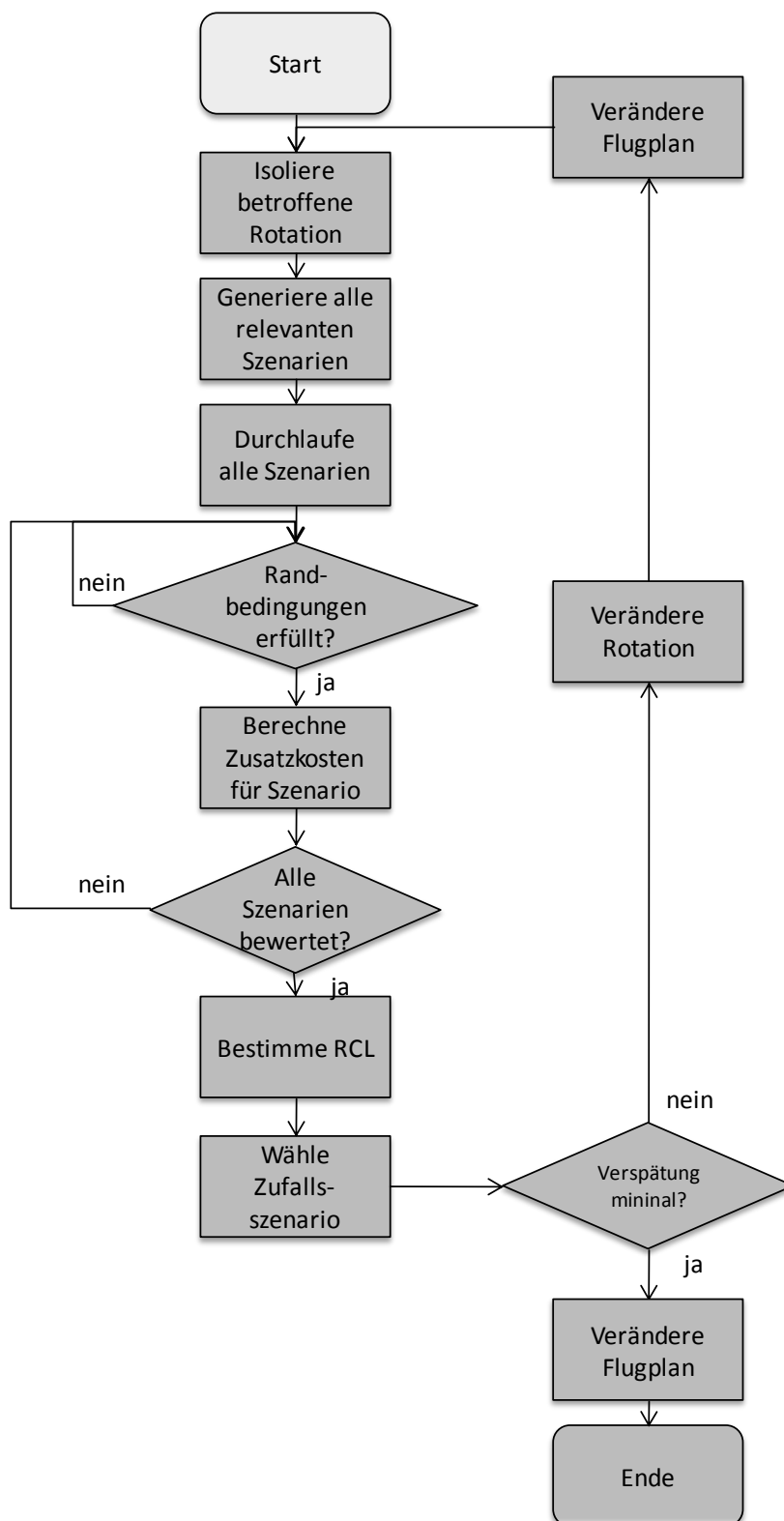


Abbildung 51: Flussdiagramm zur Bestimmung des optimalen Szenarios für ein ungeplantes Ereignis

Diese Heuristik wird hierbei solange durchgeführt bis entweder keine Szenarien mehr in der RCL gespeichert sind, da keine besseren Lösungen zum vorhergehenden Iterationsschritt gefunden werden konnten. Oder bis eine maximale Anzahl von Durchläufen erreicht ist. Diese wiederum richtet sich nach der zur Verfügung stehenden Rechnerleistung und den erwarteten Ergebnissen der Monte-Carlo Simulation. Wird eines der beiden Kriterien getroffen, wird der Flugplan entsprechend des optimierten Szenarios geändert und die eigentliche Monte-Carlo Simulation fortgeführt.

5.4. Zusammenfassung und Einschränkungen der Methodik

Abschließend sei an dieser Stelle noch einmal der Gesamtprozess der Bewertungsmethodik in Erinnerung gerufen, der aus einer Vielzahl von Einzelschritten besteht, die nur durch die Kombination zum Ergebnis kommen: basierend auf dem Prinzip „Zufall“ werden Ereignisse in einen Flugplan eingespeist, die zumeist dazu führen, dass der geplante Ablauf nicht mehr stattfinden kann. Daraufhin greift die beschriebene Heuristik ein, die im Rahmen der Recovery-Strategien alle möglichen Szenarien generiert und diese daraufhin bewertet. Die Bewertung ist hierbei der 1. Schritt zur Optimierung der Lösung, so dass die Reaktion des Flugplans auf die Störung möglichst minimal ausfällt. Nach der Bewertung wird eine Lösung ausgewählt und neue Szenarien werden generiert. Dieser Prozess wird sooft durchgeführt bis entweder eine vorgegebene Grenze erreicht wird oder es nur noch ein optimales Ergebnis vorhanden ist. Daraufhin wird der Flugplan entsprechend der Lösung geändert und der nächste Flug wird betrachtet. Dies wird solange fortgesetzt bis alle Flüge im Flugplan einmal unter dem Aspekt „Zufall“ betrachtet wurden. Daraufhin greift die Monte-Carlo Simulation ein und überprüft, ob die Summe der Verspätungen dem Erwartungswert entspricht. Ist dies nicht der Fall, wird der gesamte Prozess von neuem gestartet. An Hand dieser Ausführung wird deutlich, welche Detailtiefe notwendig ist, um am Ende die Veränderung einer Prozentzahl, der technischen Zuverlässigkeit, zu bewerten. Besonders die Wahl der Recovery-Strategien und deren Bewertung bildet hierzu den Kern der Methodik.

Gleichzeitig ist die vorgestellte Methodik bestimmten Randbedingungen unterworfen: die Flugpläne, die die operative Grundlage für die Veränderung der TDR dienen, stammen vom einem Flugzeugtyp. Damit ergeben sich besonders für die Wahl der Recovery-Strategien und der Berechnung der Kosten der Passagierkompensationen Einschränkungen.

In der Realität besteht die Möglichkeit für Fluggesellschaften den Typ des Fluggeräts zu wechseln oder die Passagiere in einen anderen Typ oder damit Flugplan umzubuchen. Dies ist in der vorgestellten Methodik nicht implementiert, kann aber hinzugefügt werden. Der Grund hierfür liegt in der grundsätzlichen Betrachtung des Problems; Ist eine Bewertung der TDR unter den beschriebenen Bedingungen möglich, so ist eine Erweiterung der Rahmenbedingungen zumeist einfach zu bewerkstelligen. Der Flugzeugtyp wird hierbei als Flugplanparameter implementiert, der es erlaubt bei Bedarf zwischen den Flugzeugtypen zu wechseln. Dadurch entsteht eine weitere Option als Recovery-Strategie, die jedoch die Kenntnis der Passagierströme innerhalb einer Fluggesellschaft an jedem Flughafen voraussetzt.

Unter demselben Gesichtspunkt ist die Vernachlässigung der Slot-Vergabe an den meisten Flughäfen, die mit Kapazitätseckwerten arbeiten, zu behandeln. Hierbei wird jedoch keine weitere Strategie implementiert. Vielmehr wird hierdurch die Liste der Randbedingungen für die Gültigkeit einer Rotation erweitert.

Zusammenfassend ist daher eine Methodik entstanden, die aufbauend auf Rotationen mit Hilfe einer Heuristik in der Umgebung einer Monte-Carlo Simulation die Bewertung der technischen Zuverlässigkeit ermöglicht. Hierbei wurden die Randbedingungen zum Nachtflugverbot und Turn-Around Zeiten implementiert, jedoch die Slot-vergabe vernachlässigt. Gleichzeitig werden Flugpläne für einen Flugzeugtyp analysiert, wobei die Erweiterung auf mehrere Flugzeugtypen den Mehrwert generieren würde, auch die Umsteigeoption als Recovery-Maßnahme zu nutzen.

6. Bewertung der TDR in zwei typischen Kurzstreckennetzwerk

Im Rahmen einer Fallstudie wird im folgenden Kapitel die Anwendbarkeit sowohl der Bewertungsmethodik für technisch-bedingte Verspätungen als auch der Heuristik aufgezeigt werden. Dies geschieht an Hand eines Vergleichs zweier typischer Kurzstreckennetzwerke. Dafür wird für beide Netzwerke der Einfluss verschiedener TDR-Wahrscheinlichkeiten simuliert und verglichen. Im Vordergrund stehen hierbei zwei wesentliche Aspekte; die Verifizierung der Heuristik, die die Grundlage für die Modellierung der Entscheidung der Fluggesellschaft steht, und die exemplarische Darstellung von Ergebnissen für verschiedene TDR-Werte und Verspätungslängen. Grundsätzlich ist die vorgestellte Heuristik als Grundlage der Bewertung zu verstehen. Die Ergebnisse der Berechnung können auf verschiedene Art und Weise verwendet werden, um Informationen über den Einfluss der technischen Zuverlässigkeit auf verschiedene Teilnehmer der Luftfahrt zu gewinnen. Das abschließende Kapitel nimmer diesen Ansatz aus und zeigt mögliche weitere Verwendungsmöglichkeiten auf.

Alle Ergebnisse, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, entstammen der vorgestellten Methodik.

6.1. Vorstellung der Parameter der modellierten Kurzstreckennetze

Zunächst sollen die Grundlagen der Bewertung dargelegt werden. Hierzu werden die beiden verwendeten Kurzstreckennetzwerke durch folgende charakteristische Größen beschrieben:

Tabelle 12: Charakteristische Größen der verwendeten Kurzstreckennetzwerke (OAG 2004)

	Kurzstrecken-netzwerk 1	Kurzstrecken-netzwerk 2
Anzahl der Frequenzen pro Woche	433	517
Anzahl der Verbindungen	124	88
Anzahl der Flughäfen	48	36
Anzahl der Hubs	2	1
Durchschnittliche Blockzeit	1,7 h	2 h
Durchschnittliche	880 nm	1080 nm

Distanz

Für die Durchführung aller folgenden Berechnungen wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die minimale Bodenzeit für ein typisches Kurzstreckenflugzeug wird mit 25 min festgesetzt.
- Die Nachtflugbeschränkungen werden an allen Flughäfen auf 23:30 – 5:00 gesetzt.
- Der Betrieb und somit die Simulation des Flugplans beginnt um 0:00 UTC Montag und endet um 24:00 UTC Sonntag. Der verwendete Flugplan deckt somit einen Zeitraum von 7 Tagen ab. Flüge, die vor Ablauf des 7.Tages starten, aber am 8.Tag landen, werden zugelassen.
- Die durchschnittliche Verspätung durch eine technische Störung wird mit 60 min angenommen. Diese Verspätung betrifft den Zeitraum, der für die Behebung der Störung notwendig ist. Die Verspätungen auf den Flugplan ergeben sich aus den Ergebnissen der Heuristik.

Die Verspätungsfunktion wird hierbei durch folgende Gamma-Funktion (vgl. Hartung 1989, S.904) modelliert:

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

$$\Gamma(\alpha) \cong e^{-\alpha} \alpha^{\alpha-0.5} \sqrt{2\pi} \left(1 + \frac{1}{12\alpha} + \frac{1}{288\alpha^2} - \frac{139}{51840\alpha^3} - \frac{571}{2488320\alpha^4} \right)$$

Je nach Bewertung werden die Parameter α und β so eingestellt, dass die gewünschte durchschnittliche Verspätungsdauer gezeigt werden kann. Im Standardfall werden beide Parameter daher auf $\alpha=7$ und $\beta=8.5$ gesetzt, so dass der Erwartungswert der Verspätung bei 60 min liegt.

Die Kostenfunktionen für Verspätungen und Annullierungen sieht gemäß den Ausführungen in Kapitel 5.3.4 für beide Netzwerke wie folgt aus:

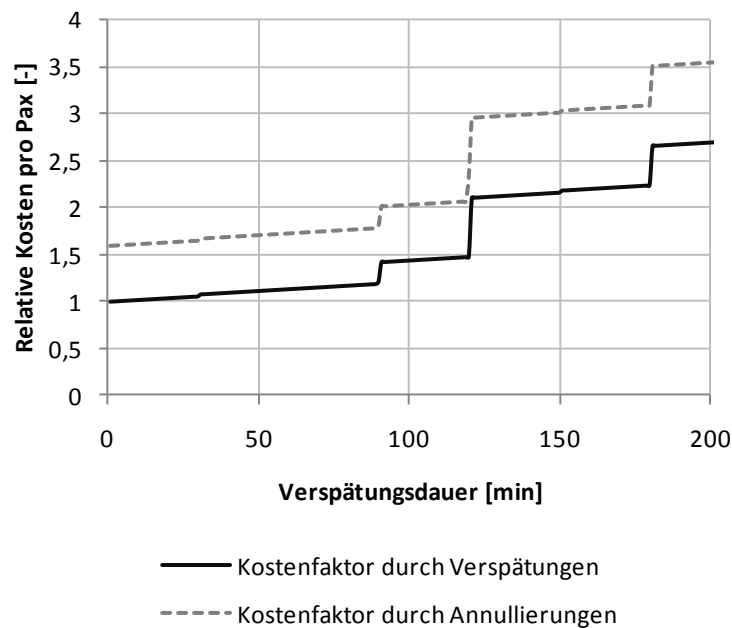


Abbildung 52: Relative Kostenfunktionen für Verspätungen und Annullierungen

6.2. Eigenschaften der Heuristik

Aufgrund des kombinatorischen Problems technischer Störungen in Netzwerken spielen die Eigenschaften der verwendeten Heuristik eine wesentliche Rolle für die Qualität und die Geschwindigkeit der Lösung. Mit jedem Iterationsschritt wird innerhalb jedes einzelnen TDR-Falls eine Vielzahl von Szenarien gebildet, die einzeln bewertet werden müssen, um schlussendlich in einem weiteren Optimierungsdurchlauf verbessert zu werden. Die Qualität der Lösung im Sinne der Nähe zur idealen optimalen Lösung hängt bei der vorliegenden Heuristik daher stark von der Anzahl der Iterationsschritte ab. Gegensätzlich jedoch verhält sich in diesem Zusammenhang die Geschwindigkeit des programmierten Algorithmus; je mehr Iterationsschritte gewählt werden, umso länger dauert die Lösungsfindung. Besonders vor dem Hintergrund der stochastischen Natur der TDR wird deutlich, dass für eine sinnvolle Durchführung einer Fallstudie der Schnittpunkt zwischen Qualität und Geschwindigkeit der Lösung gewählt gefunden werden muss. Zu diesem Zweck wurde der Algorithmus im Rahmen eines Experiments mit verschiedenen Optimierungsschleifen getestet und bewertet. Auf der einen Seite wurde die Berechnungsdauer für einen Flugplan gemessen und auf der anderen Seite die Effizienz der Heuristik, die als Verhältnis der induzierten Verspätung und der optimierten Verspätung definiert wurde. Wie Abbildung 53 zeigt, führt der Algorithmus bereits nur durch die Generierung und Bewertung der Szenarien bei einem

ersten Durchlauf zu einer Verbesserung um 71%, die auf ein scheinbares Minimum von 47% reduziert werden kann bei 5 Optimierungsdurchgängen. Hierbei zeigt sich jedoch, dass die Berechnungsdauer nahezu linear proportional anwächst.

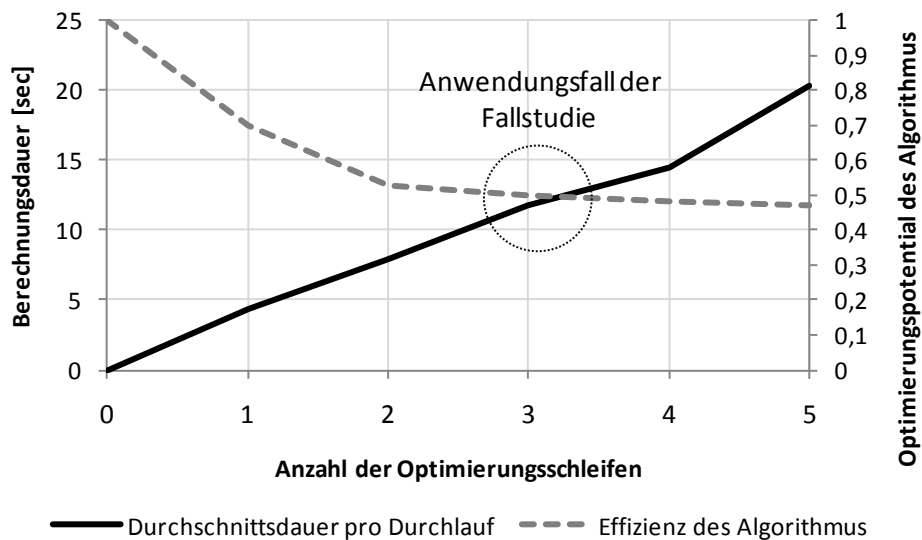


Abbildung 53: Analyse des Algorithmus hinsichtlich der Anwendbarkeit für die Fallstudie.

Bei jedem TDR-Ereignis werden alle Möglichkeiten für die Minimierung von Verspätungen überprüft und einzeln bewertet. Hierbei zeigt sich, dass ein Großteil der Szenarien durch die Tauschoperationen zwischen zwei Rotationen zustande kommt; 93% aller Szenarien werden über die Kombination zweier Rotationen generiert und nur 7% über die Veränderung einer Rotation durch die Push-Back und die Short-Cycle Operation.

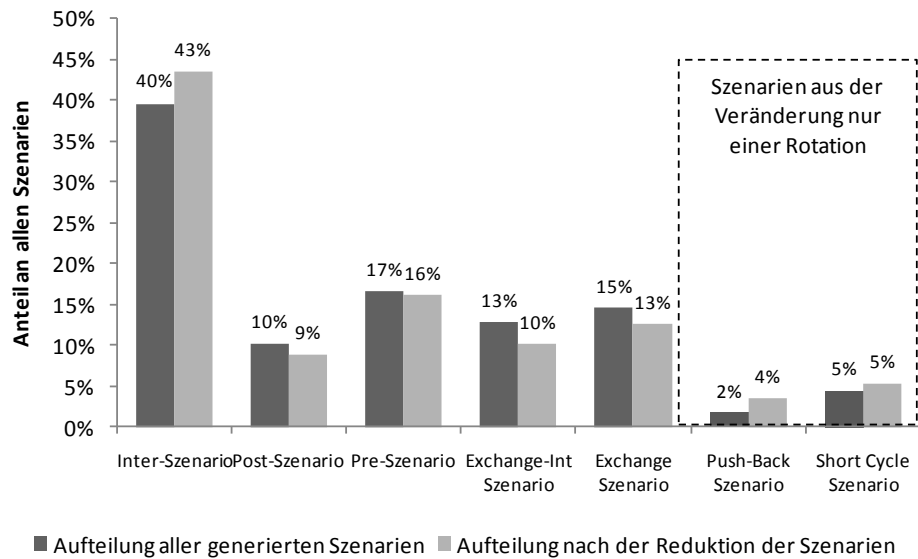


Abbildung 54: Verteilung der Häufigkeit von Szenarien innerhalb eines Durchlaufs. Push-back und Short Cycle als „Single-Rotations-Veränderungen“ sind hervorgehoben.

Die Reduktion der Szenarien führt hierbei dazu, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 41% nur maximal 10 Szenarien für die weitere Betrachtung im Rahmen der Optimierung verbleiben. Gerade das Nachtflugverbot und die Einhaltung der Start- und Endpunkte jeder Rotation führen zu einer drastischen Reduktion der Möglichkeiten, die vor allem zu Lasten der Austausch-Operationen geht, da diese auf dem Austauschen von Rotationsabschnitten beruhen. Hierbei zeigt sich die Tendenz, dass vor allem das Push-Back und Short-Cycle Szenario bevorzugt wird, da hierbei die Randbedingungen, die für das Aussortieren verwendet werden, am seltensten verletzt werden.

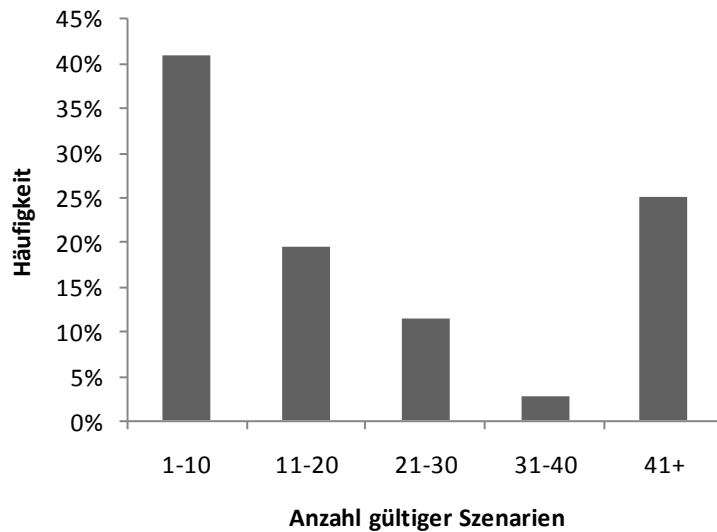


Abbildung 55: Anzahl der gültigen Szenarien bei einem TDR-Ereignis

Jeder TDR-Fall ist hierbei von verschiedenen Parametern geprägt. Neben der direkt offensichtlichen Verspätungsdauer wirken Ort und Zeitpunkt des Zufallsereignisses auf die Anzahl der möglichen Szenarien ein. Kommt es am Ende eines Tages zu einer Störung so ist durch die „Topologie“ des verbleibenden Flugplans die Möglichkeit, die Störung einzudämmen, eingeschränkt. Die Anzahl der generierten Szenarien ist im Vergleich zu anderen TDR-Ereignissen daher kleiner und somit auch das Potential für die Optimierung. Es wird in diesem Fall daher zumeist auf das Push-Back oder Short-Cycle Szenario beschränken.

Nachdem Abschluss der Phase der Generierung der Szenarien werden die einzelnen Szenarien hinsichtlich der Kosten und Erfüllung der Randbedingungen überprüft, um eine Top 10 der besten Szenarien zu erzeugen. Die durchschnittlichen Kosten pro RCL stellen somit einen Parameter für die Qualität der Lösungen dar. Gleichzeitig hat sich gezeigt, dass bei der Wahl der Lösungen, die in die engere Auswahl der RCL aufgenommen werden, die einfache Push-Back Variante zu 34% und die Short-Cycle Variante zu 8% gewählt werden. Der verwendete Algorithmus bevorzugt demnach unter Verwendung aller Annahmen das reine Verschieben einer Rotation.

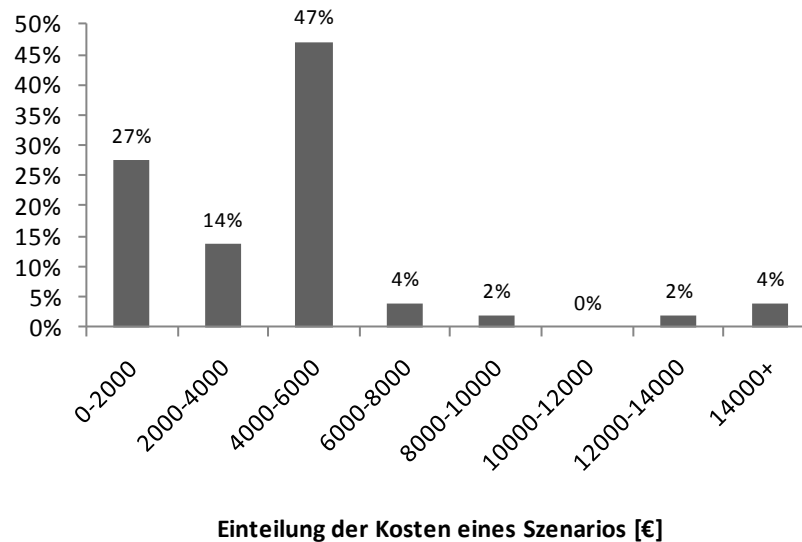


Abbildung 56: Einteilung der Kosten eines Szenarios in Kategorien und Wahrscheinlichkeiten. Auf der x-Achse sind die Kosten eines Szenarios in EUR 2000 Segmente kategorisiert.

Da die durchschnittliche Anzahl der Flugplanberechnungen innerhalb der Monte-Carlo Simulation bei 680 Szenarien liegt, wird die Sensitivitätsstudie mit 3 Optimierungsschleifen pro TDR-Fall berechnet unter der Berücksichtigung einer Qualitätseinbuße von ca. 5% und einer Zeitersparnis von 95%. Die Qualität der Lösung liegt hierbei zu 90% im absoluten Optimum des Problems (vgl. Arguello M. / Bard J. 1997, S.227).

6.3. Sensitivitätsanalyse am Beispiel zweier Netzwerke

Im Folgenden werden die wichtigsten Eingabeparameter im Rahmen einer Sensitivitätsstudie variiert, um die verschiedenen Einflüsse auf ein Streckennetzwerk zeigen zu können. Hierbei werden vor allem die Hauptparameter Kosten und Verspätung dargestellt und analysiert. Die vorliegende Analyse richtet sich hierbei nach dem Ceteris-Paribus¹⁷ Prinzip, nach dem nur jeweils ein Parameter variiert wird und alle anderen Einflussfaktoren konstant gesetzt werden. Die Ergebnisse dieser Analyse werden daraufhin an Hand eines Beispiels für eine fiktive Fluggesellschaft genutzt, um die Bedeutung der technischen Zuverlässigkeit über mehrere Einflussfaktoren basierend auf den Ceteris-Paribus Ergebnissen

¹⁷ D.h.: Unter der Annahme, dass alle außer den genannten Faktoren gleich bleiben

herauszustellen. Gerade der Sprung auf den heutigen Durchschnitt der TDR, der in diesem Kapitel diskutiert wird, kann für eine Fluggesellschaft ein nicht zu unterschätzendes Einsparpotential darstellen.

6.3.1. Zusatzkosten aus nicht planbaren Ereignissen

Die Zusatzkosten aus nicht planbaren Ereignissen können einen nicht vernachlässigbaren Anteil an den DOC einer Fluggesellschaft darstellen. Im Folgenden werden daher beginnend bei einer Übersicht verschiedene Details erarbeitet, die das Verständnis des Einflusses der technischen Zuverlässigkeit erhöhen sollen.

Abbildung 57 zeigt die relative Zunahme der gesamten Zusatzkosten bei einer sinkenden TDR. Hierbei fällt grundsätzlich einmal der lineare Verlauf der Funktion auf, der darauf beruht, dass die Anzahl der technisch bedingten Ereignisse am Boden im linearen Zusammenhang mit der technischen Zuverlässigkeit steht – wenn die Anzahl dieser Ereignisse zunimmt, sinkt im selben Masse die TDR. Da nun die vorliegende Methodik nach dem Gesetz der großen Zahlen arbeitet und die Ergebnisse somit auf dem stochastischen Mittelwert beruhen, werden Einzelereignisse ausgeblendet. Das Ergebnis in Abbildung 57 zeigt somit einen typischen Verlauf der Gesamtkosten bei einer Abnahme der TDR. Die Zusatzkosten sind hierbei auf die gesamten direkten und indirekten Betriebskosten des Netzwerks bezogen. Im vorliegenden Fall gilt daher, dass die Zusatzkosten in einem Bereich von 1% und 10% liegen und einer durchschnittlichen Elastizität von -1,42 unterliegen; bei einer Erhöhung der TDR um 1% ändern sich somit die Gesamtkosten um -1,42%.

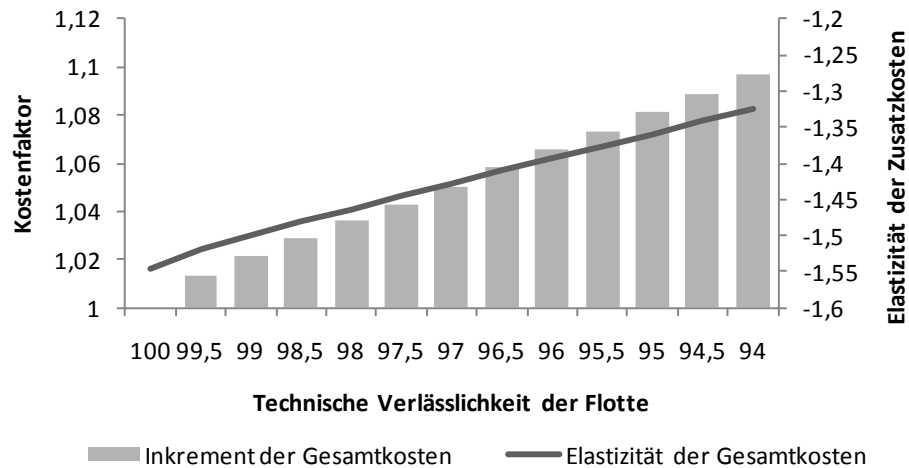


Abbildung 57: Relativer Anstieg und Elastizität¹⁸ der Gesamtkosten mit sinkender technischer Zuverlässigkeit der Flotte

Die isolierte Betrachtung der Zusatzkosten außerhalb der Gesamtkosten des Netzwerks verhält sich wie folgt; die hohe Steigung der Funktion in einem Bereich von 99% entsteht alleine durch das Auftreten von Zusatzkosten, die bei einer TDR von 100% nicht vorhanden sind. Für eine typische europäische Fluggesellschaft in Kurzstreckenverkehr, die mit einer Durchschnitts-TDR von 99,5% operiert, bedeuten demnach Schwankungen der ungeplanten Ereignisse auch starke Schwankungen der Zusatzkosten.

¹⁸ Die Elastizität ist ein Maß, das die relative Änderung einer abhängigen Variablen auf eine relative Änderung einer ihrer unabhängigen Variablen angibt.

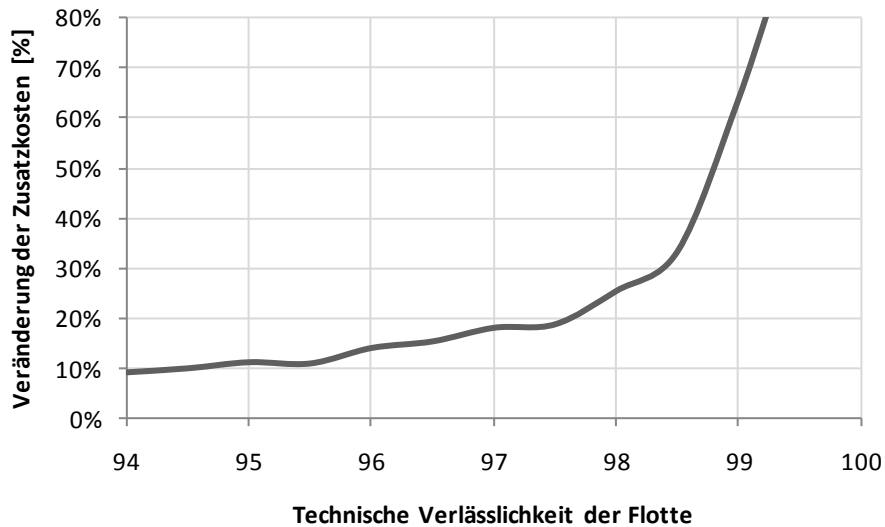


Abbildung 58: Veränderung der Zusatzkosten einer Frequenz.

Besonders Kosten aus Verspätungen und Annullierungen sind hierfür Verantwortlich, wie auch Abbildung 59 zeigt. Die Verspätungskosten machen hierbei immer einen Anteil von 75%-80% der gesamten Zusatzkosten aus und hängen direkt von der Anzahl der Ereignisse und der Dauer der Verspätung ab. Erst mit sinkender TDR kommen vor allem die Kosten der Annullierungen zum Tragen, die im Vergleich maximal einen Beitrag von 10% einnehmen, im Vergleich der Einzelfälle jedoch der größte Einzelanteil sind. Hierbei gilt die allgemeine Regel, dass eine Verspätung in erster Näherung 1/3 der Kosten einer Annullierung ausmacht.

Der Imageverlust, der ebenfalls in Abbildung 59 dargestellt ist, hängt hauptsächlich von der relativen Größe der Pünktlichkeit ab, die im Vergleich mit der quantitativen Größe der Anzahl der Ereignisse mit sinkender TDR an Anteilen verliert.

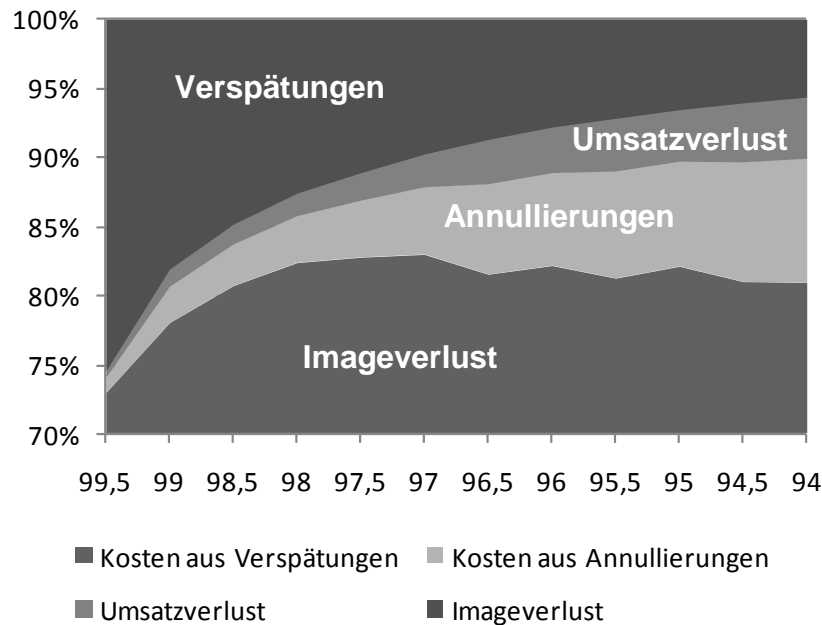


Abbildung 59: Relative Anteile der Zusatzkosten mit sinkender technischer Zuverlässigkeit der Flotte

Im Vergleich der beiden Netzwerke zeigt sich die scheinbare Abhängigkeit der Analysen vom Modus Operandi der Netzwerke und Fluggesellschaften. Beide Netzwerke arbeiten nach dem Hub&Spoke Prinzip und operieren denselben Flugzeugtyp. Abbildung 60 zeigt hierbei zwei Unterschiede auf:

- (1) Die Zusatzkosten beider Netzwerke unterscheiden sich im Durchschnitt um 20%, wobei Netzwerk 2 mit 517 Frequenzen mehr Zusatzkosten aufzunehmen hat.
- (2) Der durchschnittliche Unterschied von 20% steigt ab einer TDR von 98% leicht an.

Der Kostenunterschied wiederum beläuft sich anfänglich auf ca. 20%, womit der Zusammenhang zwischen Kosten und der Anzahl der Frequenzen offensichtlich wird: da es sich bei der technischen Zuverlässigkeit um eine relative Größe handelt, die ein Frequenzverhältnis beschreibt, steigt mit der Zunahme der Frequenzen auch die Anzahl der ungeplanten Ereignisse. Diese wiederum hängen innerhalb der Monte-Carlo Simulation von einem mittleren Kostenfaktor ab. Somit kann bei der Betrachtung verschiedener Netzwerke mit selben Fluggerät und Betriebskonzept folgende These festgehalten werden:

„Die Zusatzkosten verhalten sich bis direkt proportional zur Anzahl der Frequenzen, die von einer Fluggesellschaft betrieben werden“.

Das Ansteigen der Kosten beruht auf dem Streckenkonzept hinter Netzwerk 2. Mit einer höheren Anzahl von Verbindungen bei gleichzeitig höherer Blockzeit besitzt Netzwerk 2 eine Produktivität von 4,9 Frequenzen pro Tag. Im Vergleich dazu operiert Netzwerk 1 bei 4,4 Frequenzen pro Tag. Die höhere Blockzeit jedoch bei einer geringeren Anzahl an Flughäfen führt zu einer höheren Sensitivität des Systems bei Störungen. Dies lässt sich am Parameter der Pufferzeiten beider Systeme messen. Diese werden für den vorliegenden Fall als die Differenz zwischen On-Block und Off-Block gemessen und stellen die effektive Zeit des Flugzeugs am Gate da. Diese beinhaltet neben der Turn-Around Zeit auch einer Wartezeit auf den nächsten Slot oder eine gewollte Pufferzeit, um eventuelle Verspätungen aufzufangen. Für Netzwerk 1 liegt der Median bei 55 Minuten und für Netzwerk 2 bei 50 Minuten. Eine Senkung der TDR und somit eine Erhöhung der Anzahl der Störungen führt zwangsläufig zu einer erhöhten Belastung der Flughäfen. Dadurch steigt bei einer geringeren Anzahl der Flughäfen und Pufferzeiten die Wahrscheinlichkeit, dass das System massiv gestört wird.

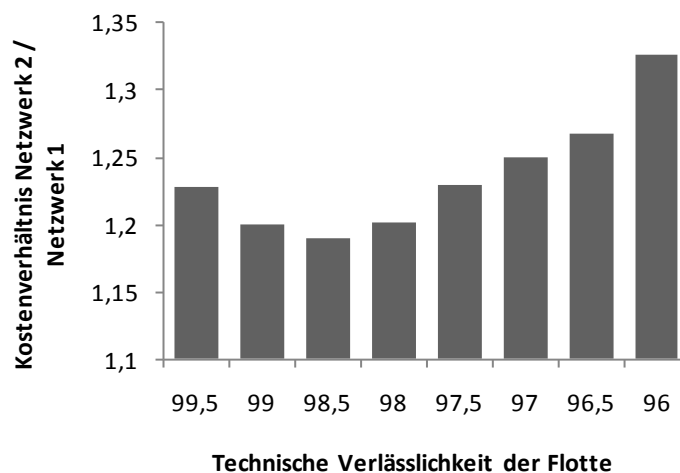


Abbildung 60: Vergleich der Kostenfaktoren zwischen Netzwerk 1 und Netzwerk 2

Aus Sicht einer Fluggesellschaft spielen diese Zusatzkosten immer im Zusammenhang zu den direkten Betriebskosten eine Rolle. Hierzu zeigt Abbildung 61, dass beginnend mit einem Anteil von 2% die Bedeutung mit sinkender TDR stark zunimmt.

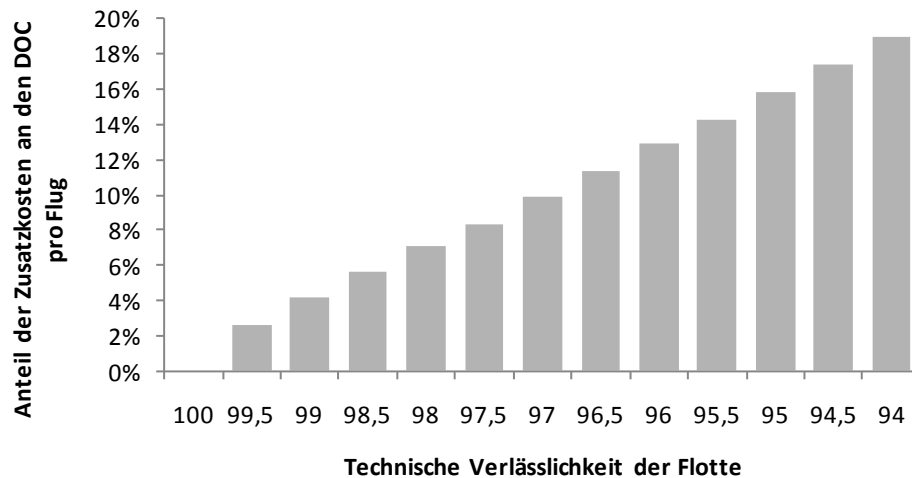


Abbildung 61: Anteil der Zusatzkosten an den durchschnittlichen direkten Betriebskosten eines Fluges

Eine typische Fluggesellschaft mit einer TDR von 99,5% hat zusätzlich somit 2,6% an Mehrkosten (kurzfristig und langfristig) zu tragen. Dies beinhaltet sowohl zusätzliche operative Kosten durch Bodenstandzeiten und Treibstoff, aber auch strategische Kosten aus dem Produktivitäts- und Imageverlust.

6.3.2. Verhalten der Verspätung bei steigender TDR

Neben den Kosten spielt das Verhalten von Verspätungen eine entscheidende Rolle. Verspätungen durch TDR-Ereignisse zeichnen sich aus technischer Sicht durch eine Verschiebung der Verfügbarkeit des Fluggeräts aus, indem Reparatur und Wartungsarbeiten den ursprünglich geplanten zeitlichen Ablauf des Flugplans verzögern. Hierbei wird vor allem der direkt betroffene Flug durch die primäre Verspätung verschoben. Gleichzeitig jedoch können, je nach Zeit, Ort und Dauer des technischen Defekts, auch Flüge entlang der geplanten Rotation betroffen sein. Die Verspätung durchsetzt hierbei Teile des Flugplans mit reaktionären Verspätungen, die wiederum ebenfalls einen erheblichen Anteil an den daraus resultierenden Kosten haben.

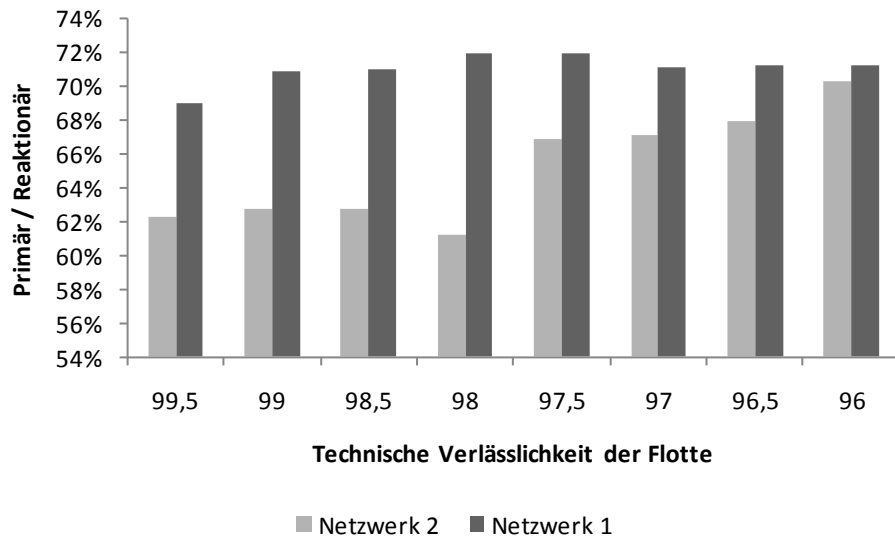


Abbildung 62: Primäre und reaktionäre Verspätungen

Primäre und reaktionäre Verspätungen bewegen sich für Netzwerk 2 zumeist in einem Verhältnis von 60:40 und für Netzwerk 1 bei 70:30. Die Studie der Eurocontrol (Eurocontrol 2007, S.34 und ITA 2000, S.3) spricht hierbei davon, dass man Europaweit von einem Verhältnis von 60:40 ausgehen kann, welches zeigt, dass die Ergebnisse der vorliegenden Studie im richtigen Wertebereich liegen. Gleichzeitig zeigt sich in Abbildung 62 wiederum, dass die Anzahl der Frequenzen und die Flugdauer einen Einfluss auf die Fähigkeit des Netzwerks ausüben Verspätungen zu kompensieren. Netzwerk 1, das weniger Frequenzen aber mehr Flughäfen bedient, weist einen höheren Anteil an Primärverspätungen auf. Dies bedeutet, dass Netzwerk 1 reaktionäre Verspätungen besser verarbeiten kann und somit weniger anfällig auf Störungen ist, was bereits bei Abbildung 60 im Vergleich der Kostenfaktoren festgestellt werden konnte. Der Grund liegt hierbei in den Pufferzeiten, die gerade bei reaktionären Effekten einen akkumulierenden Effekt besitzen, und in der niedrigen Anzahl an Frequenzen.

Gleichzeitig zeigt sich in Abbildung 63, dass mit sinkender TDR der absolute Verspätungswert pro Prozent TDR um den Faktor 2 steigt. Bereits ein absinken der Zuverlässigkeit von 99,5% auf 98,5% bedeutet somit eine Verdopplung der zu erwarteten Verspätungen, die durch das bestehende System Flugplan nicht mehr kompensiert werden können. Vor dem Hintergrund steigender Verspätungsdauern müssen Flugpläne daher in Zukunft deutlich robuster durch strategische optimierte Pufferzeiten gestaltet werden.

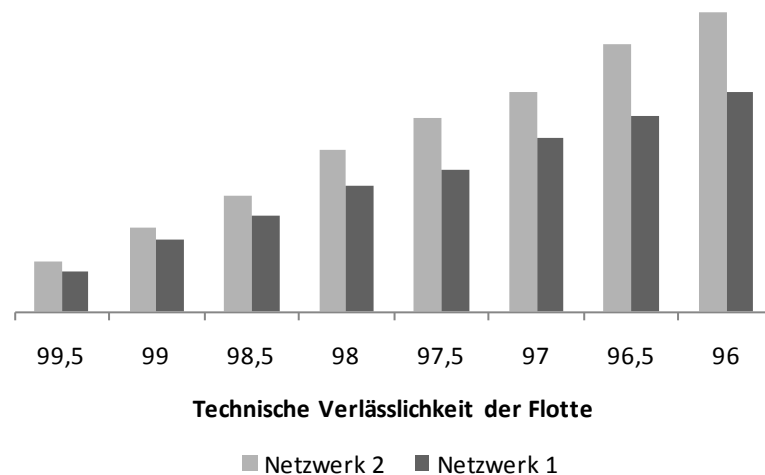


Abbildung 63: Im Vergleich, relatives Wachstum der akkumulierten Verspätungen bei einem Durchlauf bei sinkender TDR – ohne Angabe der y-Achse

6.4. Was bedeutet eine Veränderung der TDR für eine Fluggesellschaft und den OEM?

Die beschriebenen Effekte bzw. Sensitivitäten müssen natürlich für jeden Einzelfall betrachtet und ausgewertet werden. Dies soll an Hand einer fiktiven Fluggesellschaft qualitativ geschehen. Die Wirkungen sind hierbei sowohl für Fluggesellschaften als auch für OEMs gültig, da es sich am Ende um den Einfluss auf den Kosten (aus Sicht der Airline) und auf den Preis (aus Sicht des OEMs) bezieht.

Bisher gezeigte Ergebnisse wurden hierbei in Expertengesprächen validiert, eine Quantifizierung der Daten hinsichtlich des absoluten Einflusses ist nicht möglich, da es sich um sensitive Daten handelt, die nicht für die Veröffentlichung bestimmt sind.

Jede Fluggesellschaft sollte auch aus den bereits genannten Kosten- und Imagegründen eine Maximierung der Lufttüchtigkeit und somit der technischen Zuverlässigkeit der Flotte anstreben. Dies kann über verschiedene Parameter, die vor allem durch die Wartungsbetriebe getrieben werden geschehen. Der Effekt, der sich aufgrund einer erhöhten TDR einstellt, betrifft jedoch nicht nur die dargestellte Kostenperspektive. Abbildung 64 zeigt qualitativ auf, welche Kettenreaktion erzielt werden kann; unter der Annahme eine Verbesserung der TDR erhöht sich die Nutzung bzw. Utilisation der Flotte, da weniger Annullierungen (schon rein

statistisch) vorkommen. (Die Utilisation beispielsweise wird durch die Definition der TDR nur durch Annullierungen beeinflusst. Verspätungen an sich führen nur zu einer Verschiebung der Flugpläne nicht aber dazu, dass weniger geflogen wird.). Diese erhöhte Utilisation wiederum kann dazu führen, dass mehr Verbindungen bedient werden können, was zu einer Erhöhung des Umsatzes und möglicherweise auch des Gewinns führt. Die erste Kettenreaktion einer Verbesserung der TDR ist somit eine Erhöhung der Frequenzen und damit des Umsatzes.

Aus der Verringerung der Annullierungen und Verspätungen ergibt sich jedoch besonders bei großen Flotten die Möglichkeit der Verringerung der Reserveflotte, die am Boden wartend auf AOGs (eng.: Aircraft on Ground) reagieren soll. Diese Reduktion der Flugzeuganzahl entspricht langfristig einer Verringerung der Kapitalkosten bzw. des gebundenen Kapitals, was wiederum die direkten Betriebskosten senkt. Somit kann als zweite Kettenreaktion die Verringerung der Kapitalkosten durch Erhöhung der TDR festgehalten werden.

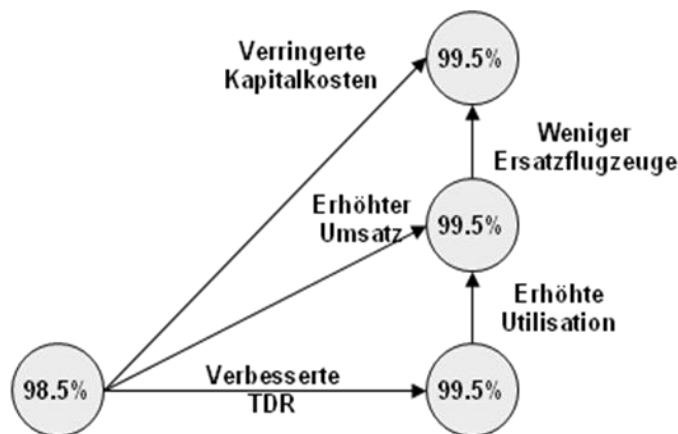


Abbildung 64: Qualitative Wirkung einer Verbesserung der TDR auf eine Fluggesellschaft

Jede Fluggesellschaft profitiert oder leidet unter der Veränderung der TDR auf dreierlei Weise:

- (1) Die Zusatzkosten durch die TDR ändern sich
- (2) Die Utilisation und damit die Produktivität der Flotte verändert sich, was einen direkten Einfluss auf den Umsatz hat.
- (3) Die Kapitalkosten ändern sich langfristig

6.5. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

6.5.1. Beurteilung der Ergebnisse

Die ermittelten Ergebnisse hinsichtlich der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Ergebnisse im Vergleich mit den bisherigen Annahmen besonders der Eurocontrol verwendbar sind. Hierbei haben sich 2 Punkte herausgebildet:

- (1) Die Reaktion des Netzwerks 2 auf einer Verringerung der TDR zeigen, dass sich dieses Netzwerk bereits an seiner Kapazitätsgrenze operiert. Die Veränderung der TDR kann hierbei stellvertretend für eine Veränderung der Verspätungsgründe verstanden werden. Ob, wie im vorliegenden Fall, es technische Gründe sind, oder nicht, spielt für die verwendete Methodik keine Rolle. Es ist vielmehr eine Zufallszahl, die über die Wirkung auf das Netzwerk entscheidet. Zukünftig unter Annahmen steigender Kapazitätsprobleme sowohl an Flughäfen als auch im Luftraum, wird es vermehrt zu Verspätungen kommen, die das bisherige System empfindlich stören werden.
- (2) Eine Veränderung der TDR um 1% führt zu einer Verdopplung der Anzahl der ungeplanten Ereignisse. Diese Tatsache zeigt auf, dass sich im operativen System einer Fluggesellschaft noch Optimierungspotential befindet. Flugpläne müssen in der Zukunft so ausgelegt werden, dass Robustheit gegenüber Störungen eine wichtige Randbedingung sind.

Die ermittelten Ergebnisse gelten nur für die beiden verwendeten Netzwerke und nur unter der Bedingung, dass die Annahmen zur Kostenstruktur der Eurocontrol-Studie gültig sind. Besonders innerhalb der Diskussion der augenscheinlich sehr ähnlichen Kurzstreckennetzwerke hat sich gezeigt, dass sich nur unter voller Kenntnis der Rahmenbedingungen und Netzwerkkonzepte die Ergebnisse richtig interpretieren lassen. Dies trifft ebenfalls auf die Annahmen bezüglich der Zusatzkosten zu. Diese haben einen erheblichen Einfluss auf die Bewertung im Zusammenhang mit der Kostenstruktur der Fluggesellschaft. Desweiteren wird der Auswahlprozess der Heuristik durch die geeignete Wahl der Kosten erheblich beeinflusst. Würde man beispielsweise die Kosten einer Annullierung unter ein Kostenschwelle setzen, würde Annullierungen vor Verspätungen bevorzugt werden. Dies würde zu einem völlig anderem Bild bezüglich der Interpretation der Produktivität und schlussendlich der Kostenstruktur führen. Diese kurze Ausführung hat gezeigt, dass eine

Änderung der Rahmenbedingungen auch im vorliegenden Fall zu einer anderen Bewertung der Ergebnisse führen kann.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Netzwerke mit beispielsweise einem Point-to-Point Konzept, wie es von typischen No-Frills Fluggesellschaften verwendet wird, ist damit in erster Linie nicht gegeben. Die Methodik im Sinne der verwendeten Heuristik in Verbindung mit einer Monte-Carlo Simulation ist jedoch so ausgelegt, dass jeder Netzwerktyp bewertet werden kann.

6.5.2. Zusammenfassung

Das vorliegende Kapitel hat an Hand dreier Schritte die Qualität, Anwendbarkeit und Verwendbarkeit der Ergebnisse dargestellt. Über eine Darstellung der Randbedingungen wie Netzwerkparameter und Kosten- und Verspätungsfunktion wurden die Systemgrenzen der Studie klar definiert. Die Ergebnisse der Fallstudie wurden an Hand einer Studie zu Qualität und Geschwindigkeit des Algorithmus fokussiert, so dass innerhalb akzeptabler Abweichungen vom Optimum durch die Heuristik sinnvolle Ergebnisse erzielt wurden. Die Sensitivitätsanalyse wiederum hat das Analysepotential der Simulationsergebnisse angedeutet. Gerade in der Analyse der generierten Flugpläne können mehr Ergebnisse und Erkenntnisse gewonnen werden. Die abschließende qualitative Betrachtung der Wirkung auf eine Fluggesellschaft hat die Dimension der Bewertungsmethodik aber auch Entwicklungspotential aufgezeigt.

7. Zusammenfassung und Ausblick

7.1. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat einen Beitrag zur Beantwortung der Frage nach dem Wert der technischen Zuverlässigkeit für eine Fluggesellschaft geleistet. Die entwickelte Heuristik in Verbindung mit der Monte-Carlo Simulation bildet ein Werkzeug, das es ermöglicht - versehen mit den notwendigen Eingaben – Flugpläne mit verschiedenen TDR-Wahrscheinlichkeiten zu simulieren und hinsichtlich der entstehenden Zusatzkosten zu bewerten. Gleichzeitig ist es möglich, die unterschiedlichen Wirkungsweisen von ungeplanten Ereignissen, die, wie gezeigt, schon bei einzelnen Parametern eines Netzwerks stark variieren, zu analysieren. Das Fundament der Bewertungsmethodik bilden hierbei verschiedene Recovery-Strategien, die zur Eindämmung von Verspätungen eingesetzt werden können. Hierzu wurden basierend auf veröffentlichten Daten und Berichten alle verfügbaren Verfahrensweisen zusammengestellt. Das Hauptaugenmerk bei der Auswahl und anschließenden Modellierung lag hierbei auf einer transparenten Quantifizierbarkeit der einzelnen Recovery-Verfahren, die notwendig ist, um für den jeweiligen Einzelfall eines TDR-Ereignisses eine nachvollziehbare und damit objektive Entscheidung treffen zu können, die in eine Software implementiert werden kann. Die Quantifizierbarkeit konnte durch zeitabhängige Kostenfunktionen umgesetzt werden. Die Nachvollziehbarkeit jeder Entscheidung wurde durch den Vergleich der Kosten der einzelnen Optionen bewerkstelligt. Der stochastischen Natur der technischen Zuverlässigkeit bzw. deren Unplanbarkeit wurde die Monte-Carlo Simulation entgegengesetzt, die es der Bewertungsmethodik erlaubt über das Gesetz der Großen Zahlen Aussagen zur Wirkung zu treffen.

Um das verwendete eindeutige Regelwerk in eine sinnvolle übergeordnete Bewertungsumgebung einbetten zu können, wurden die Auslegungskriterien und Anforderungen zu anfangs definiert und mit dem Stand der Technik verglichen. Im Zuge der Analyse von Verspätungsstatistiken und Experimenten mit verschiedenen eigenentwickelten Algorithmen, die in der vorliegenden Arbeit nicht beschrieben sind, konnte eine allgemeine Systemumgebung für die Bewertungsfrage aufgebaut werden. Die Verbindung einer Heuristik zur Generierung und Auswahl von optimalen Szenarien mit der Monte-Carlo Simulation entspricht hierbei die getroffenen Anforderungen, die bisher nicht durch die bestehende Forschung erfüllt werden konnten.

Der Kern der verwendeten Heuristik entspricht dem GRASP-Algorithmus von Arguello und Bard (Arguelle M. / Bard J., 1997, S.211 – 228), der durch die Wahl und Modellierung der Recovery-Strategien und die Bewertung dieser über eine generische Kostenfunktion erweitert wurde. Gerade die Modellierung der Kostenfunktion, die bisher in der veröffentlichten Literatur nicht vorhanden war, spielte hierbei eine entscheidende Rolle. Zu diesem Zweck wurden die einzelnen Kostentreiber identifiziert und zeitabhängig modelliert, so dass eine generische Anwendung erst ermöglicht wurde.

Beim Aufbau der Methodik wurde Wert darauf gelegt, dass das Einsatzspektrum möglichst flexibel gewählt werden kann. So sind alle Rahmenbedingungen frei wählbar und erlauben es dem Nutzer die Parameter der gewählten Fallstudie anzupassen. Die präsentierte Fallstudie zeigt hierzu beispielhaft diese Parameter auf und demonstriert die Qualität und Geschwindigkeit der Heuristik in Verbindung mit der Monte-Carlo Simulation. Auch die Ergebnisse der Fallstudien beweisen neben einer Übereinstimmung mit den veröffentlichten Daten die Anwendbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse.

Auch wenn die technische Zuverlässigkeit nur ein statistischer Wert ist, der vielen Einflüssen, die nicht statistischer Natur sind, unterworfen ist, können sowohl Fluggesellschaften als auch MRO-Betriebe die vorliegende Methodik nutzen, um Aussagen über Sinn und Nutzen einer Veränderung zu treffen. Fluggesellschaften werden hierbei vor allem am direkten Einsparpotential interessiert sein, das wiederum MRO-Betriebe als Verkaufsargument für die eigenen Produkte nutzen können. Schlussendlich sollte der Wert der technischen Zuverlässigkeit nicht durch den Zufall bestimmt sein, sondern durch den Willen der Fluggesellschaft in die Optimierung der Lufttüchtigkeit zu investieren.

7.2. Ausblick - die ganzheitliche Bewertung der TDR im System „Luftverkehr“

Die Bewertung der Zusatzkosten über eine Heuristik im Verbund mit einer Monte-Carlo Simulation als Ansatz zur Diskussion der Wirkung der technischen Zuverlässigkeit bildet einen Ausschnitt aus dem Luftverkehr ab. Die verwendete Methodik bietet hierzu eine Reihe von sinnvollen Erweiterungen, die zum einem ganzheitlichen Verständnis der Wirkungsweise beitragen kann.

Die Zusatzkosten zeigen hierzu nur eine Seite der Wirkung auf Fluggesellschaften. So wurde bereits in 6.4 gezeigt, dass sich aus der

Veränderung der TDR mindestens zwei weitere Effekte ergeben können, die in der vorliegenden Arbeit nicht quantifiziert wurden. So können einerseits durch das freiwerdende Potential in der Utilisation bei Bedarf mehr Frequenzen bedient werden, wodurch der Umsatz steigt. Andererseits können langfristige Kapitelbindungen durch Flugzeugkäufe vermieden und verringert werden. Um den Mehrumsatz durch zusätzliche Utilisation bewerten zu können, muss die bestehende Methodik um ein Modell zum Angebot und Nachfrage des Streckennetzes erweitert werden. Dieses würde es ermöglichen die Nachfrage nach neuen Frequenzen im bestehenden Netz zu analysieren und bei Bedarf in den Flugplan zu integrieren. Der daraus entstehende Nutzen und Aufwand könnte monetär bewertet werden. Die Bewertung der Ersatzflugzeuge könnte beispielsweise über die Integration der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung geschehen, indem die Kosten für das Flugzeug den Zusatzkosten durch die Einsparung an Verspätungen gleichgesetzt werden.

Jede Änderung der technischen Zuverlässigkeit hat jedoch auch Auswirkungen auf die anderen vorhandenen Teilnehmer des Systems Luftverkehr, die ebenfalls bewertet werden müssen. Der eigentliche Urheber der technischen Zuverlässigkeit ist hierbei die Entwurfsphilosophie der Hersteller. Diese legen über Sicherheitskriterien, Materialauswahl und Funktionskonzept fest, wie lange ein System funktioniert und besonders wie viel es kostet. Gerade die Kosten-Nutzen Frage, die durch die Nachfrage am Markt getrieben wird, legt die technische Zuverlässigkeit bis zu einem gewissen Grad fest. Ist diese Frage zu Festlegung der technischen Zuverlässigkeit beantwortet, sind die Wartungsbetriebe dafür verantwortlich die technische Zuverlässigkeit zu erhalten und bei Bedarf zu optimieren. Wenn man davon ausgeht, dass sich die Entwurfsphilosophie der OEMs nicht ändert, liegt der Haupttreiber für die technische Zuverlässigkeit bei genau diesen Unternehmen, die über die Qualität und den damit die Kosten der Line-Maintenance, der Engineering-Abteilungen und der Logistik bestimmen. Eine Änderung der technischen Zuverlässigkeit getrieben durch die Fluggesellschaft schafft demnach auch Spielraum oder Probleme für die Wartungsbetriebe. Neben den technischen Aspekten bedeutet eine Veränderung der TDR auch eine Veränderung der Verspätungslage an den Flughäfen, die durch ihre eigene Kapazität (Start- und Landebahn) einem genauen Zeitplan unterliegen. Die Wartezeit von Passagieren hat ebenfalls einen Wert, sei er subjektiv oder aus volkswirtschaftlicher Perspektive betrachtet. Auch das Thema Sicherheit wird durch eine Veränderung betroffen; eine niedrigere TDR bedeutet gleichzeitig mehr technische Störungen. Durch diese

Ausführungen wird deutlich welchen vielschichtigen Einfluss eine kleine Änderung der TDR auf das gesamte System Luftfahrt haben kann, der nicht nur aus Sicht der Fluggesellschaft bewertet werden darf. Es bedarf an dieser Stelle eines holistischen Ansatzes, der alle Teilnehmer des Luftverkehrs gleichwertig mit einbezieht.

Neben der Erweiterung der Methodik um betriebswirtschaftliche oder mathematische Bausteine bietet sich auch Nutzung des bestehenden zur Bewertung von mehr als nur 2 generischen Netzwerken. Über eine gezielte Auswertung von verschiedenen Kurzstreckennetzwerken mit unterschiedlicher Philosophie kann eine einfache Methodik zur Bewertung der Ausbreitung von Verspätungen erarbeitet werden. Diese würde zum einen eine ganzheitliche Bewertung der Verspätungsproblematik in Europe erlauben und zum anderen die Hebel und Stellschrauben des Systems hinsichtlich der Verspätungen eindeutig identifizieren. Basierend hierauf sind daraufhin gezielte Optimierungsprojekte möglich, die bestehende Recovery-Strategien betreffen oder das Netzwerkmanagement und besonders hier die Gestaltung der Netzwerke verändern. Wenn der Luftverkehr mit 5% per annum auch in den nächsten Jahren wachsen soll, müssen die Treiber und besonders die Beschränkungen des Systems verstanden werden, da Verspätungen werden nur bis zu einem gewissen Grad toleriert werden.

Literaturverzeichnis

- Abdelghany, Khaled / Shah, Sharmila / Raina, Sihhartha / Abdelghany, Ahmed (Abdelghany, 2004): A model for projecting flight delays during irregular operation conditions, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 10 (2004), S.385-394
- Abdelghany, Khaled / Abdelghany, Ahmed / Ekollu, Goutham (Abdelghany, 2008): An integrated decision support tool for airlines schedule recovery during irregular operations, *European Journal of Operational Research*, Vol. 185 (2008), S.825-848
- Airbus Industries, *Safety and Reliability Handbook AP2616*, 1999
- Airbus: *Aircraft Characteristics*,
<http://www.airbus.com/en/services/customer-services/maintenance-engineering/tech-data/aircraft-characteristics/>, 16.12.2009
- Arguello, Michael / Bard, Jonathan: A GRASP for aircraft routing in response to groundings and delays, *Journal of Combinatorial Optimization*, Vol.5 (1997), S.211-228
- Arguello, Michael / Feo, T.A. / Goldschmidt, Oliver: Randomized methods for the number partitioning problem, *Computers Operations Research*, Vol.23 (2/1996), S.103-111
- BAA Heathrow: *Heathrow Airport – Conditions of Use including Airport Charges from 1 April 2007*, 2007
- Barnhart, Cynthia / Boland, Natasha / Clarke, Lloyd / Shenoi, Rajesh: Flight string models for aircraft fleet and routing, *Transportation Science*, Vol. 32 (3/1998), S.208-220
- Barnhart, Cynthia / Belobaba, Peter / Odoni, Amedeo (Barnhart, 2003): Applications of operations research in the air transport industry, *Transportation Science*, Vol. 37 (4/2003), S.368-391
- Bartlett, T.E. (Bartlett, 1957): An algorithm for the minimum number of transport units to maintain a fixed schedule, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 4 (1957), S.139-149

- Bard, Jonathan / Yu, Gang / Arguello, Michael (Bard, 2001): Optimizing aircraft routings in response to groundings and delays, IIE Transactions, Vol.33 (2001), S.931-947
- Böck, Philipp / Brückner, Björn / Peter, Phleps: Zusammenstellung verschiedener Methoden zur Berechnung der direkten Betriebskosten von Flugzeugen (DOC), LT-TB-08/12, Lehrstuhl für Luftfahrttechnik TU München, 2008
- Brown, G.G. / Dell, R.F. / Wood, R.K. (Brown 1997): Optimization and persistence, Interfaces, Vol. 27 (5/1997), S.15-37
- Cao, Jia-Ming / Kanafani, Adib [Kanafani, 1996]: Real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays Part II: algorithm and computational experiments, Transportation planning and technology, Vol.20 (1997), S.201-217
- Cao, Jia-Ming / Kanafani, Adib [Kanafani, 1996]: Real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays Part I: mathematical formulation, Transportation planning and technology, Vol.20 (1997), S.183-199
- Clarke, Micheal / Haight, Frank (Clarke, 1997): Development of heuristic procedures for flight rescheduling in the aftermath of irregular airline operations, Working Paper MIT, October 1997
- Clarke, Micheal: Development of heuristic procedures for flight rescheduling in the aftermath of irregular airline operations, PhD-Thesis, MIT, Februar 1998
- Clarke, Micheal / Button, Ken (Clarke, 1997): Irregular airline operations – a review of the state-of-the-practice in airline operations control centers, Working Paper MIT, October 1997
- Clarke, Micheal / Laporte, Gilbert (Clarke, 1997): The Airline Schedule Recovery Problem, Working Paper MIT, October 1997
- Clarke, Lloyd / Johnson, Ellis / Nemhauser, George / Zhu, Zhongxi (Lloyd, 1997): The aircraft rotation problem, Annals of Operations Research, Vol. 69 (1997), S.33-46

- Clarke, Lloyd / Hane, C. / Johnson, Ellis / Nemhauser, George: Maintenance and crew considerations in fleet assignment, *Transportation Science*, Vol. 30 (1996), S.249-260
- Clausen, Jens / Larsen, Allan / Larsen, Jesper: Disruption Management in the Airline Industry – Concepts, Models and Methods, Technical Report-2005-01, Informatics and Mathematical Modelling, 2005
- Clausen, Jens / Larsen, Jesper / Larsen, Allen / Hansen, Jesper: Disruption Management – Operations Research between planning and execution, Technical report, IMM-2001-15 Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2001
- Cohin, Amy / Barnhart, Cynthia (Cohin, 2003): Improving crew scheduling by incorporating key maintenance routing decisions, *Operations Research*, Vol. 51 (3/2003), S.387-396
- Commission for Aviation Regulation: 2005 Airport Charges, http://www.aviationreg.ie/2005_Airport_Charges/Default.120.html, 05.11.2008
- Cook, Andrew: Evaluating the true cost to airlines of one minute of airborne or ground delay, University of Westminster, 2004
- Dantzig, G.B. / Fulkerson, D.R.: Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 1 (1954), S.217-222
- De Villemeur, Etienne, Billette / Ivaldi, Marc / Quinet, Emile / Urdanoz, Miguel: The social cost of air traffic delays, part one: a survey, Institut d'économie industrielle, 2005
- Drexl, Andreas / Domschke, Wolfgang: Einführung in Operations Research, 6.Auflage, Berlin Heidelberg 2005
- Dühring, Thomas: Airline-Netzmanagement aus kybernetischer Perspektive – Ein Gestaltungsmodell, Verlag Paul Haupt Bern, Stuttgart, Wien, 1999
- Energy Information Administration: Daily Spot Prices of Low-Sulfur Diesel, Kerosene-Type Jet and Residual Fuels, and Propane, http://www.eia.doe.gov/oil_gas/petroleum/data_publications/weekly_petroleum_status_report/wpsr.html, 05.11.2008

- Etschmaier, Maximilian / Mathaisel, Dennis: Airline scheduling: an overview, *Transportation Science*, Vol. 19 (2/1985), S.127-138
- EuroControl: Digest – Annual 2006 Delays to Air Transport in Europe, Brüssel, 2007
- EuroControl: Digest – Annual 2005 Delays to Air Transport in Europe, Brüssel, 2006
- EuroControl: Digest – Annual 2004 Delays to Air Transport in Europe, Brüssel, 2005
- EuroControl: Digest – Annual 2003 Delays to Air Transport in Europe, Brüssel, 2004
- EuroControl: Digest – April 2009 Delays to Air Transport in Europe, Brüssel, 2009
- EuroControl: Digest – September 2009 Delays to Air Transport in Europe, Brüssel, 2009
- EuroControl: Digest – Annual 2007 Delays to Air Transport in Europe, Brüssel, 2008
- EuroControl: Standard Inputs for Eurocontrol cost benefit analyses, Brüssel, 2007
- EU: Commission Regulation (EC) No 2042/2003 on continuing airworthiness of aircraft and aeronautical products, parts and appliances, and on the approval of organizations and personnel involved in these tasks, *Official Journal of the European Union*, Brüssel, 2003 Stand: 2003
- EU: Regulation (EC) No. 261/2004, Regulation establishing common rules on compensation and assistance to passengers in the event of denied boarding and of cancellation or long delay of flights, Brüssel, 2004 Stand: 2004
- Evans, Antony, David: Responses to airport delays – a system study of Newark international airport, Master Thesis, MIT, 1998

- Feo, T.A. / Krishnamurthi, V. / Bard, J.F.: A GRASP for a difficult single machine scheduling problem, *Computers Operations Research*, Vol.18 (8/1991), S.635-643
- Feo, T.A. / Bard, J.F.: Flight scheduling and maintenance base planning, *Management Science*, Vol. 35 (12/1989), S.1415-1432
- Fielding, John P. / Bineid, Mansour: Development of a civil aircraft dispatch reliability prediction methodology, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 75 (6/2003), S.588-594
- Fielding, John P.: *Introduction to aircraft design*, 1. Auflage, Cambridge, 1999
- Fleuti, Emanuel / Hofman, Peter: *Aircraft APU Emissions at Zurich Airport*, Unique (Flughafen Zürich AG), 2005
- Fraport: Flughafenentgelte, Entgelte für Zentrale Bodenverkehrsdienstinfrastruktureinrichtungen, Flughafen Frankfurt-Main, 2006
- Gershkoff, I.: *Aircraft Shortage Evaluator*, ORSA/TIMS Joint National Meeting, St. Louis, MO (October), 1987
- Gierlich Thomas, Brueckner Bjoern: *Development and implementation of a software tool to analyse an airline's cost related to delay*, Lehrstuhl für Luftfahrttechnik, LT-SA 07/05, 2005
- Gopalan, Ram / Talluri, Kalyan: *Mathematical models in airline schedule planning: a survey*, *Annals of Operations Research*, Vol. 76 (1998), S.155-185
- Gopalan, Ram / Talluri, Kalyan: *The aircraft maintenance routing problem*, *Operations Research*, Vol. 46 (2/1998), S. 260-271
- Grandeau, Seth: *The process of airline operational control*, Master thesis, MIT, Februar 1995
- Grönkvist, Mattias: *The tail assignment problem*, thesis for the degree of doctor of philosophy, Göteborg University, 2005
- Guest, Tim: *Trends in Air Traffic Volume 2*, EuroControl, 2007

- Handelsblatt: Lufthansa verschärft Sparprogramm,
<http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/lufthansa-verschaerft-sparprogramm;2458869>, 15.12.2009
- Handelsblatt: Ryanair weiter im Aufwind - British Airways im Sinkflug,
<http://www.handelsblatt.com/newsticker/unternehmen/absatz-ryanair-weiter-im-aufwind-british-airways-im-sinkflug;2494145>,
15.12.2009
- Hane, Christopher / Barnhart, Cynthia / Johnson, Ellis / Marsten, Roy,
Nemhauser, George / Sigismondi, Gabriele: The fleet assignment
problem: solving a large scale integer program, *Mathematical
Programming*, Vol. 70 (1-3/1995), S.211-232)
- Hartung, Joachim / Elpelt, Bärbel / Klösener, Karl-Heinz: *Statistik: Lehr-
und Handbuch der angewandten Statistik*, 7.Auflage, Oldenbourg,
1989
- Hess, Stephane / Adler, Thomas / Polak, John, W.: Modeling airport and
airline choice behavior with the use of stated preference survey
data, *Transportation Research Part E* 43 (2007), S.221-233
- Hsu, Chaug-Ing / Wen, Yuh-Horng: Application of Grey Theory and
multiobjective programming towards airline network design, *Central
European Journal of Operations Research* 127 (2000), S.44-68
- IATA: *IATA Airport and Air Navigation Charges Manual*, Montreal-Geneva,
2001
- ITA: *Costs of air transport delay in Europe*, Institut du Transport Aerien,
2000
- Jacquemin, Mark: *Netzmanagement im Luftverkehr – Statische und
dynamisch Planungsmodelle zur Gestaltung von Hub&Spoke-
Flugnetzwerken*, Frankfurt am Main, 2005
- Jarrah, Ahmed / Yu, Gang: A decision support framework for airline flight
cancellations and delays, *Transportation Science*, Vol. 27 (3/1993),
S.266-280
- Jasvain, Leonid: *Integration der Unsicherheitsaspekte in die Schedule-
Optimierung*, 1.Auflage, Wiesbaden, 2006

- Jiang, Hai: Dynamic airline scheduling and robust airline schedule de-peak, Master Thesis, MIT, 2003
- Kinnison, Harry A.: Aviation Maintenance Management, New York, 2004
- Kohl, Niklas / Larsen, Allan / Larsen, Jesper / Ross, Alex / Tiourine, Sergey: Airline Disruption Management – Perspectives, experiences and outlook, Air Transport Management 13 (2007), S.149-162
- Lan, Shan / Clarke, John-Paul / Barnhart, Cynthia: Planning for robust airline operations: optimizing aircraft routings and flight departure times to minimize passenger disruptions, Transportation Science, Vol. 40 (1/2006), S.15-28
- Lan, Shan: Planning for robust airline operations: optimizing aircraft routings and flight departure times to achieve minimum passenger disruptions, Master Thesis, MIT, 2003
- Leibold, K.: Optimierung von Flugplänen – Anwendung quantitativer Methoden im Luftverkehr, Wiesbaden, 2001
- LBA: Erste Durchführungsverordnung zur Betriebsordnung für Luftfahrtgerät, 1.DVLuftBO, Stand: 18.Juni 2008
- Locks, M.O. / Pauler, G.L.: Simulation of dispatch reliability for a fleet of large commercial aircraft, Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1974
- Løve, Michael / Sørensen, Kim, Riis / Larsen, Jesper / Clausen, Jens: Disruption Management for an Airline – Rescheduling of Aircraft, Computer Science, Vol 2279 (2002), S.315-324
- Løve, Michael / Sørensen, Kim, Riis / Larsen, Jesper / Clausen, Jens: Using Heuristics to solve to dedicated aircraft recovery problem, Central European Journal of Operations Research 13 (2/2005), S-189-207
- Loy, Jason: Heuristics for airline schedule recovery via the virtual hub model, Master Thesis, MIT, 2004
- Lufthansa: Your Passenger Rights,
<http://www.lufthansa.com/online/portal/lh/cmnn/generalinfo?l=en&nodeid=2161511&cid=>, 04.11.2008

- Lüking, Jöst: Angebotsplanung und Fluggastverhalten im überlasteten Luftverkehrssystem, Bern, Peter Lang
- Luo, Songjun / Yu, Gang (Songjun, 1997): On the airline schedule perturbation problem caused by the ground delay program, Transportation Science, Vol.31 (4/1997), S.298-311
- Mathaisel, Dennis (Mathaisel, 1996): Decision support for airline system operations control and irregular operations, Computers Ops. Research, Vol.23 (11/1996), S.1083-1098
- MarketWatch: Unhappy travelers cost airlines \$9 billion revenue, <http://www.marketwatch.com/news/story/unhappy-travelers-cost-airlines-9/story.aspx?guid={B8460914-D02F-4D78-B45D-DF71B70BE4F3}>, 06.11.2008
- Maurer, Peter: Luftverkehrsmanagement, 4. Auflage, Oldenburg, 2006
- Mayer, Christopher / Sinai, Todd: Network effects, congestion externalities, and air traffic delays: or why all delays are not evil, University of Pennsylvania, 2002
- Meyers Lexikon Online : Opportunitätskosten, <http://lexikon.meyers.de/wissen/Opportunit%C3%A4tskosten>, 06.11.2008
- MIT: Airline Data Project, <http://web.mit.edu/airlinedata/www/default.html>, 15.12.2009
- Morin, Massimo: Metrics and methods for improving airline schedule reliability, Master Thesis, MIT, 1996
- Nasser, K.: Network flow optimization models for airline core activity control using the out of kilter algorithm, MS Thesis, Cranfield Institute of Technology, 1990
- OAG: Official Airline Guide, Demo CD, September 2004
- Orlin, James: Minimizing the number of vehicles to meet a fixed periodic schedules: an application of periodic posets, Operations Research, Vol. 30 (4/1982), S.760-776

- Rexing, Brian / Barnhart, Cynthia / Kniker, Tim / Jarrah, Ahmad / Krishnamurthy, Nirup: Airline Fleet Assignment with Time Windows, *Transportation Science*, Vol. 34 (1/2000), S.1-20
- Rabbani, Fabio / Faizi, Rahnemay: Implementation of an airline recovery model in an event-based simulation, Master Thesis, MIT, 2004
- Rade, L. / Westergren, B.: *Springers Mathematische Formeln*, 2. Auflage, Berlin Heidelberg New York, 1995
- Rakshit, Ananda / Krishnamurthy, Nirup / Yu, Gang (Rakshit, 1996): System operations advisor: a real-time decision support system for managing airline operations at united airlines, *Interfaces*, Vol. 26 (2/1996), S. 50-58
- Rosenberger, Jay / Schaefer, Andrew et al. (Rosenberger 2002): A stochastic model of airline operations, *Transportation Science*, Vol. 36 (4/2002), S.357-377
- Rosenberger, Jay / Johnson, Ellis / Nemhauser, George (Rosenberger 2003): Rerouting aircraft for airline recovery, *Transportation Science*, Vol. 37 (4/2003), S.408-421
- Rosenberger, Jay / Johnson, Ellis / Nemhauser, George (Rosenberger 2004): A robust fleet-assignment model with hub isolation and short cycles, *Transportation Science*, Vol. 38 (3/2004), S.357-368
- Rosenberger, Jay / Schaefer, Andrew et al. (Rosenberger 2000): Simair: a stochastic model of airline operations, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*
- Rosenberger, Jay / Johnson, Ellis / Nemhauser, George (Rosenberger 2004): A robust fleet-assignment model with hub isolation and short cycles, *Transportation Science*, Vol. 38 (3/2004), S.357-368
- Sauter-Servaes, Thomas / Rammler, Stephan: *Delaytainment an Flughäfen*, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH (WZB), Berlin, 2000
- Schmidt, Eberhard: *Handbuch Airlinemanagement*, München, 2000
- Talluri, Kalyan: Swapping applications in a daily airline fleet assignment, *Transportation Science*, Vol. 30 (3/1996), S. 237-248

- Teodorovic, Dusan: A model for designing the meteorologically most reliable airline schedule, *European Journal of Operational Research*, Vol. 21 (1985), S.156-164
- Teodorovic, Dusan / Stojkovic, Goran: Model to reduce airline schedule disturbances, *Journal of Transportation Engineering*, July/August (1995), S.324-331
- Teodorovic, Dusan / Stojkovic, Goran / Guberinio, S.: Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation, *European Journal of Operations Research*, Vol.15 (1984), S.178-182
- Teodorovic, Dusan / Stojkovic, Goran: Model for operational daily airline scheduling, *Transportation planning and technology*, Vol.14 (1990), S.273-285
- Thengvall, Benjamin / Yu, Gang / Bard Jonathan: Balancing user preferences for aircraft schedule recovery during irregular operations, *IIE Transactions*, Vol. 32 (2000), S.181-193
- Thengvall, Benjamin / Yu, Gang / Bard Jonathan: Multiple fleet aircraft schedule recovery following hub closures, *Transportation Research Part A*, Vol. 25 (2001), S.289-308
- Thengvall, Benjamin / Yu, Gang / Bard Jonathan: A bundle algorithm approach for the aircraft schedule recovery problem during hub closures, *Transportation Science*, Vol. 37 (4/2003), S.392-407
- Trautmann, Peter: Flughafenplanung und -betrieb, Vorlesung am Lehrstuhl für Luftfahrttechnik, TU München, 2008
- Yan, Shangyao / Young, Hwei-Fwa: A decision support framework for multi-fleet routing and multi-stop flight scheduling, *Transportation Research Part A*, Vol.30 (5/1994), S.379-398
- Yan, Shangyao / Tu, Yu-ping: Multifleet routing and multistep flight scheduling for schedule perturbation, *European Journal of Operational Research*, Vol.103 (1997), S.155-169
- Yan, Shangyao / Yang, Dah-Hwei: A decision support framework for handling schedule perturbation, *Transportation Research Part B*, Vol. 30 (6/1996), S.405-419

- Yan, Shangyao / Lin, Chung-Gee: Airline Scheduling for the Temporary closure of airports, *Transportation Science*, Vol. 31 (1/1997), S.72-82
- Yang, Weimin / Zhu, Yuan / Tu, Qingci / Sheng, Yixing: Simulation of commercial aircraft reliability, *Proceedings annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1991, S.112-119
- Yu, Gang / Arguello, Michael / Song, Gao / McCowan, Sandra / White, Anna: A new era for crew recovery at Continental airlines, *Interfaces*, Vol. 33 (1/2003), S. 5-22