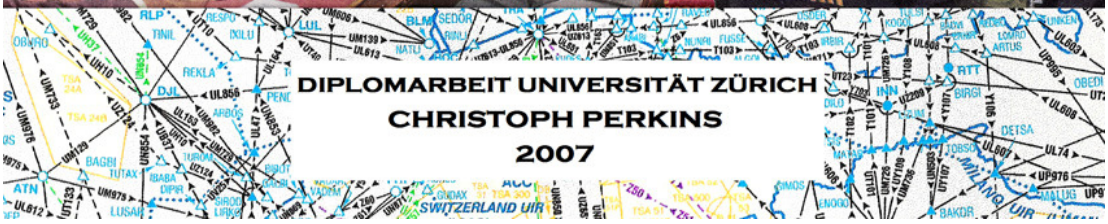
EFFIZIENTE FLUGROUTEN



DIPLOMARBEIT UNIVERSITÄT ZÜRICH
CHRISTOPH PERKINS
2007

Universität Zürich

Abteilung Wirtschaftsgeographie

Prof. Dr. Hans Elsasser

Diplomarbeit

EFFIZIENTE FLUGROUTEN

vorgelegt von: Christoph Perkins

Betreuung: Prof. Dr. Hans Elsasser, Universität Zürich
Matthias Schmitt, Lufthansa

Abgabedatum: 20. November 2007

Autor:

Christoph Perkins
Steinstrasse 20a
5406 Baden

Tel.: +41 (0)78 807 18 18
E-Mail: cperkins@geo.unizh.ch
E-Mail: christoph.perkins@gmail.com

www.perkins-aviation.ch
http://www.perkins-aviation.ch/ppl/contact_page.htm

Betreuer der Arbeit:

Matthias Schmitt

Lufthansa German Airlines
Operational Standards, FRA OZ/G-5
Lufthansa Base
D-60546 Frankfurt/Main

Tel.: +49 (0)69 / 696 2375
Fax: +49 (0)69 / 696 7070
E-Mail: matthias.schmitt@dlh.de

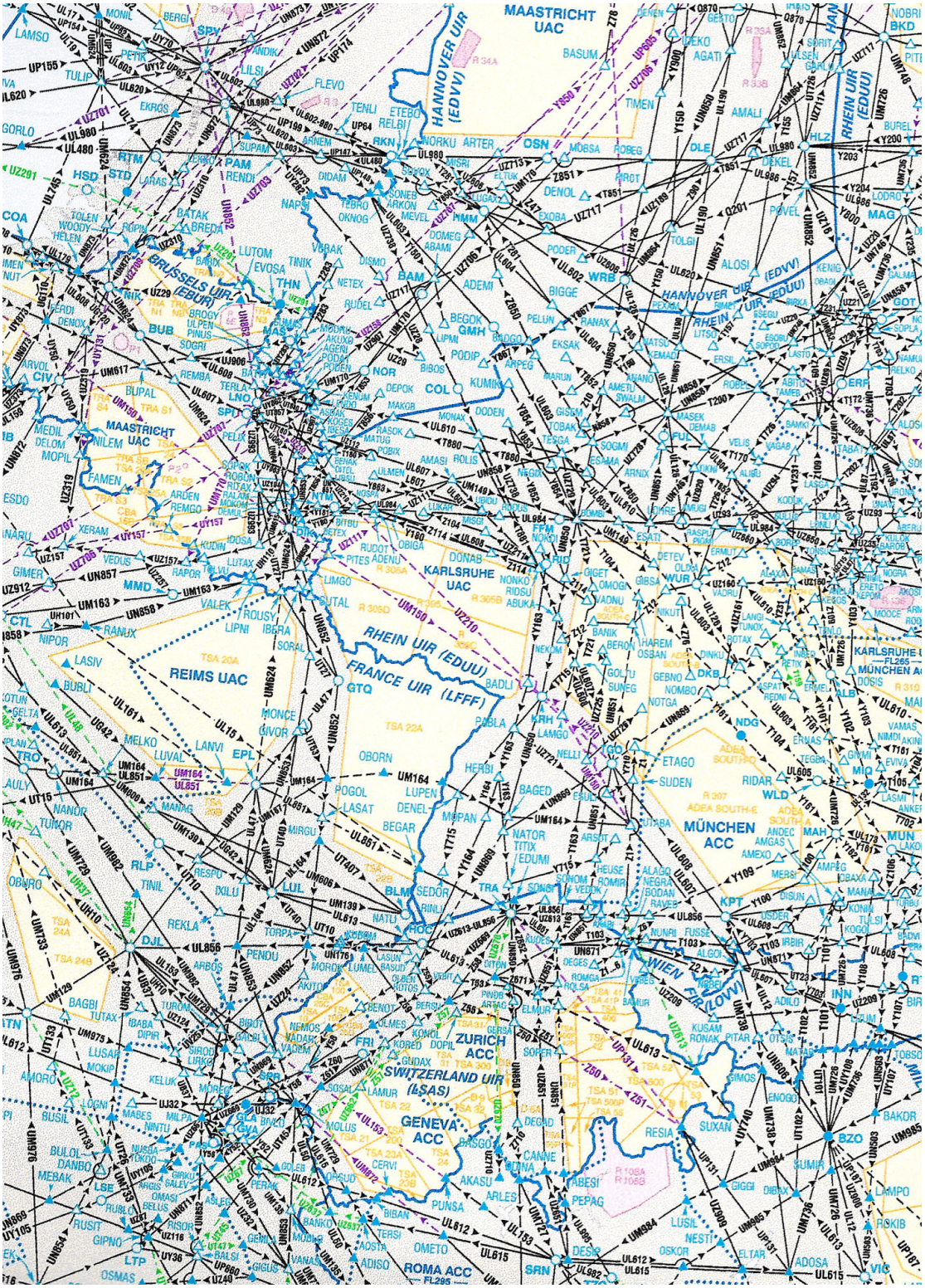


Abbildung 1: ATS-System in der Schweiz und ihren Nachbarländern.[1]

[1] EUROCONTROL.

Abstract

Der steigende Kostendruck und ein wachsendes Umweltbewusstsein werfen die Frage auf, wie direkt heute von A nach B geflogen wird. Dabei rückt das Netzwerk von Luftstrassen in den Fokus, das heute grosse Teile des Luftraumes strukturiert. Restriktionen im bestehenden System von Luftstrassen sowie fehlende Luftstrassen führen dazu, dass Flugrouten nicht effizient geplant werden können. Dadurch entstehen jährlich zusätzliche Kosten in Milliardenhöhe. Wie effizient sind also die bestehenden Flugrouten? Eine Alternative für die Zukunft ist Free Flight. Wie gross ist die Differenz zwischen dem Zustand heute und einem Free Flight Zustand? Weshalb und auf welchen Strecken treten im bestehenden System Ineffizienzen auf? Diese und andere Fragen greift die vorliegende Diplomarbeit auf und versucht, in zwei Studien eine quantitative Antwort zu geben. Dazu ist ein qualitatives Verständnis erforderlich, sodass die Gründe für Ineffizienzen genau so thematisiert werden wie die die grundsätzlichen Vorstellungen eines effizienten Fluges.

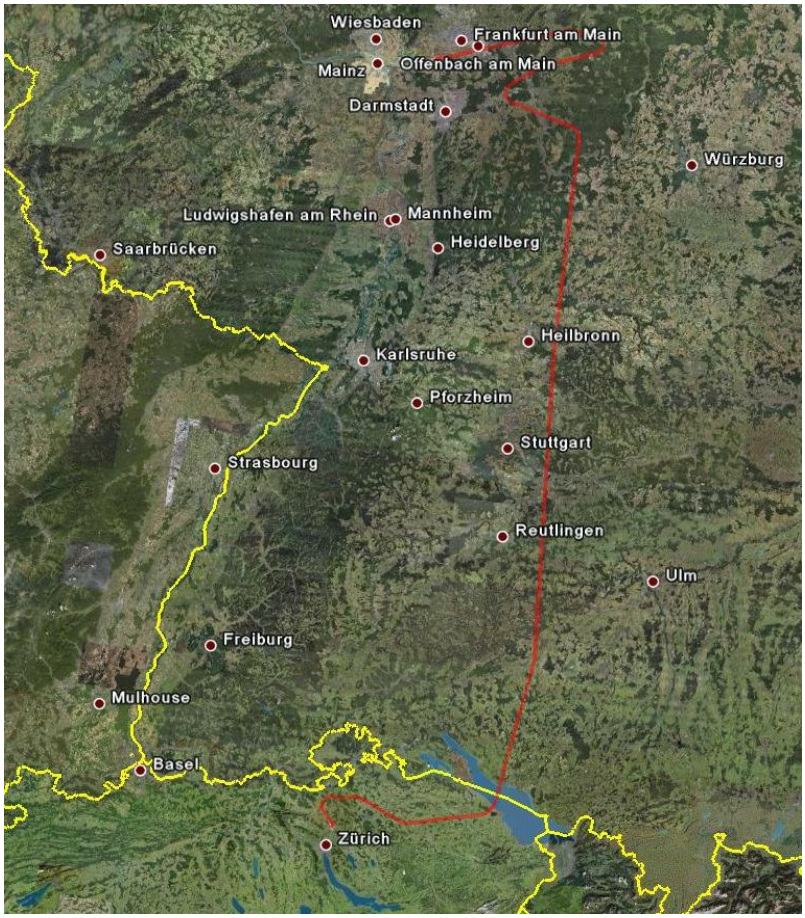


Abbildung 2: Flugwegaufzeichnung Zürich – Frankfurt, Sommer 2007.[2]

[2] Aufzeichnung per GPS, Darstellung in Google Earth.

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit hat ein Thema zum Gegenstand, das nicht als eines der klassisch geographischen Themen gilt. Das Thema Effiziente Flugrouten kann am ehesten als verkehrsgeographisches Problem im Rahmen der Geographie betrachtet werden. Die vorliegende Arbeit geht in einem Teilbereich der Luftfahrt jedoch wesentlich mehr in die Tiefe, als für eine verkehrsgeographische Analyse notwendig wäre. Dennoch ist der Autor der Ansicht, dass das gewählte Thema ein geographisches ist und sich zu Recht in der Wirtschaftsgeographie ansiedeln lässt. Die Fragestellung untersucht die Luft-*Raum*nutzung aus einer Effizienzperspektive, welche klar wirtschaftlichen Ansprüchen genügen muss. Dabei stehen organisatorische und praxisorientierte Prozesse der Raumgestaltung und Raumnutzung zur Diskussion. Der Luftraum als quasi hindernisfreier, dreidimensionaler Raum und die Bewegung zwecks wirtschaftlicher Austauschprozesse darin sind ebenso Rechtfertigung für die Fragestellung wie die Orientierung am Effizienzanspruch, diesen Raum so optimal wie möglich zu nutzen. Die Fragestellung ist weiter für die Klimapolitik und damit für umweltrelevante Betrachtungen von Bedeutung. Die Bearbeitung des Optimierungsproblems innerhalb gegebener Strukturen ist auch eine Frage Geographischer Informationssysteme und könnte als solche wiederum isoliert betrachtet werden. Die Art und Weise, wie die Frage Effizienter Flugrouten in dieser Arbeit untersucht wird, basiert denn auch vorwiegend auf der Nutzung Geographischer Informationssysteme, welche die notwendigen Anwendungen bereitstellen.

Diese Ausführungen zeigen, dass die Thematik nicht eine Frage eines einzelnen Fachgebietes ist, sondern aus einer Reihe von Blickwinkeln diskutiert werden kann. Die Bearbeitung eines Themas von mehreren Standpunkten ist eine für Geographen typische Vorgehensweise. In der Praxis, welche sich täglich mit der Frage effizienter Flugrouten auseinander setzt, gibt es primär zwei Akteure, welche einen unterschiedlichen Fokus haben: Einerseits gibt es die Betreiber von Luftfahrzeugen, welche damit Nutzer des Luftraums sind, allgemein Aircraft Operators (AO) genannt, andererseits gehört dazu die Organe der Flugsicherung, genant Air Navigation Service Provider (ANSP), welche den Luftraum gestalten und verwalten. Während die AO möglichst frei in der Routenwahl sein möchten, sind die ANSP an Ordnung schaffenden Restriktionen interessiert, um den Verkehr sicher leiten zu können. Ein umfassendes Bild zur Thematik lässt sich nur erhalten, wenn beide Blickwinkel eingenommen werden. Dabei lässt sich feststellen, dass genau dies in der Praxis unzureichend gemacht wird. In der Umsetzung dieser Betrachtung aus verschiedenen Blickwinkeln liegt eine Stärke

geographischer Arbeit, welche der Autor hier nutzen möchte, indem er mit je einem Akteur aus der Flugsicherung und einem aus dem Bereich der Flugzeugbetreiber eine Studie durchführt.

Das Thema wurde vom Autor aufgrund seiner sehr ausgeprägten Interessen an der Luftfahrt gewählt. Ein gewisses Hintergrundwissen ist unabdingbar, um das Thema bearbeiten zu können. Der fachunkundige Leser wird vermutlich über Begriffe und vorausgesetzte Sachverhalte stolpern, welche im Interesse eines lesbaren Umfangs nicht restlos erklärt werden können.

Die Idee der Arbeit entstand durch Beobachtungen von Kondensstreifen am wolkenlosen Himmel. Kondensstreifen sind eine Möglichkeit, den Flugweg eines Luftfahrzeuges von blossem Auge auf einem kleinen Ausschnitt seiner Reise zu verfolgen, da er eine Art Spur darstellt. Auffallend dabei ist, dass diese Spuren teils grosse Kurven von im Extremfall bis zu 60º und mehr im Reiseflug aufweisen. Es wurden Aufzeichnungen mittels GPS und Radar vorgenommen, welche die visuellen Beobachtungen am Himmel bestätigten indem sie es zuliessen, die Spuren am Himmel als Pfade auf einer Karte festzuhalten. Die geflogenen Kurven lassen auf Umwege schliessen und sind spontan nicht zu erklären, da keine Hindernisse am Himmel sichtbar sind und damit ein Flug grundsätzlich als gerade Verbindung zwischen zwei Flugplätzen vermutet wird. Gemäss dieser Überlegung würden am Himmel nur gradlinige Kondensstreifen ohne Krümmungen vermutet. Dass dem nicht so ist, lässt sich leicht an einem wolkenlosen Tag bestätigen. Die Frage, wieso diese Spuren am Himmel nicht in geraden Linien sondern gekrümmt verlaufen, hat die grundlegenden Fragen und Überlegungen für die Entstehung dieser Arbeit ausgelöst.

Zürich, im November 2007.

Inhalt

1 Einleitung XVII
1.1 Kondensstreifen - Spuren am Himmel als Denkanstoss 1
1.2 Begriffsdefinition: Effizienz 3
1.3 Quellenlage 4
1.4 Untersuchungsmethodik 5
2 Allgemeine Überlegungen zu effizienten Flügen 6
2.1 Benchmark: Free Flight 8
2.2 Verwendung der Begriffs „Free Flight“ 9
2.3 Verschiedene geographische Flugregionen 10
2.3.1 Ozeanische Strecken 11
2.3.2 Kontinentale Strecken 13
2.3.3 Europa 13
2.3.3.1 Nordamerika 15
2.3.3.2 Weitere Regionen 15
2.4 Einfluss von Windströmungen 16
2.5 Effizienz – mögliche Sichtweisen 17
2.6 Effizienter Flug 20
2.6.1 Optimale Horizontale Flugbahn 20
2.6.2 Optimale Vertikale Flugbahn 21
2.6.3 Optimale Geschwindigkeit 23
2.6.4 Optimale Geschwindigkeit II: Cost Index und ECON Mach 25
2.7 Flugplanung im FMS 27
2.8 Gründe für Abweichungen von effizienten Flugrouten 28
2.8.1 Militärische Lufträume 29
2.8.2 Das System der ATS-Routen 30
2.8.3 Kapazität im ATS-System 32
2.8.4 Restriktionen im ATS-System 33
2.8.5 Politische Differenzen 35
2.8.6 Meteorologische Gründe 36
2.8.7 Weitere Gründe 37
3 Studie *EUROCONTROL*: Kontinentale Flüge 39
3.1 Über die Studie 39
3.2 Wahl der Flugrouten 39
3.3 Daten 40
3.3.1.1 Filed (F) 41
3.3.1.2 Shortest (S) 41
3.3.1.3 Actual (A) 41
3.3.1.4 Direct (D) 42
3.3.1.5 Einteilung der Destinationen in Regionen 42
3.4 Programm, Auflösung und Optimierung 43
3.5 Vergleich der Werte 44
3.5.1 True Enroute Inefficiency 44
3.5.2 Route Design Inefficiency 45
3.5.3 ATC Delta 45
3.6 Resultate 45
3.6.1 True Enroute Inefficiency 46
3.6.1.1 Absoluter Vergleich 46
3.6.1.2 Relativer Vergleich 49

3.6.1.3 Gesamteinfluss 53
3.6.2 Route Design Inefficiency 55
3.6.2.1 Absoluter Vergleich 56
3.6.2.2 Relativer Vergleich 57
3.6.3 ATC Delta 60
3.6.3.1 Absoluter Vergleich 60
3.6.3.2 Relativer Vergleich 61
3.6.4 Gesamtresultat 63
3.7 Interpretation 65
3.7.1 Vergleich mit weiteren Studien 66
3.7.1.1 Auswertung des Traffic Samples von EUROCONTROL 66
3.7.1.2 Flight Efficiency Studies in Europe and the United States 67
3.7.2 Einschränkungen der Studie 68
4 Studie *Lufthansa*: Interkontinentale Flüge 69
4.1 Über die Studie 69
4.2 Wahl der Destinationen 69
4.2.1 Nordatlantik 70
4.2.2 Südatlantik 71
4.2.3 Afrika 71
4.2.4 Naher- und Mittlerer Osten 72
4.2.5 Ferner Osten 72
4.2.6 Nicht berücksichtigte Regionen 72
4.2.7 Intervalle der Berechnungen 72
4.3 Daten 73
4.3.1 CurRoute 73
4.3.2 AirwOpt 75
4.3.3 FreeGrid 75
4.4 Das Programm 76
4.4.1 Parameter für die Berechnungen 76
4.4.1.1 Flugzeugtyp 76
4.4.1.2 Fluggeschwindigkeiten 77
4.4.2 Auflösung des Grid 78
4.5 Optimierung 79
4.5.1 Optimierung der Werte 79
4.5.2 Algorithmus für die Optimierung: Dijkstra Algorithmus 82
4.6 Vergleiche der Werte 85
4.6.1 *CurRoute* versus *AirwOpt* 86
4.6.2 *AirwOpt* versus Free*Grid* 86
4.6.3 *CurRoute* versus *FreeGrid* 87
4.6.4 Verschiedene Vergleiche 87
4.7 Resultate 89
4.7.1 Absolute Zeitvergleiche 89
4.7.1.1 Einfluss der Restriktionen auf die Flugzeit 92
4.7.1.2 Einfluss der ATS Struktur auf die Flugzeit 93
4.7.1.3 Gesamter Einfluss auf die Flugzeit 97
4.7.1.4 Gesamter Einfluss auf die Flugzeit nach Flugregionen 99
4.7.1.5 Gesamter Einfluss auf die Flugzeit ohne Extremwerte 100
4.7.2 Relative Zeitvergleiche 101
4.7.2.1 Einfluss der Restriktionen auf die Flugzeit 102
4.7.2.2 Einfluss der Struktur des ATS auf die Flugzeit 103

4.7.2.3 Gesamter Einfluss auf die Flugzeit 105
4.7.2.4 Gesamter Einfluss auf die Flugzeit nach Flugregionen....106
4.7.3 Zusammenfassung der Resultate 107
4.8 Interpretation 111
4.8.1 Vergleich mit einer Studie von Swiss 111
4.8.2 Einschränkungen der Studie 113
4.8.3 Beispiel einer Streckenanalyse: Osaka....115
4.8.3.1 Untersuchung der Strecke Frankfurt - Osaka 116
4.8.3.2 Untersuchung der Strecke Osaka – Frankfurt....119
5 Diskussion....120
5.1 Eine Hochrechnung des Free Flight Potenzials 122
5.2 Aktuelle Trends zur Verbesserung der Effizienz 125
Literatur- und Quellenverzeichnis....130
Anhang....135
A Kondensstreifen 135
A.I Entstehung von Kondensstreifen....135
B EUROCONTROL....138
B.I Liste aller berücksichtiger Destinationen: 138
B.II Liste aller Strecken und der Flugfrequenz 04.-10.07.2007 139
B.III Liste der ECAC Länder....141
B.IV Zuteilung der Destinationen nach Regionen....141
B.V Weitere Resultate....143
B.VI Resultate von EUROCONTROL zu den Swiss Daten 144
B.VII Resultate von EUROCONTROL zu den Euro Daten 145
C LUFTHANSA 146
C.I ECON-fuel Lufthansa Boeing 747-400 146
C.II ATC Gebühren als Grund für Kostendifferenz MFT/ MTT 147
C.III Berechnung der Rasterauflösung für die Werte Grid....148
C.IV Dijkstra Algorithmus: Beispiel 149
C.V Treibstoffverbrauch Boeing 747-400 150
C.VI Extra Fuel Boeing 747-400....151
C.VII Excel Tabelle Lufthansa Studie....152
C.VIII Beispiel Ausgangsdaten in Papierformat 153
C.IX Erklärung für die Nicht-Berücksichtigung von Zürich – Hong Kong ...154
D Diskussion 157
D.I Ankünfte unmittelbar nach Ende Nachtflugsperre....157
D.II Werte und Verfahren für die Hochrechnungen 159
E Liste der Kontaktpersonen....163
E.I Deutsche Lufthansa....163
E.II EUROCONTROL....163
E.III Skyguide....163
E.IV Swiss International Air Lines 163
F Meetings....164

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ATS-System in der Schweiz und ihren Nachbarländern. IV
Abbildung 2: Flugwegaufzeichnung Zürich – Frankfurt, Sommer 2007. V
Abbildung 3: Beobachtungen am Himmel, welche zur Fragestellung führten. 2
Abbildung 4: SBS-1 Ausschnitt über der Nordschweiz, 08:30 – 08.45 Uhr am 15. November 2007. Die Linien sind Flugspuren des Transit-Verkehrs über FL 300. 2
Abbildung 5: Treibstoffpreise zwischen Januar 2003 und September 2007. 6
Abbildung 6: Massnahmen zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs von JAL. 7
Abbildung 7: Globaler Treibstoffverbrauch durch die Aviatik zwischen 2000 und 2004. Blau = geringe Intensität, gelb = mittlere Intensität, rot = hohe Intensität. 10
Abbildung 8: NAT Region mit Tracks in östlicher Richtung (nachts). In Textform die Definitionen der Tracks durch Navigationspunkte (am Kontinentalrand) und Koordinaten (über dem Atlantik). 12
Abbildung 9: Central FAB (dunkel), bestehend aus 6 Staaten und 7 Flugsicherungen. 14
Abbildung 10: Direct-To Tool, ursprünglicher Kurs gegenüber direktem Kurs. 15
Abbildung 11: Jetstream: Typen, Lage und Richtung in Abhängigkeit der Jahreszeit. 17
Abbildung 12: Verlauf der vier Minimum Tracks auf der Strecke Frankfurt – Montreal am 03.September 2007. 19
Abbildung 13: Long Range Cruise Tabelle, grau Optimum Flight Level gemäss Verbrauch pro Distanz (NM/1000kg) für Airbus A320. 22
Abbildung 14: Vertikale Flugbahn: Idealtrajektorie und Step Climbs. 23
Abbildung 15: MRC (Kreis) und LRC (Stern) zeigen Reichweite (SR) pro Pfund Treibstoff im Vergleich zur Geschwindigkeit (Mach). Die Einheit NM ist in diesem Fall als Distanz in der Luft und nicht gegenüber Grund gemeint. 24
Abbildung 16: Gesamtkosten (Total Costs) aus Fuel Costs und Time Costs. M_{OPT} ist die Geschwindigkeit, bei welcher die gesamten Kosten am tiefsten sind. 25
Abbildung 17: SR (Berücksichtigung von Treibstoffverbrauch) und SR_E (Berücksichtigung von Zeit- und Treibstoffkosten) bei verschiedenen Geschwindigkeiten. 26
Abbildung 18: Integrationsroutine: Performance/ Predictions-Modul eines FMS. 28
Abbildung 19: Militärische Lufträume in Europa. 29
Abbildung 20: Routenstruktur über Afrika, primär Nord-Süd Verlauf (graue Linien). Die gestrichelten Ost-West Linien stellen gewünschte Verbindungen für einen AO in der Golfregion dar. Verfügbar sind jedoch nur die geknickten Ost-West Verbindungen (schwarze Linien). 31
Abbildung 21: Flug Dakar – Jeddah am 3.September 2007. 31
Abbildung 22: Flugstrecke London City – Zürich, Juli 2007: rot = Flugplan, dunkelgrün = tatsächlich geflogene Strecken (nur wo abweichend von rot), blau = direkte Verbindung (theoretisch), hellgrün = UL15. 33
Abbildung 23: Grund für Flight Level Capping: Langstrecke (blau), Kurstrecke (rot). 34
Abbildung 24: Flüge von Zürich nach Pristina im Juli 2007: rot = Flugplan, grün = tatsächlich geflogene Strecken (wo abweichend von rot), blau = direkte Verbindung (theoretisch). 36
Abbildung 25: Wetterbedingte Einflüsse auf den Flugverkehr, aufgeteilt nach Effizienz und Sicherheit. 37
Abbildung 26: Einteilung in 8 Himmelsrichtungen nach der Kompassrose. 43
Abbildung 27: True Enroute Inefficiency. 44
Abbildung 28: True Enroute Inefficiency, absoluter Vergleich Actual (A) – Direct (D3), 192 Flüge. 47
Abbildung 29: True Enroute Inefficiency, absoluter Vergleich Actual (A) – Direct (D3), geringste und grösste 10 Werte. 48
Abbildung 30: Flug Hurghada – Zürich, Juli 2007. 49
Abbildung 31: Flug Zürich – Stuttgart, Juli 2007; rot = geplante Flugrouten, grün = Abkürzungen von den geplanten Flugrouten, blau = direkte Verbindung, rosa = militärische Sperrgebiete (zeitabhängig). 49
Abbildung 32: True Enroute Inefficiency, relativer Vergleich Actual (A) – Direct (D3), geringste und grösste 10 Werte. 50
Abbildung 33: True Enroute Inefficiency, absoluter Vergleich Actual (A) – Direct (D3), 192 Werte, gegliedert nach Regionen. 51
Abbildung 34: True Enroute Inefficiency, relativer Vergleich Actual (A) – Direct (D3), 192 Werte, Mittelwerte gegliedert nach Regionen, Vergleich mit (dunkel) und ohne (hell) Extremwerte. 52
Abbildung 35: An- (violett) und Abflugverfahren (orange) von Zürich. 53
Abbildung 36: Die 20 effizienzschwächsten Strecken im Netzwerk von Swiss für die betrachtete Woche im Juli 2007. Absolute Betrachtung zusätzlich geflogener Distanzen (in NM) als Resultat von Actual (A) – Direct (D3). Summe aller Flüge in dieser Woche. 54
Abbildung 37: Flug London City – Zürich, rot = geplante Flugrouten, grün = Abkürzungen von den geplanten Flugrouten, blau = direkte Verbindung, rosa = militärische Sperrgebiete (zeitabhängig). 55

Abbildung 38: Route Design Inefficiency, absoluter Vergleich Shortest (S) – Direct (Ds), geringste und grösste 10 Werte. *56*
Abbildung 39: Route Design Inefficiency, relativer Vergleich Shortest (S) – Direct (Ds), 192 Flüge. *57*
Abbildung 40: Flug Zürich – Luxembourg, rot = geplante Flugrouten, grün = Abkürzungen von den geplanten Flugrouten, blau = direkte Verbindung, rosa = militärische Sperrgebiete (zeitabhängig). *58*
Abbildung 41: Luftraum über Ost-Frankreich, Double Crossover. *59*
Abbildung 42: Route Design Inefficiency, relativer Vergleich Shortest (S) – Direct (Ds), geringste und grösste 10 Werte. *60*
Abbildung 43: ATC Delta, absoluter Vergleich Filed (F) – Actual (A), 192 Flüge. *61*
Abbildung 44: ATC Delta, relativer Vergleich Filed (F) – Actual (A), 192 Flüge. *62*
Abbildung 45: ATC Delta, relativer Vergleich Filed (F) – Actual (A), geringste und grösste 10 Werte. *63*
Abbildung 46: Mittelwerte der Ineffizienz in den verschiedenen Szenarien. *64*
Abbildung 47: True Enroute Inefficiency (Actual – Direct) in Abhängigkeit von der Streckenlänge, gleichzeitig dargestellt ist die Anzahl Strecken der jeweiligen Segmente. *65*
Abbildung 48: Klassierung und Auswahl der Destinationen für die Studie. Roter Kreis = Gruppe, weisse Schrift = Vertreter, Verbindungen als Great Circle dargestellt. *70*
Abbildung 49: Flug Frankfurt – Tokio, alle 9 vordefinierten Routen (CurRoute) am 09. August 2007mit den korrespondierenden Flugrouten, teils überlappend. *74*
Abbildung 50: Auswertung der 9 vordefinierten Routen (CurRoute). TRIP = Treibstoff in Kilogramm, TTIME = Gesamtflugzeit (bis zur Destination), ETA = Erwartete Ankunftszeit (hier fiktiv), COSTS = Kosten in US-Dollar für den gesamten Flug. *75*
Abbildung 51: Einstellung der Fluggeschwindigkeit auf der Gridworkstation. *78*
Abbildung 52: Flug Frankfurt – Miami vom 21. August 2007; Minimum Fuel Track (MFT) verglichen mit Minimum Time Track (MTT). *80*
Abbildung 53: Analyse des Fluges Frankfurt – Miami vom 21. August 2007; OFP No 1 ist der MFT, OFP No 2 ist der MTT. TTIME = Zeit, TRIP = Treibstoff in Kilogramm. *81*
Abbildung 54: Flug Frankfurt – Miami, 21. August 2007; blaue Linie = MTT, schwarze Linie = MFT. *82*
Abbildung 55: Target Area für die Berechnung des Dijkstra-Algorithmus. *84*
Abbildung 56: Max Factor, MinDist und MaxDist für die Berechnung des Dijkstra-Algorithmus *85*
Abbildung 57: Flug Denver – Frankfurt, ermittelte Flugzeiten in Minuten. Die untere Hälfte wertet die oben stehenden 7 Werte aus. *90*
Abbildung 58: Flug Denver – Frankfurt, graphische Darstellung der ermittelten Flugzeiten in Minuten. *90*
Abbildung 59: Flug Denver – Frankfurt im Juli/ August 2007, ermittelte Differenzen (absolut) zwischen den Flugzeiten. Die untere Hälfte wertet die oben stehenden 7 Werte aus. *91*
Abbildung 60: Flug Denver – Frankfurt, Total sowie Aufteilung der Differenz nach Restriktionen (AirwOpt – FreeGrid) und Mangel an Luftstrassen (CurRoute – AirwOpt) der Flugzeiten. Alle Angaben in Flugminuten. *91*
Abbildung 61: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz in Minuten, Aktuelle Routen (CurRoute) gegenüber Optimum im ATS (AirwOpt). *92*
Abbildung 62: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz in Minuten, Optimum im ATS (AirwOpt) gegenüber Freien Flügen (FreeGrid). *94*
Abbildung 63: Flug Osaka – Frankfurt, grün = Optimum im ATS (AirwOpt), rot = Freier Flug (FreeGrid). *95*
Abbildung 64: Flug Osaka – Frankfurt, grün = Optimum im ATS (AirwOpt), rot = Freier Flug (FreeGrid), rosa = Luftstrassen, gelb = Landesgrenzen. *96*
Abbildung 65: Flug Osaka – Frankfurt, dargestellt in Google Earth, grün = Optimum im ATS (AirwOpt), rot = Freier Flug (FreeGrid), rosa = Luftstrassen, gelb = Landesgrenzen. *96*
Abbildung 66: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz in Minuten, Aktuelle Routen (CurRoute) gegenüber Freien Flügen (FreeGrid). *97*
Abbildung 67: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz, Anteile an der Gesamtdifferenz. Restriktionen (CurRoute – AirwOpt) und Fehlende Strukturen (AirwOpt – FreeGrid). *98*
Abbildung 68: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz nach Flugregionen. *99*
Abbildung 69: Gesamtabweichung (absolute Differenz der Flugzeiten in Flugminuten) nach Flugregionen. *100*
Abbildung 70: Gesamtabweichung (absolute Differenz der Flugzeiten in Flugminuten) nach Flugregionen, ohne Extremwerte. *100*
Abbildung 71: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz nach Flugregionen mit (dunkelgrau) und ohne (hellgrau) Extremwerte. *101*
Abbildung 72: Relativer Vergleich der Flugzeitendifferenz, Aktuelle Flugrouten (CurRoute) gegenüber dem Optimum im ATS (AirwOpt). *103*

Abbildung 73: Relativer Vergleich der Flugzeitendifferenz, Optimum im ATS (AirwOpt) gegenüber Freien Flügen (FreeGrid). *104*
Abbildung 74: Relativer Vergleich der Flugzeitendifferenz, Gesamte Differenz (Aktuelle Routen, CurRoute, gegenüber Freien Flügen, FreeGrid). *105*
Abbildung 75: Relativer Vergleich der Flugzeitendifferenzen, Aufteilung der Differenz in Restriktionen (CurRoute – AirwOpt) und Strukturen (AirwOpt – FreeGrid). *106*
Abbildung 76: Relativer Vergleich der Flugzeitendifferenz, nach Flugregionen. *107*
Abbildung 77: Absoluter Vergleich der Aufteilung der Differenz in Flugminuten, geordnet nach Flugregionen (Mittelwerte). *108*
Abbildung 78: Relativer Vergleich der Aufteilung des Totals nach Flugregionen. Die Summe der beiden Prozentwerte ist wegen der abweichenden Berechnungsgrundlage nicht gleich der relativen Gesamtabweichung, was die Unterschiede zu anderen Darstellungen erklärt (marginale Differenz von bis zu 0.1%). *109*
Abbildung 79: Differenzen aus der Studie von Swiss Flight Dispatch zwischen heutigen Strecken und Free Flight. *113*
Abbildung 80: Flüge zwischen Frankfurt und Osaka, Mittelwerte der Flugzeiten in Minuten. *115*
Abbildung 81: Flugrouten FreeGrid von Frankfurt nach Osaka für alle Quartale. *116*
Abbildung 82: Detailkarte von FreeGrid Flügen von Frankfurt nach Osaka. *117*
Abbildung 83: Neu geplante Strecke durch Chinesischen und Nordkoreanischen Luftraum (Pyongyang FIR, gelb). *118*
Abbildung 84: Kumulierte jährliche Treibstoffersparnis in Tonnen Kerosin für Free Flight verglichen mit dem heutigen Zustand. *123*
Abbildung 85: Jährliche Kostendifferenz zwischen dem heutigen Zustand und Free Flight. *124*
Abbildung 86: Alert und Protected Zone als methodische Ansätze eines Systems zur eigenständigen Separation. *126*
Abbildung 87: Prozesse bei der Entstehung von Kondensstreifen *136*
Abbildung 88: Appleman-Chart, zeigt Abhängigkeit der Kondensstreifen-Bildung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit. *137*
Abbildung 89: Einteilung der Strecken in Regionen: N, NO, O, SO, S, SW, W, NW *142*
Abbildung 90: True Enroute Inefficiency, relativer Vergleich Actual (A) – Direct (D3), 192 Flüge. *143*
Abbildung 91: Route Design Inefficiency, absoluter Vergleich Shortest (S) – Direct (Ds), 192 Flüge. *143*
Abbildung 92: ATC Delta, absoluter Vergleich Filed (F) – Actual (A), geringste und grösste 10 Werte. *144*
Abbildung 93: Auswertung von EUROCONTROL mit Swiss Daten vom 04.-10.07.2007. ..... *144*
Abbildung 94: Auswertung von EUROCONTROL mit europaweiten Daten vom 04.-10.07.2007. ..... *145*
Abbildung 95: Economic Cruise, Boeing 747-400. ..... *146*
Abbildung 96: ATC Gebühren auf dem MTT Flug Frankfurt – Miami vom 21. August 2007. ..... *147*
Abbildung 97: ATC Gebühren auf dem MFT Flug Frankfurt – Miami vom 21. August 2007. ..... *148*
Abbildung 98: Beispiel für Dijkstra-Algorithmus, Schritte 1 bis 5. ..... *149*
Abbildung 99: Beispiel für Dijkstra-Algorithmus, Schritte 6 bis 9. ..... *150*
Abbildung 100: Flug Osaka – Frankfurt (links) und Flug Frankfurt - Teheran, Briefing Packages. Die Intransparenz der Treibstoffpreise reduziert die Aussagekraft, weshalb dies lediglich als anschauliches Beispiel gewertet werden darf. *151*
Abbildung 101: Beispiel einer Fluganalyse mit Berechnung von CurRoute (OFP 1), AirwOpt (OFP 2) und FreeGrid (OFP 3), Flug FRA-SFO am 31.08.2007. ..... *153*
Abbildung 102: Klassische Strecke über Urumqi (B215/ B330) und L888 (FANS) Route über das Hochland von Tibet. *155*
Abbildung 103: Swiss Flug Zürich – Hong Kong via SARIN-HMI-YBL-DOREX, 23.08.2005. Deutlich sichtbar der gezackte Verlauf über China. *156*
Abbildung 104: Flug Frankfurt – Hong Kong, Quartal Jul-Sep (Lufthansa), rot = Great Circle. *157*
Abbildung 105: Ankünfte in Zürich zwischen 06.00 und 06.25 Uhr, erwartete Ankunftszeiten sind bei bereits abgeflogenen Flugzeugen eingetragen. LX183 ist eventuell bereits 6 Minuten vor 06:00 Uhr da. *158*
Abbildung 106: Pseudo-Radarbild Nordschweiz, 15.11.2007, 05.36 bis 05.55 Uhr. *159*
Abbildung 107: Eingangsparameter (Blockstundensatz) für die Hochrechnungen. *160*
Abbildung 108: Monatliche Frequenzen auf den einzelnen Strecken. *161*
Abbildung 109: Verkehrszahlen (Frequenzen) von OAG, Juli 2007. ..... *161*

Glossar

3D	=	Dreidimensional (Koordinaten plus Höhe)
3-letter-code	=	Abkürzung anhand von drei Buchstaben für jeden Flughafen, durch ICAO festgelegt
4D	=	Vierdimensional (dreidimensional plus Zeit)
ADEP	=	Airport Departure (Startflughafen)
ADES	=	Airport Destination (Zielflughafen)
Airway	=	Luftstrasse
AO	=	Aircraft Operator (Betreiber von Luftfahrzeugen)
AND	=	Airspace Network Design (EUROCONTROL)
ANSP	=	Airspace Navigation Service Provider (Organe der Flugsicherung)
APN	=	Airspace, Network Planning & Navigation (EUROCONTROL)
ATM	=	Air Traffic Management
ATS	=	Air Traffic Services (Strukturen der Flugsicherung)
ATC	=	Air Traffic Control, Sammelbegriff für Flugsicherung
Blockzeit	=	Zeit vom Wegrollen für den Start bis zum Stillstand auf der Parkposition nach der Landung
Bottom Ten	=	Geringste/ niedrigste 10 Werte
CFMU	=	Central Flow Management Unit (EUROCONTROL)
Codeshare	=	Abkommen zwischen zwei Fluggesellschaften für den Verkauf von Kapazitäten (Sitzplätze) auf den Flugzeugen des Partners.
Conditional routes	=	Flugstrecken, welche von mehreren Partnern beansprucht werden und daher nur zu bestimmten Zeiten für die allgemeine Luftfahrt verfügbar sind (z.B. TRA).
Controller	=	Kontroller, Fluglotse
CPDLC	=	Controller Pilot Data Link Communication
Decompression	=	Druckabfall in der Kabine des Flugzeugs
Direct To	=	Direkter Kurs auf einen Navigationspunkt zu
DLH	=	Deutsche Lufthansa
Eastbound	=	In östlicher Richtung
ECON Mach	=	Entspricht SR_E
En route	=	Im Reiseflug, Streckenabschnitt auf der Route ohne besondere Verfahren, entspricht dem Abschnitt zwischen SID und STAR
EUR	=	European Routes, Strukturform der Flugsicherung
EUROCONTROL	=	Dachorganisation der meisten europäischen Flugsicherungen
FAA	=	Federal Aviation Administration, US-amerikanische Luftfahrtaufsichtsbehörde
FAB	=	Functional Airspace Block
FANS	=	Future Air Navigation System
FIR	=	Flight Information Region (Luftraumeinheit)
Flight Level (FL)	=	Flughöhe gemessen am Standardluftdruck der Luftfahrt (1013.25 hPa)
FMS	=	Flight Management System

Fuss (ft)	=	Feet (Fuss), häufig verwendete Einheit der Luftfahrt, 1 Fuss = 0.3048 Meter
GNSS	=	Global Navigation Satellite System
GPS	=	Global Positioning System (US GNSS)
Great Circle	=	Grosskreis, kürzeste Verbindung auf einer Kugeloberfläche
Holding	=	Warteschleife, Manöver im Warteraum „an Ort und Stelle“
Hub	=	Luftfahrt-Drehkreuz, Verkehrsknotenpunkt, umgangssprachlich bekannt als „Umsteigeflughafen“
IAS	=	Indicated Air Speed (angezeigte Fluggeschwindigkeit)
IATA	=	International Air Transport Association, Dachverband der Fluggesellschaften
ICAO	=	International Civil Aviation Organisation, Internationale Zivilluftfahrt Behörde
ISA	=	International Standard Atmosphere, Int. Standardatmosphäre, durch ICAO definiert
Knoten	=	Einheit für Fluggeschwindigkeit, entspricht NM pro Stunde
LRC	=	Long Range Cruise
Mach	=	Fluggeschwindigkeit als Anteil an der der Schallgeschwindigkeit
Minimum Track	=	Flugweg, minimiert nach gewissen Kriterien
MCT	=	Minimum Cost Track
MDT	=	Minimum Distance Track
MFT	=	Minimum Fuel Track
MRC	=	Maximum Range Cruise
MTT	=	Minimum Time Track
NAM	=	Nautical Air Mile
NAR	=	North American Routes, Strukturform der Flugsicherung
NM	=	Nautische Meile, entspricht 1.852 Kilometer, typisches Distanzmass der Luftfahrt
NDB	=	Non Directional Beacon (Navigationshilfe)
OFP	=	Operational Flight Plan, Flugplan
OTS	=	Organised Track System, System von Tracks
NAT	=	North Atlantic, Flugsicherungsregion über Nordatlantik
NGATS	=	Next Generation Air Transportation System (USA)
Rerouting	=	Umplanung einer bereits geplanten Strecke
RNAV	=	Random Area Navigation, Navigation unabhängig von Luftstrassen
RNP	=	Required Navigation Performance, Standards zur Genauigkeit der Navigation, in Klassen nach Abweichungsmagnitude strukturiert
Routing	=	Flugweg von Start- bis Zielflughafen
RVSM	=	Reduced Vertical Separation Minima
SAT	=	South Atlantic, Flugsicherungsregion über Südatlantik
Separation	=	Einhaltung von Abständen zwischen Flugzeugen
SES	=	Single European Sky, Initiative zur Harmonisierung der europäischen Lufträume durch EUROCONTROL
SID	=	Standard Instrument Departure
Slot	=	Zeitfenster, zugeteilt durch die Flugsicherung
SR	=	Specific Range
SR_E	=	Specific Range Economy

Staffelung	=	Siehe Separation
STAR	=	Standard Terminal Arrival Route
Straight in	=	Direkter Landeanflug, gerader Flug vom Reiseflug auf die Landepiste
Step Climb	=	Verfahren zum stufenweisen Steigen im Reiseflug
Swiss	=	Swiss International Air Lines
Track	=	Pfad eines Fluges über Grund
TAS	=	True Air Speed (tatsächliche Fluggeschwindigkeit)
TBO	=	Trajectory Based Operations
TCAS	=	Traffic Alert and Collision Avoidance System, Kollisionswarnsystem an Bord von Flugzeugen
TMA	=	Terminal Area, Nahverkehrszone der Flugsicherung im Bereich von Flughäfen
Top Ten	=	Höchste/ Grösste 10 Werte
TRA	=	Temporary Restricted Area, Sperrzone der Flugsicherung, häufig militärische Lufträume
Vectoring	=	Koordination von Flugverkehr durch die Anweisung, einen bestimmten Vektor zu fliegen
VHF	=	Very High Frequency (Ultrakurzwelle)
VOR	=	Very High Frequency Omnidirectional Radio Range (Navigationshilfe)
Waypoint	=	Navigationspunkt, Wegpunkt auf einer Strecke
Westbound	=	In westlicher Richtung

Verzeichnis der verwendeten Flughafen Abkürzungen[3]:

AGP	=	Malaga	DXB	=	Dubai
AMS	=	Amsterdam	FAO	=	Faro
ARN	=	Stockholm	FCO	=	Rom
ATH	=	Athen	FRA	=	Frankfurt
AYT	=	Antalya	FUE	=	Fuerteventura
BCN	=	Barcelona	GPA	=	Araxos
BEG	=	Belgrad	GRU	=	Sao Paulo
BHX	=	Birmingham	GVA	=	Genf
BJV	=	Bodrum	HAJ	=	Hannover
BRU	=	Brüssel	HAM	=	Hamburg
BSL	=	Basel	HER	=	Heraklion
BUD	=	Budapest	HKG	=	Hong Kong
CAI	=	Kairo	HRG	=	Hurghada
CCS	=	Caracas	IBZ	=	Ibiza
CDG	=	Paris	INV	=	Inverness
CFU	=	Korfu	IST	=	Istanbul
CGN	=	Köln	JED	=	Jeddah
CPH	=	Kopenhagen	JER	=	Jersey
DEN	=	Denver	JFK	=	New York
DJE	=	Djerba	JNB	=	Johannesburg
DME	=	Moskau	JTR	=	Santorini

[3] für weitere Details zu den Flughäfen: http://www.tripblab.com/Airports.aspx.

DUB = Dublin
DUS = Düsseldorf
KIX = Osaka
KRT = Khartoum
LCY = London City
LHR = London Heathrow
LIS = Lissabon
LOS = Lagos
LPA = Las Palmas
LUG = Lugano
LUX = Luxembourg
MAA = Madras/ Chennai
MAD = Madrid
MAN = Manchester
MAH = Mahon
MIA = Miami
MIR = Monastir
MUC = München
MXP = Mailand
NCE = Nizza
NOC = Knock
NQY = Newquay/ St.Mawgan
NUE = Nuernberg
OLB = Olbia
OPO = Porto
OTP = Bucharest
PMI = Palma de Mallorca
PRG = Prag
PRN = Pristina
REU = Reus
RHO = Rhodos
SFO = San Francisco
SIN = Singapur
SKG = Thessaloniki
SNN = Shannon
SSH = Sharm-el-Sheik
STN = London Stansted
STR = Stuttgart
THR = Teheran
KEF = Keflavik
KGS = Kos
TIP = Tripolis
TLV = Tel Aviv
TXL = Berlin
VCE = Venedig
VIE = Wien
VLC = Valencia
WAW = Warschau
ZRH = Zürich
ZTH = Zakynthos

In der vorliegenden Arbeit wurde im Sinne eines gewissen Lesekomforts auf die simultane Anwendung der beiden Geschlechterformen verzichtet. Wenn jeweils die eine Form verwendet wurde, so steht diese stellvertretend stets auch für das andere Geschlecht.

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, einen quantitativen Vergleich zwischen der heute herrschenden Effizienzsituation auf Flugrouten und einem in ferner Zukunft (vielleicht) erreichten, idealen Zustand zu machen. Dieser Vergleich soll die Argumentation und Begründung für die Notwendigkeit eines optimalen Zustandes bereichern. Während das volle Potenzial der Flugrouten vermutlich auch in Zukunft nicht vollends ausgeschöpft werden kann, lassen sich dennoch wesentliche Verbesserungen erreichen. Diese sind aufwändig und kostspielig zugleich, weshalb eine Abwägung von Aufwand und Ertrag geprüft werden muss. Die Resultate aus den beiden Studien sollen dabei die Ertragsseite besser dokumentieren, da insbesondere im Langstreckengeschäft Zahlen zur Effizienz kaum vorhanden sind. Das für die gemachten Überlegungen und Untersuchungen notwendige qualitative Verständnis ist dabei wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit.

Im ersten Kapitel wird die Entstehung der Arbeit dargelegt sowie wichtige Definitionen zum Thema gemacht. Kommentare zur Quellenlage und die Erläuterung der Methodik runden das Kapitel ab. Im zweiten Kapitel wird detailliert erklärt, was unter einem effizienten Flug zu verstehen ist. Ein effizienter Flug wird aus zahlreichen Gründen kaum erreicht. Die Gründe, welche zu einer Abweichung vom optimalen Flugweg führen, sind ebenfalls in Kapitel zwei erklärt.

Eine Studie zum kontinentalen Flugverkehr in Europa ist Gegenstand von Kapitel drei, während Kapitel vier eine vergleichbare Studie im interkontinentalen Flugverkehr enthält. Das fünfte Kapitel ist der Diskussion der Resultate sowie einem Ausblick in die Zukunft der Flugrouten gewidmet.

1.1 Kondensstreifen - Spuren am Himmel als Denkanstoss

Die Beobachtung von Kondensstreifen am Himmel hat die notwendigen Fragen für das Entstehen dieser Diplomarbeit aufgeworfen. Die folgende Abbildung 3 zeigt eine Darstellung der aus den Beobachtungen resultierenden Überlegungen. Ein gekrümmter Kondensstreifen wird als Umweg gegenüber einer direkten Verbindung seiner Ausgangspunkte interpretiert. Zwei Möglichkeiten sind unter A) und B) abgebildet: Der Effekt auf die zusätzlich geflogene Strecke ist in A) wesentlich grösser, während B) die Realität besser darstellt. Grundsätzlich hängt die Abweichung (gegenüber direktem Pfad) von der Länge der vor und nach der Krümmung auftretenden, geraden Flugstrecken ab. In beiden Fällen könnte eine Abkürzung gewählt werden, welche eine direktere Verbindung erlauben würde.

Die vorliegende Arbeit interessiert sich einerseits für die Grösse der Abweichung insgesamt sowie für die Gründe, welche zu solchen Abweichungen führen.

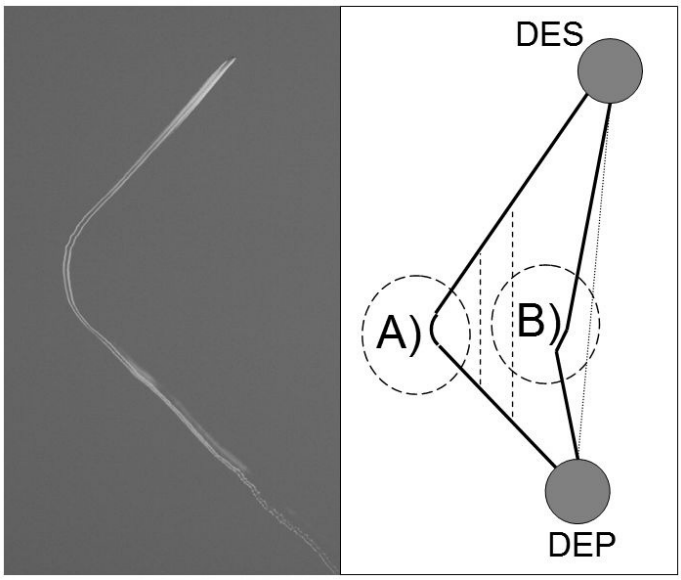


Abbildung 3: Beobachtungen am Himmel, welche zur Fragestellung führten.[4]

Die am Himmel gemachten Beobachtungen bestätigten sich auf einem Pseudo-Radarbild, welches Signale von Flugzeugen empfängt und aufzeichnet.[5]

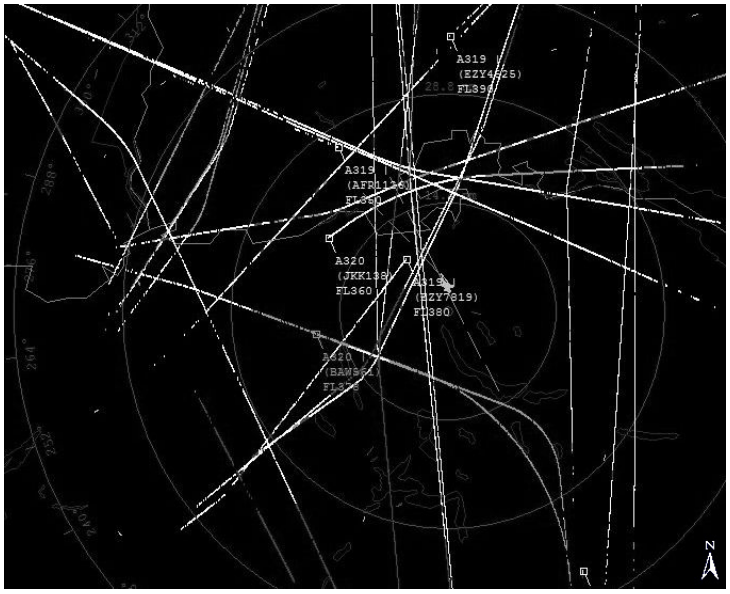


Abbildung 4: SBS-1 Ausschnitt über der Nordschweiz, 08:30 – 08.45 Uhr am 15. November 2007. Die Linien sind Flugspuren des Transit-Verkehrs über FL 300.

[4] Eigene Darstellung, Aufnahme links vom 12. März 2007.

[5] Es handelt sich um einen SBS-1 „Virtual Radar“, welcher Automatic Dependant System – broadcast (ADS-B) Signale empfängt. Der Begriff „Pseudo“ wurde hier gewählt, weil Radar in keiner Weise verwendet wird, das Resultat einem Ausschnitt eines klassischen Radarbildes ähnlich ist.

Die Krümmung der Kondensstreifen kann selbstverständlich auch durch Windeinflüsse erfolgen. Dies ergibt jedoch selten eine Kurve mit geraden Endstücken. Solche windverzerrten Kondensstreifen wurden ebenfalls beobachtet und als solche von der oben skizzierten Überlegung getrennt.

1.2 Begriffsdefinition: Effizienz

Der Begriff Effizienz wird in der Arbeit mehrfach verwendet und bedarf deshalb einer Definition. „*Effizienz* (v. lat.: *efficere* „zustande bringen") ist das Verhältnis eines in definierter Qualität vorgegebenen Ziels zu dem Aufwand, der zur Erreichung dieses Ziels nötig ist. Ein effizientes Verhalten führt daher (…) zur Erzielung einer Wirkung, hält aber darüber hinaus den dafür notwendigen Aufwand möglichst gering (vgl. Ökonomisches Prinzip)."[6]

Die Festlegung des Ziels, welches erreicht werden soll, muss nicht immer gleich erfolgen: Ein Flug kann zum Ziel haben, pünktlich am Zielort anzukommen, möglichst kurz, billig, frei von Turbulenzen sowie weiteren Kriterien zu sein, soll möglichst wenig Treibstoff verbrauchen, etc. Eine umfassende Liste der möglichen Effizienz-Ziele wäre lang, woraus sich die Notwendigkeit der Zieldefinierung für die Fragestellung ergibt. In der vorliegenden Arbeit ist die Effizienz an den Kosten orientiert, was gleichzeitig im Wesentlichen bedeutet, dass der Treibstoffverbrauch (als wesentlicher Kostentreiber) möglichst gering zu halten ist.[7] Dies entspricht der Forderung, dass die überwundene Distanz (im bewegten Medium) möglichst gering sein soll. Gemäss diesem Verständnis wird Effizienz durch direkte Verbindungen erreicht, denn direkte Verbindungen weisen im Vergleich tiefere Kosten auf. Unter einer direkten Verbindung wird eine Verbindung ohne Umwege verstanden. Weniger Distanz bedeutet weniger Zeit, was wiederum weniger Kosten bedeutet, welche zu einem Teil durch das Einsparen von Treibstoff reduziert werden, aber nicht nur. Der Zusammenhang zwischen Distanz, Zeit, Treibstoffverbrauch und Kosten ist wesentlich komplexer, als hier dargestellt.

Einen *möglichst geringen Aufwand* zu erhalten bedeutet eine Optimierung vorzunehmen. „Das einfachste Optimierungsproblem ist das Auffinden eines Minimums oder Maximums einer analytischen eindimensionalen Funktion $f(x)$, was in der Regel durch Auffinden der Nullstellen der ersten Ableitung gelingt."[8] Die Optimierung einer Flugroute unterliegt im Gegensatz dazu mehreren Funktionen, welche jede für sich sowie insgesamt ein Optimum aufweisen. Eine Flugroute

[6] Wikipedia: Effizienz.
[7] In gewissen Situationen kann ein Mehrverbrauch an Treibstoff dennoch günstiger sein. Dies hängt von den weiteren Faktoren ab.
[8] Wikipedia: Optimierung (Mathematik).

entspricht einer 4D Trajektorie[9], welche sehr aufwändig zu berechnen ist. Schwierigkeiten bereitet der stets wechselnde Windeinfluss, welcher den Raum, in welchem sich das Flugzeug bewegt, verzerrt. Diese Verzerrung beeinflusst das Optimum der Teilparameter, beispielsweise die optimale Fluggeschwindigkeit. Jeder Teilparameter steht in einer Wechselwirkung zu den weiteren Grössen, sodass die Veränderung eines Parameters stets die weiteren Werte beeinflusst und deren Optimum verschiebt. Um die Komplexität zu reduzieren, werden daher in der Praxis stets einzelne Kriterien für die Bestimmung der Effizienz konstant gehalten.
So wird in der Studie der Interkontinentalverbindungen (Kapitel 4) die Effizienz durch den Vergleich der Flugzeiten gemessen unter der Bedingung, dass sämtliche Flugzeiten das Resultat von Flügen unter Treibstoff minimierenden Bedingungen sind. In der Kontinentaluntersuchung (Kapitel 3) wird die Distanz als Mass für die Effizienz gewählt, da vereinfachend gesagt eine geringere Distanz durch geringere Flugzeiten auch geringere Kosten verursacht. Detailliertere Erklärungen zu den Wechselwirkungen der Parameter finde sich in Kapitel 2.6.
In der vorliegenden Arbeit wird Effizienz auch als optimaler Flugweg bezeichnet, welcher das Resultat einer Optimierung darstellt. Die Effizienz-Betrachtung orientiert sich am idealen Zustand, und somit wird die Differenz zwischen einem heutigen Zustand und einem theoretisch möglichen, optimalen Zustand als Ineffizienz bezeichnet.

1.3 Quellenlage

Die Betrachtung der Effizienz von Flugrouten ist eine tägliche Frage für die Aircraft Operators (Betreiber von Luftfahrzeugen, AO) und die Air Navigation Service Providers (ANSP, Flugsicherungen). Während die AO primär an den Kosten und deren Reduktion interessiert sind, interessiert die ANSP die Verwaltung der Lufträume und die Gewährleistung der Kapazität. Das Thema ist sehr stark an der Praxis orientiert: Die involvierten AO und ANSP stehen jede in ihrem Bereich in einem steten Wettbewerb, weshalb eine Dokumentation wichtiger Details meist nur als Betriebsgeheimnisse intern stattfindet. Zugang zu solchem Wissen ist daher schwierig und stets an gewisse Auflagen gebunden. Häufig ist das vorhandene Wissen auf wenige Personen in den entsprechenden Positionen verteilt. Es handelt sich somit um eine Art implizites Wissen, welches auf komplexe Sachverhalte zurückgreift. Eine Vermittlung dieses Wissens erfolgt primär über persönliche Kontakte, und die Entstehung von Software-

[9] Lat. für „Bahnkurve“.

Anwendungen erfolgt durch persönlichen Kontakt zwischen den Spezialisten aus der Luftfahrt und den Spezialisten der Computerbranche. So entstandene Lösungen sind stets auf das Problemverständnis der involvierten Luftfahrtexperten zugeschnitten und werden von gleichwertigen, konkurrierenden Abteilungen oft als ungenau bezeichnet. Eine wichtige Grundlage stellt die umfassende Kenntnis der Luftraumstrukturen dar. Diese Regeln unterliegen einem konstanten Wandel, sodass stets die zu Grunde liegenden, umfassenden Regelwerke als Referenz genannt werden und nicht etwa Sekundärliteratur. Diese Regelwerke in der vorliegenden Arbeit stets konkret zu nennen, sprengt den Rahmen der Literatursuche und auch der Übersichtlichkeit, weshalb in vielen Fällen die mündliche Referenz der betreffenden Spezialisten genügen muss. Diese Arbeit lebt zu einem guten Teil von mündlichen Referenzen, welche auf den Personen beruhen, die im Anhang als mündliche Referenzen genannt werden. Einige dieser Personen haben die vorliegende Arbeit auf ihre inhaltliche Richtigkeit überprüft, um dieser speziellen Referenzsituation Rechnung zu tragen.

1.4 Untersuchungsmethodik

Für die beiden Studien wurde mit demselben methodischen Ansatz gearbeitet, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Wegen der Form und Verfügbarkeit der Daten ergaben sich aber dennoch unterschiede im methodischen Vorgehen. Im Wesentlichen wurde der heutige Zustand mit einem theoretisch möglichen, idealen Zustand verglichen. Für beide Zustände wurden auf denselben Strecken Messungen und Berechnungen durchgeführt und anschliessend die Differenz zwischen diesen Zuständen ermittelt. Diese Differenz wurde als Ineffizienz interpretiert. Die Nennung der Differenz in absoluten Zahlen lässt jedoch wenig Rückschluss auf die konkrete Bedeutung dieser ermittelten Ineffizienz, weshalb die Differenz in zusätzlich in einer relativen Betrachtung als Anteil am heutigen Wert ausgedrückt wird.

Bei der relativen Betrachtung wurde die Differenz stets als Anteil in Prozent des grösseren Wertes ausgedrückt. Daraus folgt, dass bei einer Summierung der Werte nicht derselbe Prozentsatz resultiert wie bei einer relativen Betrachtung über die gesamte Spanne.

Für die Endangaben der Resultate wurden die Mittelwerte aus den Mittelwerten für einzelne Regionen verwendet. Damit wurde jede Region gleich gewichtet. Es ist zu unterscheiden zwischen Aussagen über die Samples und solche allgemeiner Natur.

2 Allgemeine Überlegungen zu effizienten Flügen

Gemäss einem Bericht von IATA[10] im Jahr 2007 geben Fluggesellschaften weltweit im Schnitt 100 US Dollar pro Flugminute aus.[11] Dies entspricht einem Preis von etwa 15 US Dollar pro Nautische Meile. Eine Studie von EUROCONTROL und IATA aus dem Jahr 2005 gab den Preis pro Meile mit 4 bis 12 Euro (EUROCONTROL) und 12.5 US Dollar (IATA) an.[12] Die Differenz der Angaben dürfte in den stark gestiegenen und weiterhin schwankenden Treibstoffkosten begründet sein.

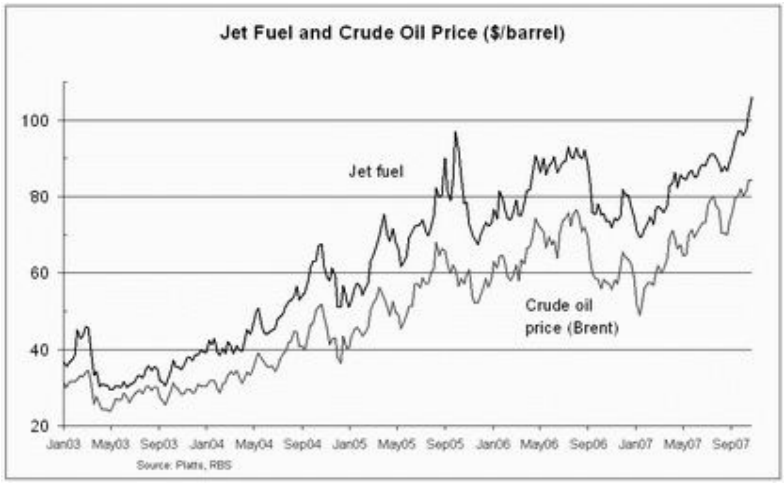


Abbildung 5: Treibstoffpreise zwischen Januar 2003 und September 2007.[13]

Die deutlich gestiegenen Treibstoffpreise setzen die Luftfahrt unter Druck und führen dazu, dass der Verbrauch sehr genau analysiert wird. Die folgende Aussage bestätigt dies: „In periods of high fuel prices, special attention is also given to reducing kerosene consumption. This includes changing flight paths…"[14]. Der genaue Preis, den eine Fluggesellschaft für ihren Treibstoff bezahlt, variiert stark, da mittels langfristigen Finanzmarktinstrumenten Spielraum gegeben ist. Es ist daher auch eine Art Betriebsgeheimnis, wie hoch die tatsächlichen Treibstoffkosten wirklich sind. Zudem schwanken die Treibstoffpreise von Flughafen zu Flughafen deutlich, was die Kosten weiter verschleiert.
Die Reduktion von umweltschädlichen Emissionen ist ein weiteres Ziel von Fluggesellschaften. Diese gemeinsamen Ziele nehmen einen starken Einfluss auf

[10] International Air Transport Association.
[11] http://www.iata.org/.
[12] Bonn, James et al. (2005): Flight Efficiency Studies in Europe and the United States.
[13] http://www.stcwa.org.au/.
[14] http://www.lufthansa-financials.de.

die operationellen Verfahren einer Fluggesellschaft. Es werden grosse Anstrengungen unternommen, die Kosten über den Treibstoffverbrauch zu senken, wie die folgenden Massnahmen von Japan Air Lines (JAL) zeigen:

Fuel Saving Measures

Division		Measures
Flight Operations	1	Use of improved cruise performance monitoring system (adopted in all aircraft from FY1994)
	2	Selection of optimal flight altitude, flight speed and flight route
	3	Use of auto-landing (CAT III operation) under low-visibility conditions
	4	Selection of shorter domestic routes, using Area Navigation System and other means
	5	Operation of Communications, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management (CNS/ATM) such as CPDLC
	6	Optimal control of aircraft center of gravity (4% aft for less drag)
	7	Expanded use of fuel economy reclearance method
	8	Continuous use of flight simulators in place of aircraft in flight crew training and authority check
	9	Use of Ground Power Units (GPUs) for aircraft parked at airports
Others	1	Reduction of volume and weight of goods loaded (weight reduction of cabin service goods, and optimal quantity of potable water)
	2	Simplification of logistics (local purchase of cabin service goods and cargo fittings)
	3	Fuel-saving in aircraft maintenance work through efficient engine testing
	4	Determination of the optimum fuel load in the flight planning phase

Abbildung 6: Massnahmen zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs von JAL.[15]

Interessant ist dabei die Feststellung, dass viele der Massnahmen auf eine Optimierung der Flugweg-Trajektorie zielen. Dazu zählen die Verkürzung der Flugrouten sowie die Optimierung der Flughöhe und Leistung im Reiseflug, welches zentrale Aspekte der Flugplanung sind.

Der Treibstoffverbrauch wird durch die Art und Weise des Flugbetriebs, aber auch durch die Länge der Strecken beeinflusst. Die Verkürzung von Flugrouten zwischen zwei Flughäfen bedeutet eine Reduktion der Kosten und Emissionen. Der Fokus liegt somit auf effizienten Flugrouten. Eine möglichst effiziente Flugroute stellt bei zweidimensionaler Betrachtung eine direkte Verbindung zwischen Ausgangs- und Zielflughafen dar. Diese kann jedoch nicht so geflogen werden, da im Rahmen der Flugsicherung eine Kanalisierung des Verkehrs stattfindet, was zur Notwendigkeit von Luftstrassen führt. Oberstes Ziel ist dabei, die Sicherheit zu gewährleisten. Dies geschieht primär durch Trennung der Verkehrsströme sowie durch Einhaltung von Abständen zwischen Flugzeugen. Solche Verfahren gehen zu Lasten der Effizienz, da gemäss heutigen Verfahren eine solche Separation zu Ineffizienzen in der Flugwegplanung führt.

Um die Effizienz einer Flugroute zu ermitteln, braucht es einen Vergleichswert. Dieser Vergleichswert, bislang als optimaler oder idealer Zustand bezeichnet, soll

[15] http://www.jal.com/.

durch den Vergleich mit dem aktuellen Zustand erlauben, eine Aussage über die Effizienz bzw. Ineffizienz von Flugrouten zu gewinnen. In diesem Kapitel wird erklärt, wie ein solcher Vergleichswert aussehen könnte. Es werden weiter die wichtigsten Parameter eines effizienten Fluges erklärt, sowie anschliessend die Gründe erläutert, weshalb ein Flug in der Praxis nicht diesen idealen Bedingungen folgen kann.

2.1 Benchmark: Free Flight

Für den Vergleich mit dem heutigen Zustands wurde Free Flight als Benchmark gewählt. Das schlussendliche Ziel aller Optimierungen der Routenplanung wird durch Free Flight symbolisiert. Free Flight steht für einen idealen und damit absolut effizienten Zustand. Der Begriff wurde wie folgt definiert:

> *"... a safe and efficient flight operating capability under instrument flight rules (IFR) in which the operators have the freedom to select their path and speed in real time. Air traffic restrictions are only imposed to ensure separation, to preclude exceeding airport capacity, to prevent unauthorized flight through Special Use Airspace (SUA), and to ensure safety of flight. Restrictions are limited in extent and duration to correct the identified problem. Any activity which removes restrictions represents a move toward free flight."*[16]

Das Thema Free Flight ist in der Luftfahrt in zunehmendem Ausmass von Interesse, was nicht zuletzt auch die Existenz der Diplomarbeit von Kronenberg (2005) zeigt. In seiner Arbeit wird Free Flight als innovativer Ansatz für ein modernes Air Traffic Management (ATM) System beschrieben, welches aus der Notwendigkeit erhöhter operationeller Effizienz, Flexibilität und Sicherheit für den Luftraumbenutzer geboren wurde. Weiter werden steigende Luftverkehrsvolumina für die Entstehung dieses Ansatzes genannt.[17]

Free Flight ist ein Konzept, dessen Realisierung nach heutiger Schätzung in weiter Zukunft liegt. Es handelt sich um einen völlig neuen Ansatz in der Flugsicherung, welcher Abschied von heutigen Strukturen von Luftstrassen sowie weiteren bewährten Konzepten nimmt. An Stelle der Luftstrasse und der Anweisungen der Flugsicherung, wie auf diesen zu fliegen sei, tritt die Autonomie jedes einzelnen Flugzeuges, seinen idealen Flugweg zu wählen. Die Staffelung zu den anderen Verkehrsteilnehmern wird unter Free Flight nicht mehr durch die

[16] http://www.asc.nasa.gov/ S. 1., zitiert RTCA95.
[17] Kronenberg, 2005: S. 6.

Flugsicherungslotsen, sondern primär durch jedes Flugzeug selbst wahrgenommen. Den heute bekannten Flugsicherungseinheiten käme in diesem Fall an Stelle der heute koordinierenden Arbeit eine vorwiegend überwachende Funktion zu. Die konkreten Vorstellungen zur Rolle der Flugsicherung nehmen verschiedene Formen an. Allein die genannten Änderungen verlangen nach einer Vielzahl technischer Neuerungen, welche teilweise vorhanden sind, teilweise sich noch in der Entwicklung befinden. Die oberste Maxime der Fliegerei ist und bleibt die Flugsicherheit, welche unter keinen Umständen durch Free Flight in Frage gestellt werden darf. Free Flight soll durch die Einführung technischer Neuerungen die Sicherheit erhöhen und gleichzeitig die Hauptziele erfüllen: Reduzierte Kosten dank direkter Flugwege, und weniger Verspätungen dank mehr Kapazität und verbesserter Planung.

Der Aspekt der direkten Flugrouten ist die für die Effizienz von Flugrouten entscheidende Charakteristik von Free Flight. Im heutigen System führt ein Flug grundsätzlich über vorgegebene Routen (Luftstrassen) vom Start- zum Zielflughafen, welche durch Navigationspunkte (Waypoints) definiert sind. Der Luftraum ist somit durch ein Netzwerk von Verbindungen strukturiert, welche bei der Planung eines Fluges möglichst optimal verbunden werden sollen. In einer Free Flight Welt würde dieses Netzwerk abgeschafft und das Muster der Flugrouten entspräche potenziell einer unendlichen Zahl von individuellen Trajektorien, welche vorwiegend direkte Verbindungen darstellen. Es liegt auf der Hand, dass die Streckenlängen dadurch auf ihr absolutes zeitliches Minimum verkürzt werden könnten. Da jeder Flug eine 4D Bewegung darstellt, müssten auch optimale Rahmenbedingungen für das vertikale und das zeitliche Profil (Kapazität) herrschen.

Das Abfliegen einer Free Flight Strecke stellt im Wesentlichen eine Bewegung auf dem Grosskreis dar, korrigiert um den Windeinfluss. Die Orthodrome[18] wird so durch stets ändernde Windeinflüsse verzerrt. Ein Flug auf einer Orthodrome müsste mit einem permanent änderndem Kurs geflogen werden und wäre aus diesem Grund in der Praxis korrekt, jedoch umständlich.[19]

2.2 Verwendung der Begriffs „Free Flight“

Aus der Definition von Free Flight geht klar hervor, dass optimale Flugwege zur Anwendung gelangen. Dabei kann ein Flugzeug auf dem en route Bereich des Fluges einen direkten Kurs unter Berücksichtigung von Windeinfluss (und allenfalls weiterer bestehender Einflussfaktoren) fliegen. Unklar bleibt die

[18] Segment eines Grosskreises.
[19] Wolper (2001): S. 134 f.

Definition für den Bereich der An- und Abflugverfahren. In der Praxis wird auch für diesen Bereich häufig eine komplette Optimierung angenommen, welche vom Ausgangsflughafen eine direkte Linie zum Zielflughafen macht. Diese ist eine grobe Vereinfachung und berücksichtigt die An- und Abflugverfahren, an welche sämtliche Flugzeuge nach heutigem Verständnis auch in Zukunft gebunden sein werden, nicht. Solche Vereinfachungen können in Untersuchungen aus Sicht des Autors zu falschen Free Flight Werten führen. Es sei hier klargestellt, dass in der vorliegenden Arbeit der Begriff Free Flight keine Optimierung in Flughafennähe beinhaltet und von konstanten An- und Abflugverfahren vom Flughafen bis zur Grenze der Nahkontrollzone (Terminal Area, TMA) ausgeht. Somit fokussiert der Begriff Free Flight in dieser Arbeit auf den en route Bereich eines Fluges.

2.3 Verschiedene geographische Flugregionen

In Abbildung 7 ist der globale Treibstoffverbrauch der Luftfahrt in den Jahren 2000 bis 2004 dargestellt. Aus der Intensität des Treibstoffverbrauchs lassen Rückschlüsse über die Menge an Luftverkehr zu. So wird klar, dass Europa und Nordamerika die am intensivsten beflogenen Gebiete sind. In Südostasien sowie in Japan ist ebenfalls eine bedeutende Häufung von Flugverkehr auszumachen. Erwartungsgemäss ist der Verkehr über den grossen Wirtschaftsregionen besonders ausgeprägt. Deutlich sichtbar sind auch die transatlantischen Verbindungen zwischen den grossen Wirtschaftszentren. Dazu gehören die Flugverbindungen des Nordatlantiks, jene des Südatlantiks zwischen Europa und Brasilien/ Argentinien, weiter die Strecken im Nordpazifik sowie zwischen Hawaii und den USA, aber auch die Verbindungen zwischen Südostasien und Australien.

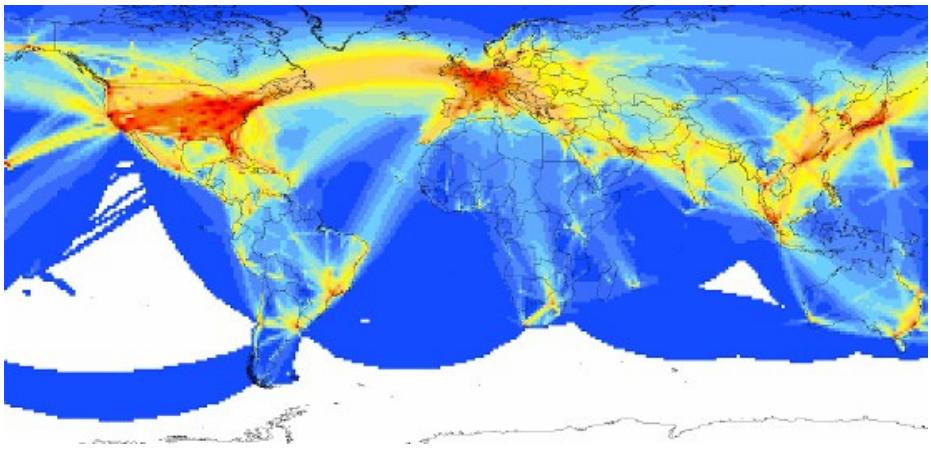


Abbildung 7: Globaler Treibstoffverbrauch durch die Aviatik zwischen 2000 und 2004. Blau = geringe Intensität, gelb = mittlere Intensität, rot = hohe Intensität.[20]

[20] http://www.faa.gov/ FAA-EE-2005-02, S. 30.

Diese bedeutenden Flugregionen stehen auf Grund des hohen Verkehrsvolumens besonders unter dem Druck, den Verkehr effizient abwickeln zu können. So haben sich in den verschiedenen geographischen Flugregionen unterschiedliche Verfahren entwickelt. Grundsätzlich wird zwischen kontinentalem und ozeanischem Verkehr unterschieden.

2.3.1 Ozeanische Strecken

Ozeanische Strecken stellen in der Regel Verkehrsverbindungen zwischen den Ballungsgebieten der Kontinente dar und zeichnen sich besonders durch das Fehlen von steigendem und sinkendem Verkehr sowie durch die Absenz bodengestützter Navigationshilfen aus. Auf den ozeanischen Strecken befindet sich beinahe ausschliesslich Transitverkehr in grossen Volumen. Die Art der Strukturen von Luftstrassen, welche als Tracks[21] bezeichnet werden, wird auf zwei mögliche Arten geregelt: Als OTS oder Fixed. Das Organised Track System (OTS) stellt eine variable Struktur von Tracks dar, welche täglich auf Grund der herrschenden Wetterbedingungen (insbesondere Windverhältnisse) neu definiert wird. Dabei reichen die Fluggesellschaften vorgängig ihre gewünschten, optimalen Flugrouten ein, woraus die ozeanische Flugsicherung die für die meist gefragten Strecken optimalen Tracks definiert und publiziert. Ein typisches Beispiel dafür ist der Nordatlantik, North Atlantic (NAT). Die Tracks liegen täglich anders und werden an den kontinentalen Enden durch fixe Ein- und Ausflugspunkte, im Flugverlauf durch Koordinaten definiert. Es ergeben sich so in der Regel parallele Tracks im Abstand von 60 NM[22], welche durch einen Buchstaben bezeichnet werden. Westbound erhalten die Tracks Buchstaben am Anfang des Alphabets beginnend (A, B, C,…), während auf den eastbound Tracks Buchstaben am Ende des Alphabets beginnend (Z, Y, X,…) vergeben werden. Die Tracks wechseln zwei Mal täglich: Während tagsüber sämtlicher Verkehr nach Westen fliesst und die Tracks zu diesem Zweck möglichst aus den Gegenwinden heraus gelegt werden, liegen die Tracks in der Nacht für die grossen Verkehrsvolumen Richtung Osten möglichst im Bereich der starken Rückenwinde.

[21] Flugrouten über Grund, hier vordefinierte Flugbahnen.
[22] Reduktion auf 30 NM geplant.

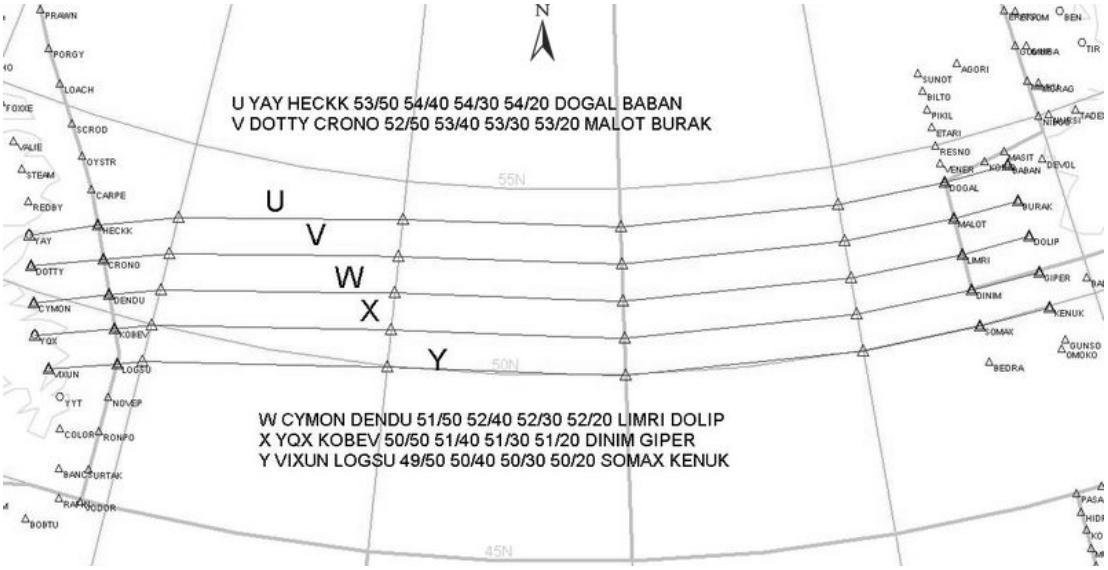


Abbildung 8: NAT Region mit Tracks in östlicher Richtung (nachts). In Textform die Definitionen der Tracks durch Navigationspunkte (am Kontinentalrand) und Koordinaten (über dem Atlantik).[23]

Auf den NAT-Tracks gilt eine horizontale Staffelung von 10 Minuten und eine vertikale Separation von 1000ft (also 10 FL). Auf den Tracks mag es zu einer Übernachfrage kommen, was dazu führen kann, dass ein anderer Track vergeben wird.

Nebst den eben beschriebenen OTS gibt es auch Fixed Tracks, welche als feste Strukturen über die Ozeane gelegt werden. Es handelt sich dabei um Strecken, welche nicht von täglich stark variierenden Winden beeinflusst werden. Ein Beispiel dafür sind die South Atlantic (SAT) Tracks.

Eine weitere Möglichkeit ozeanischen Streckenführung sind die Random Routes, welche quasi einem Free Flight Verfahren entsprechen. Dabei kann die Flugroute frei gewählt und mittels Koordinaten definiert werden. Ein solches Verfahren ist nur in verkehrsschwachen Regionen möglich, da eine Separation des Verkehrs schwieriger zu gewährleisten ist. Random Routes sind beispielsweise in den sehr weit nördlich, ausserhalb der NAT gelegenen Gebieten des Nordatlantiks möglich.

Die Unterschiede bei den Voraussetzungen für die drei Verfahren liegen in der Verkehrsmenge sowie den meteorologischen Einflüssen. Eine sichere Trennung der einzelnen Flüge ist gemäss heutigem Verständnis von Flugsicherung ab einer bestimmten Verkehrsdichte nur durch eine Kanalisierung möglich (OTS oder Fix). Dies führt zu lateralen und vertikalen, aber auch Verfügbarkeits-Restriktionen und beeinflusst die Effizienz von Flügen. Probleme bereiten auf ozeanischen Strecken sowohl die Kommunikation als auch die Überwachung der Verkehrsflüsse. Beide

[23] Wikipedia: NAT.

Flugsicherungselemente basieren traditionell auf bodengestützten Einrichtungen. Die Grenzen der normalerweise in VHF geführten Luft-Boden Kommunikation werde durch die quasi-optischen Verbreitung dieses Frequenzbandes bestimmt und der Kontakt Boden-Luft zwischen den kommunizierenden Parteien kann nur über wenige hundert Meilen gewährleistet werden[24], was bei längeren ozeanischen Strecken aufgrund fehlender Funkstationen nicht möglich ist. Es muss daher auf HF Kommunikation zurückgegriffen werden, welche an atmosphärischen und Problemen der Übernutzung leidet. Neuerdings gewinnt allerdings die sehr klare Satellitenkommunikation an Bedeutung und der sog. Controller Pilot Data Link (CPDLC, vergleichbar mit Email oder Telex) hat vielerorts bereits HF ersetzt. Die Navigation stellt heute praktisch keine Probleme mehr dar. Dennoch gibt es mancherorts noch mangelhafte ATS-Routenstrukturen, die ihren Grund in der ehemaligen Abhängigkeit von Bodeninfrastrukturen (VOR, NDB) haben und nicht den heutigen Verhältnissen angepasst wurden. Auch nicht verfügbare Überwachungsmöglichkeiten können unzulängliche ATS-Routenstrukturen zur Folge haben. (Diese Ausführungen sind aus Platzgründen bewusst knapp gehalten und haben nicht den Anspruch der Vollständigkeit.).[25]

2.3.2 Kontinentale Strecken

Die Organisation des Luftverkehrs auf kontinentalen Strecken lässt sich kaum allgemein beschreiben, da sich die einzelnen Regionen eigenständig entwickelt haben. Dies findet Ausdruck in verschiedenen Standards und Verfahren und stellt ein Problem für die Regionen übergreifende Zusammenarbeit dar.

2.3.3 Europa

In Europa existiert mit EUROCONTROL eine Dachorganisation der meisten europäischen Flugsicherungen. Die Hauptaufgabe von EUROCONTROL ist die staatenübergreifende Koordination des Flugverkehrs. Ein Problem in Europa ist die Vielzahl von ATS-Strukturen mit jeweils eigenen Flugsicherungs-Zentralen, die primär regionalen (nationalen) Bedürfnissen enstprechen. Die Vielfalt der technischen Systeme erschwert eine pan-europäische Zusammenarbeit zusätzlich.
Die Initiative Single European Sky (SES) nimmt sich der Lösung dieses Problems durch eine neue Aufteilung des europäischen Luftraums in Functional Airspace

[24] exakte Reichweite von VHF-Kommunikation: Reichweite in NM = 12 x √FL.
[25] North Atlantic (NAT) Region Air Traffic Management (ATM) Concept of Operations, North Atlantic Systems Planning Group.

Blocks (FAB) an. Die Neuaufteilung in grössere, an Verkehrsprozessen orientierte Sektoren bringt eine Abwägung von wirtschaftlichen, sozialen und politischen Faktoren mit sich. Der wesentliche Vorteil liegt in einheitlichen Prozessen, Technologien und dem eigentlichen ATM, wodurch sich eine Verbesserung der Kapazität und der Struktur des Luftraums ergeben soll. Der Fokus bei der Definition der Luftraum Einheit liegt dabei auf den Prozessen, die sich darin abspielen. Neu wird mehr Gewicht auf die Einführung von direkten Verbindungen über Ländergrenzen hinweg geachtet, was bislang auf Grund der regional (national) orientierten Flugsicherungen nicht möglich war. So sollen die pan-europäischen Strecken effizienter gemacht werden, welche betreffend ihrer Effizienz deutlich hinter nationalen Flugverbindungen zurück liegen.[26] Die folgende Abbildung 9 zeigt das Beispiel des Central FAB, welches im Zentrum Europas die Lufträume der Länder Belgien, Deutschland, Frankreich, Holland, Luxemburg und der Schweiz zu einem gemeinsamen Luftraum zusammen führen soll.

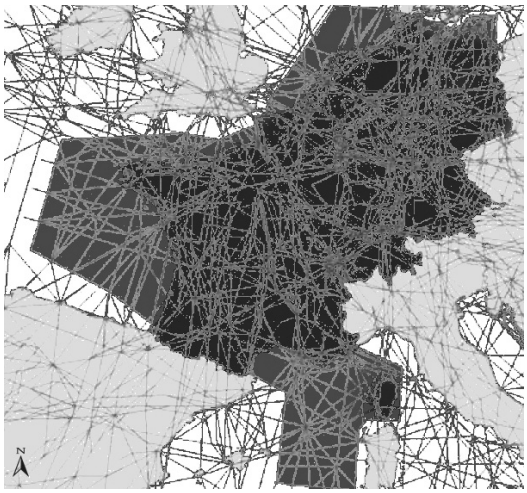


Abbildung 9: Central FAB (dunkel), bestehend aus 6 Staaten und 7 Flugsicherungen.[27]

Die Einführung von reduzierten vertikalen Abständen (RVSM) in Europa hat in den letzten Jahren gravierende Kapazitätsprobleme entschärft. Es ist jedoch mit erneuten Engpässen im Falle weiter steigender Verkehrszahlen zu rechnen. Besonders dicht beflogen sind die Lufträume über der Schweiz, Deutschland, Südengland und den Beneluxstaaten. Die SES-Intiative versucht hier, durch erweiterte Zusammenarbeit in den neuen FAB eine Optimierung der Strukturen und Verfahren und damit mehr Kapazität zu schaffen.

[26] http://www.eurocontrol.int/ Functional Airspace Blocks, S. 1ff.
[27] http://www.eurocontrol.int/ FAB Europe Central Feasibility Study, S. 4.

2.3.3.1 Nordamerika

Der Luftraum der USA, der so genannte National Airspace (NAS), gehört zu den dichtest beflogenen Lufträumen. Die Kapazitätsprobleme sind besonders akut im Bereich der An- und Abflüge um die dichten Ballungsgebiete, beispielsweise New York mit drei bedeutenden Flughäfen.

In den USA wurden für den en route Bereich zahlreiche Studien zur Optimierung der Flugrouten hin zu direkten Verbindungen ausgearbeitet. Eine wesentliche Verbesserung brachte ein so genanntes *Direct To-Tool*, welches dem Controller erlaubt, einem Flugzeug einen direkten Kurs zu einem entfernten Waypoint zu geben. Mit diesem Hilfsmittel konnten im Durchschnitt 2.5 Flugminuten pro Flug eingespart werden. Die folgende Abbildung 10 zeigt den direkten Kurs im Vergleich zur ursprünglichen Flugroute aus dem Flugplan.

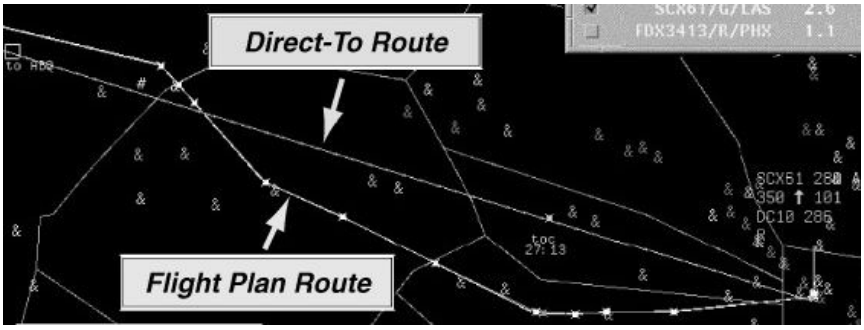


Abbildung 10: Direct-To Tool, ursprünglicher Kurs gegenüber direktem Kurs.[28]

2.3.3.2 Weitere Regionen

Mit Europa und Nordamerika wurden die dichtest beflogenen Regionen erwähnt. Aufstrebende Fluggesellschaften im Mittleren Osten und Asien sorgen für stark steigende Verkehrsvolumen in diesen Bereichen der Welt. Eine Besonderheit stellt Russland dar, das eine bedeutende Menge an nationalem Verkehr hat, jedoch auch eine sehr wichtige Rolle im Verkehr zwischen Europa und Asien einnimmt. Dabei stellen fehlende Strecken und veraltete oder nicht vorhandene technische Hilfsmittel in Russland eine grosse Herausforderung dar. Ähnliches kann man über China berichten, das sich nach wie vor im Wandel zwischen Isolation und Öffnung zur übrigen Welt befindet. In beiden Ländern sind rasche Veränderungen des veralteten ATM zu erhoffen. Das Hochplateau von Tibet stellt eines der wenigen natürlichen Hindernisse für die kommerzielle Luftfahrt dar und teilt den Verkehr nach Asien in einen südlich und einen nördlich des Himalajas.

[28] http://www.ctas.arc.nasa.gov/.

Afrika verfügt über verhältnismässig wenig Flugverkehr, welcher sich auf die Verbindungen mit Europa konzentriert. Der europäische Einfluss in Afrika zeigt sich deutlich in der Struktur der Luftstrassen, welche eine vorwiegende Nord-Süd Optimierung aufweisen. Während die Strukturen in Afrika für Flüge von und nach Europa somit relativ ideal liegen, sind aber gravierende technische und organisatorische Mängel bei den zuständigen Flugsicherungen zu verzeichnen. Südamerika ist mit den SAT-Routen ebenfalls relativ optimal mit Europa verbunden.

2.4 Einfluss von Windströmungen

Bei der Ermittlung von optimalen Flugwegen ist die Tatsache zu berücksichtigen, dass ein Flugzeug in einem bewegten Medium fliegt. Starke Winde können einen wesentlichen Einfluss auf die Fluggeschwindigkeit gegenüber Grund bewirken und sind daher bei den Berechnungen von optimalen Flugrouten zu berücksichtigen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die so genanten Jetstreams[29]. Ein Jetstream ist ein relativ eng begrenzter, mehr oder weniger horizontaler Luftstrom, der eine mittlere Windgeschwindigkeit von mindestens 60 Knoten[30] aufweist. Er liegt in Höhen von einigen Kilometern, kann einige Hundert Kilometer breit und mehrere Tausend Kilometer lang sein. Jetstreams treten grundsätzlich an Luftmassengrenzen auf und können als Begleiterscheinung eines Tiefdruckgebiets (Zyklon) grundsätzlich überall, bevorzugt in den gemässigten Breiten auftreten. Andere Jetstreams wehen permanent oder jahreszeitlich und werden ihrer Lage entsprechend bezeichnet. In den mittleren Breiten tritt ganzjährig der Polarfront Jetstream auf, welcher mit 350 Knoten die weltweit bislang höchste beobachtete Windgeschwindigkeit erreichte. Der subtropische Jetstream, ebenfalls ein ganzjähriges Phänomen, befindet sich bei etwa 30º Nord. Während des Sommers entsteht über Südasien der äquatoriale Jetstream, und im arktischen Winter treten weit im Norden der arktische Jetstream und der Polarnacht Jetstream auf. Jetstreams als besonders ausgeprägte Winde treten vorwiegend in der oberen Troposphäre auf und sind das Resultat stark geneigter Druckflächen, welche unterschiedliche Ursachen haben. Eine detaillierte Erklärung dazu findet sich in „Flugwetterkunde“ von Hack.[31]

Flugrouten auf den von Jetstreams betroffenen Strecken weisen durch unterschiedliche Windstärken bedingte Schwankungen auf und werden nach Möglichkeit so gewählt bzw. gelegt, dass Gegenwind vermieden und Rückenwind

[29] auf Deutsch: Strahlstrom.
[30] Knoten = NM pro Stunde.
[31] Hack (2003), S.52 ff.

genutzt wird, während Strecken, die ausserhalb jener Gebiete liegen oder quer zu diesen Winden verlaufen weniger davon betroffen sind. Die Jetstreams sind der Grund dafür, dass es in betroffenen ozeanischen Gebieten täglich schwankende Strecken-Strukturen gibt. Die folgende Abbildung zeigt schematisch Lage und Richtung der Jetstreams:

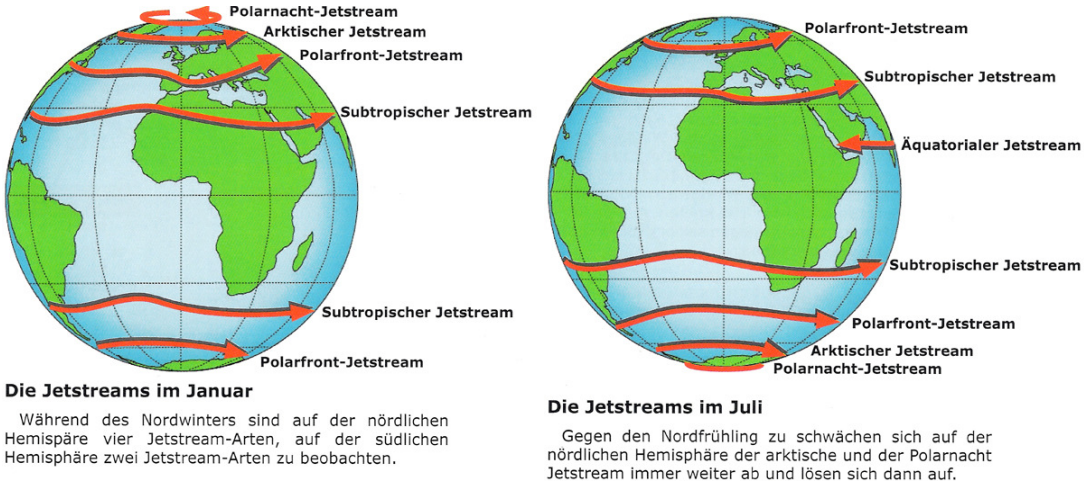


Abbildung 11: Jetstream: Typen, Lage und Richtung in Abhängigkeit der Jahreszeit.[32]

2.5 Effizienz – mögliche Sichtweisen

Ein Flug kann nach verschiedenen Effizienzkriterien beurteilt werden. Dabei kann man sich einen beliebigen Flugparameter vorstellen und die Bewegung des Flugzeugs nach diesem Parameter optimieren (beispielsweise minimieren der geforderten Ressource). Im Rahmen der wirtschaftlichen Überlegungen, nach welchen sich ein marktwirtschaftlich operierender AO richten muss, ist die Kostenbetrachtung als Effizienzkriterium die offensichtlich bedeutendste. So versucht ein AO stets, die Kosten möglichst gering zu halten, um den Gewinn zu maximieren und damit konkurrenzfähig zu sein. Er wählt aus dieser Überlegung heraus einen *Minimum Cost* Ansatz für den Betrieb seiner Luftfahrzeuge. Dieses grundsätzliche Denken dominiert, kann jedoch weiteren Prioritäten kurzfristig untergeordnet werden. Ein häufig anzutreffendes Beispiel dazu ist die Situation eines verspäteten Fluges, welcher Umsteigepassagiere oder Fracht zur Weiterverteilung (Expressdienste) an einen Hub bringt. In diesem Fall entstehen unter Umständen hohe Kosten, wenn dieser Flug mit (voller) Verspätung am Zielort eintrifft und die Anschlüsse verpasst werden. Der Faktor Zeit erhält dann eine so starke ökonomische Gewichtung, dass die Erhöhung der

[32] Hack (2003): S. 64.

Fluggeschwindigkeit unter Inkaufnahme eines höheren Treibstoffverbrauchs geringere Kosten verursacht, als die dank kürzerer Flugzeit verhinderten Folgekosten der Verspätung. In der Summe rechtfertigen und übersteigen die verhinderten Folgekosten also die Mehrkosten an Treibstoff. Ein Flug unter solchen Bedingungen wird eine Optimierung nach der Flugzeit vornehmen und ist aus einer den Kontext nicht berücksichtigenden Sichtweise nicht effizient.
Die wesentlichen Kostenfaktoren sind Technik (Instandhaltung zur Gewährleistung der Sicherheit), Flugsicherung und die Flugdurchführung selbst. Da die ersten beiden Faktoren weitgehend reglementiert sind, können die damit verbundenen Kosten nur bedingt beeinflusst werden. Der dritte Faktor betrifft unmittelbar den Betrieb eines Luftfahrzeugs. Diesen Betrieb möglichst kostengünstig zu gestalten ist das Ziel des AO und eine der Aufgaben der Piloten im Endeffekt. Es werden optimale Parameter für einen Flug ermittelt und in einem Flugdurchführungsplan berücksichtigt. Wie ein effizienter Flug gemäss diesen Verfahren aussieht, wird im nächsten Kapitel beschrieben.
Die Ermittlung eines optimierten Flugwegs (Tracks) im 4D Raum ist Aufgabe der Flugwegplanung (Dispatch), und die effiziente Ausgestaltung eines solchen Tracks nennt sich *Minimum Track*. Diese Minimum Tracks verstehen sich jeweils als optimale Flugwege unter den möglichen, was bedeutet, dass die Struktur der Luftstrassen und Lufträume berücksichtigt wird. Alternativ lassen sie sich für theoretische Überlegungen auch völlig losgelöst von bestehenden Strukturen berechnen, in einer Free Flight Welt also. Es gibt grundsätzlich vier Arten von Minimum Tracks:
Der Minimum Distance Track (MDT) entspricht dem Great Circle (oder dem Great Circle nächst gelegene Luftstrassenverbindung) und stellt die kürzeste Verbindung auf der Kugeloberfläche der Erde dar. Der Minimum Time Track (MTT) stellt die kürzeste Verbindung im bewegten Luftmedium dar und deckt sich aufgrund von Windeinflüssen meist nicht mit dem Grosskreis. Die Geschwindigkeit eines Flugzeugs muss dabei durch einen maximalen Wert vorgegeben sein, sonst fliegt das Flugzeug mit Maximalgeschwindigkeit oder vorwiegend in tiefen Lagen und hat damit einen exorbitant hohen Treibstoffverbrauch. Der MTT führt stets durch jene Luftmassen, welche das schnellste Vorankommen ermöglichen. So kann ein Flugzeug auch kurzfristig tiefere Lagen durchfliegen, um so ein paar Flugminuten einzusparen. Solch ein Verfahren lässt der Minimum Fuel Track (MFT) häufig nicht zu, da der später wieder resultierende Steigflug eine überdurchschnittliche Treibstoffmenge verbraucht und somit die Gesamtmenge an Treibstoff nicht minimiert wird, wie es der MFT verlangt. Da jedoch ein direkter Zusammenhang zwischen Flugzeit und Treibstoffverbrauch besteht, entspricht der MFT im Wesentlichen dem MTT. Gemäss dieser Überlegung wird eine Abweichung von

der kürzesten Verbindung auf der Erdoberfläche dann geflogen, wenn auf dieser geographischen Abweichung die besseren Windkomponenten den Weg im Luftmedium kürzer werden lassen. Der vierte Minimum Track ist der Minimum Cost Track (MCT) und steht für jenen Flugweg, der die geringsten Kosten insgesamt verursacht. Klar ist auch hier, dass ein direkter Zusammenhang zwischen Treibstoffkosten und Flugzeit sowie den Gesamtkosten besteht. Ein wesentlicher zusätzlicher Kostenfaktor können beispielsweise Flugsicherungsgebühren sein. So kann es geschehen, dass eine überdurchschnittlich teuere Flugsicherungszone umflogen wird. Das folgende Beispiel in Abbildung 12 verdeutlicht graphisch, dass diese vier Tracks beachtliche Unterschiede im geographischen Verlauf aufweisen können:

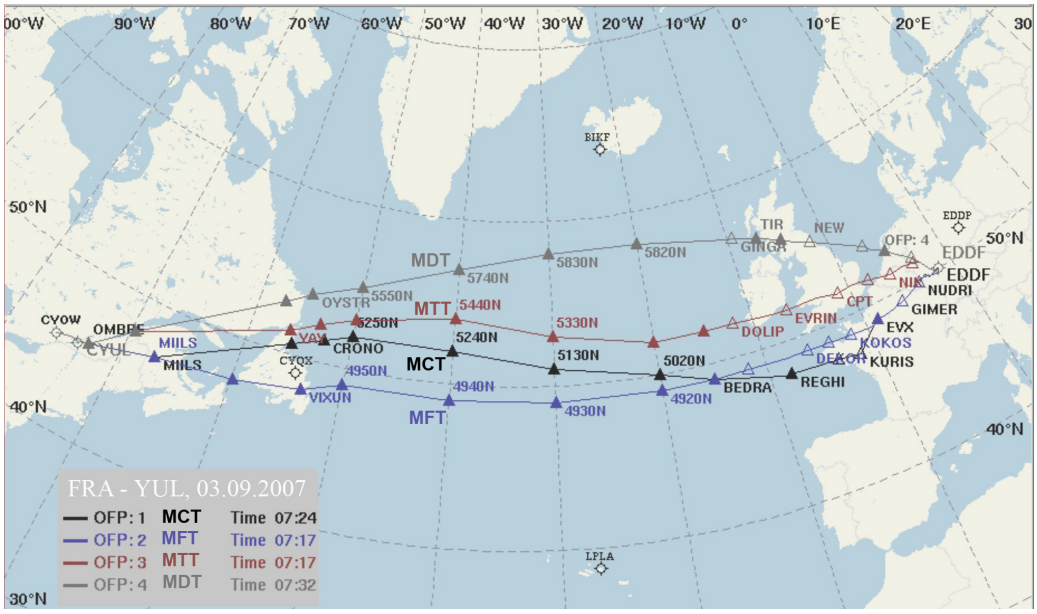


Abbildung 12: Verlauf der vier Minimum Tracks auf der Strecke Frankfurt – Montreal am 03.September 2007.[33]

Im Beispiel ist besonders auffällig, dass der MCT einen sehr südlichen Verlauf über Europa nimmt. Dies liegt an den besonders teueren Flugsicherungsgebühren von Grossbritannien, welche so gespart werden können. Der Treibstoffverbrauch ist dabei auf dem MCT jedoch höher. Im Beispiel besonders interessant ist die Tatsache, dass der MFT eine identische Flugzeit wie der MTT aufweist, jedoch über Grund einen um hunderte Meilen unterschiedlichen Verlauf wählt.

[33] Lufthansa.

2.6 Effizienter Flug

„Unter einem optimalen Flugverlauf wird vom Luftfahrzeugbetreiber für das einzelne Luftfahrzeug ein Flug mit maximaler Autonomie des einzelnen Luftfahrzeugs verstanden. Die resultierende laterale Flugführung ergibt sich aus der Flugplanung als ökonomischste Strecke unter Berücksichtigung der vorhergesagten Windverhältnisse. Bei Kurz- und Mittelstreckenflügen ist dieses oft die direkte Distanz vom Abflug- zum Zielflughafen und für die vertikale Flugführung eine Reiseflughöhe, die mit geringer werdendem Gross Weight (GW) zunimmt und dann mit Leerlaufschub zum Zielflugplatz führt, also einen parabelähnlichen Verlauf zeigt.“[34] Dies entspricht dem Verständnis eines Free Flight, welcher jedoch heute in der Praxis nicht erreicht wird. Um die zahlreichen Benutzer des Luftraums in sicherer Entfernung voneinander zu halten (Separation), wurden kontrollierte Lufträume eingerichtet. In diesen Lufträumen ist eine Freigabe der Flugsicherung für jede gewünschte 4D Bewegung erforderlich. Die 4D Bewegung entspricht einer horizontalen Flugbewegung (lateral) und einem vertikalen Flugprofil, sowie der Zeit. Der Einfluss der Zeit ist die Geschwindigkeit, welche variieren kann und somit die vierte Dimension als Geschwindigkeitsprofil einbringt. Diese drei Profile verfügen über ihre jeweils idealen Profile, welche im Folgenden näher umschrieben werden:[35]

2.6.1 Optimale Horizontale Flugbahn

Die horizontale (laterale) Flugbahn ergibt sich aus der Darstellung des Flugweges über Grund, in Form einer Serie von Segmenten vom Start- zum Zielflughafen. Dabei navigiert ein Flugzeug entlang von Waypoints, welche anhand von Koordinaten definiert sind. Die Bewegung des Flugzeuges wird als zweidimensionale Bewegung in Richtung Ost/ West und Nord/ Süd verstanden.
Die optimale laterale Flugroute stellt in der einfachsten Variante eine direkte Verbindung vom Ausgangs- zum Zielpunkt dar. Dabei versteht man im Wesentlichen eine Grosskreisverbindung zwischen Start- und Zielflughafen. Diese optimale Verbindung kann aufgrund existierender An- und Abflugverfahren nicht geflogen werden, sodass bei Berücksichtigung dieses Faktors unter der optimalen horizontalen Flugbahn meist eine direkte Verbindung von Ausflugspunkt der TMA des Startflughafens bis zum Einflugspunkt der TMA des Zielflughafens verstanden wird. Dabei kann die Definition der TMA variieren und ist klar festzulegen.

[34] Tröndle (2001): S. 16.
[35] Tröndle (2001): S. 12ff.

Der optimale horizontale Flugweg weicht in der Praxis von der Grosskreisverbindung zwischen den definierten Punkten ab, da meteorologische Faktoren den optimalen Flugweg vom Grosskreis weg verlegen. So wird in aller Regel geplant, eine Rückenwindkomponente auszunutzen, indem der Flugweg möglichst in eine Zone mit Rückenwind verlegt wird. Konträr ist das Verhalten bei Gegenwind. Die Überlegung ist jene, dass die zusätzliche laterale Distanz über Grund durch die Wirkung des Windes mindestens kompensiert werden muss. Der optimale laterale Flugweg deckt sich also nur dann mit der Grosskreisverbindung, wenn genau auf dieser Verbindung insgesamt optimale Windverhältnisse herrschen.
Die optimale horizontale Flugbahn wird heute so gut wie nie geflogen, da Luftraumstrukturen und die jeweilige Verkehrssituation stets zu Abweichungen vom optimalen Weg führen.[36]

2.6.2 Optimale Vertikale Flugbahn

Die aerodynamischen Gesetze sorgen dafür, dass für jedes Flugzeug eine optimale Flughöhe in Abhängigkeit vom aktuellen Fluggewicht und einer gegebenen Geschwindigkeit resultiert. Die folgende Abbildung 13 zeigt ein Beispiel einer Long Range Cruise Tabelle, aus welcher sich für entsprechende Flughöhen (X-Achse, in FL) und Fluggewichte (Y-Achse, in Tonnen) die Leistungssetzung (N1), Geschwindigkeit (in den Messformen Mach, IAS und TAS) sowie der Treibstoffverbrauch (in kg Treibstoff pro Stunde und Triebwerk, sowie in NM pro Tonne Treibstoff) ermitteln lässt. Aus Effizienzüberlegungen ist dabei grundsätzlich eine maximale Distanz pro Tonne Treibstoff anzustreben (NM/1000kg).

[36] Tröndle (2001): 11ff.

LONG RANGE CRUISE

MAX. CRUISE THRUST LIMITS NORMAL AIR CONDITIONING ANTI-ICING OFF							ISA CG=33.0%		N1 (%) KG/H/ENG NM/1000KG		MACH IAS (KT) TAS (KT)	
WEIGHT (1000KG)	FL290		FL310		FL330		FL350		FL370		FL390	
50	74.9	.665	75.4	.668	76.8	.693	78.4	.721	79.8	.747	81.8	.771
	1010	254	958	245	950	243	945	242	945	241	949	238
	194.9	394	204.6	392	212.1	403	219.7	415	226.9	429	233.2	442
52	75.3	.667	76.2	.678	77.7	.704	79.1	.731	80.6	.758	82.4	.778
	1027	255	993	249	986	248	981	246	981	244	981	240
	192.1	395	200.5	398	207.7	410	214.8	422	221.6	434	227.4	446
54	75.7	.667	77.0	.688	78.7	.717	79.8	.743	81.3	.768	83.1	.783
	1043	255	1028	253	1024	252	1019	251	1018	248	1016	242
	189.3	395	196.5	404	203.4	417	210.0	428	216.3	440	221.1	449
56	76.3	.673	77.8	.698	79.3	.726	80.4	.752	82.0	.776	83.6	.783
	1070	258	1063	256	1058	256	1054	254	1053	251	1046	242
	186.1	398	192.7	409	199.3	422	205.7	433	211.3	445	214.8	449
58	77.1	.683	78.7	.709	79.9	.736	81.1	.762	82.5	.781	84.3	.785
	1106	262	1100	261	1096	260	1092	258	1085	253	1083	243
	182.7	404	189.0	416	195.2	428	201.2	439	206.4	448	208.0	450
60	77.9	.692	79.5	.720	80.6	.745	81.8	.771	83.1	.784	84.9	.787
	1143	266	1139	265	1132	263	1129	261	1118	254	1120	243
	179.3	410	185.5	422	191.4	433	196.8	444	201.1	450	201.4	451
62	78.7	.701	80.0	.728	81.2	.753	82.4	.777	83.6	.784	85.7	.788
	1178	269	1173	268	1167	266	1162	263	1148	254	1160	244
	176.2	415	182.1	427	187.7	438	192.7	448	195.8	450	194.8	452
64	79.4	.712	80.6	.737	81.8	.763	82.9	.781	84.2	.786	86.1	.780
	1217	274	1211	272	1207	270	1193	265	1185	255	1177	241
	173.1	421	178.6	433	183.9	444	188.7	450	190.1	451	190.1	448
66	80.2	.722	81.2	.746	82.4	.771	83.4	.784	84.8	.787		
	1255	278	1247	275	1244	273	1227	266	1223	255		
	170.1	427	175.4	438	180.2	449	184.2	452	184.7	452		
68	80.7	.728	81.8	.753	83.0	.777	83.8	.784	85.5	.788		
	1289	280	1283	278	1278	275	1256	266	1262	255		
	167.3	431	172.3	442	176.8	452	179.9	452	179.1	452		
70	81.2	.737	82.4	.763	83.5	.781	84.4	.786	86.2	.788		
	1327	284	1324	282	1309	277	1292	267	1300	255		
	164.4	436	169.0	448	173.4	454	175.2	453	173.8	452		
72	81.7	.745	82.9	.771	83.9	.783	84.9	.787	86.4	.773		
	1364	287	1362	285	1342	278	1329	267	1300	250		
	161.6	441	166.0	452	169.8	456	170.6	454	170.5	443		
74	82.2	.752	83.5	.776	84.4	.784	85.5	.788				
	1399	290	1397	288	1373	278	1368	267				
	159.0	445	163.1	456	166.1	456	166.0	454				
76	82.8	.760	84.0	.781	84.8	.785	86.2	.788				
	1439	294	1429	289	1407	279	1407	267				
	156.3	450	160.2	458	162.3	457	161.8	454				
78	83.3	.768	84.3	.782	85.3	.787	86.5	.782				
	1478	297	1459	290	1444	279	1426	265				
	153.7	454	157.3	459	158.4	457	158.1	451				

LOW AIR CONDITIONING	ENGINE ANTI ICE ON	TOTAL ANTI ICE ON
△FUEL = − 0.6 %	△FUEL = + 2.5 %	△FUEL = + 4 %

Abbildung 13: Long Range Cruise Tabelle, grau Optimum Flight Level gemäss Verbrauch pro Distanz (NM/1000kg) für Airbus A320.[37]

Somit resultiert für jedes aktuelle Gewicht (sowie in Abhängigkeit der Temperatur, hier mit ISA[38] angenommen) eine optimale Flughöhe, bei welcher die benötigte Treibstoffmenge pro zurückgelegte Distanz minimiert wird und welche somit aus ökonomischen und ökologischen Aspekten eine effiziente Flughöhe darstellt. Grundsätzlich fliegen schwere Flugzeuge tiefer und leichte Flugzeuge höher. Ein Verkehrsflugzeug ändert sein Gewicht während des Fluges aufgrund des Treibstoffverbrauchs im Bereich zweistelliger Tonnenbeträge. Somit steigt die

[37] Volare Flight Crew Operating Manual, "In Flight Performance", Long Range Cruise, 3.05.15 P13, SEQ200, REV 30: V4L MSN 1125 1259.

[38] Internationale Standardatmosphäre.

optimale Flughöhe im Verlauf des Fluges an und das Flugzeug sollte steigen. Dies kann wegen der Vorgabe von fixen Flugflächen durch die Flugsicherung nur in Stufen geschehen, weswegen das resultierende Steigen im Reiseflug im Verlauf der Zeit *Step Climb* genannt wird. Dieses Verfahren aus der Praxis bedeutet eine Ineffizienz zum optimalen Cruise Climb, welcher nicht stufenweise, sondern konstant steigend erfolgen würde, was in der konstanten, und nicht stufenweisen, Abnahme des Fluggewichts begründet ist.[39] Die folgende Abbildung zeigt ein typisches, ideales Höhenprofil (*Idealtrajektorie*) sowie das Verfahren *Step Climb*.

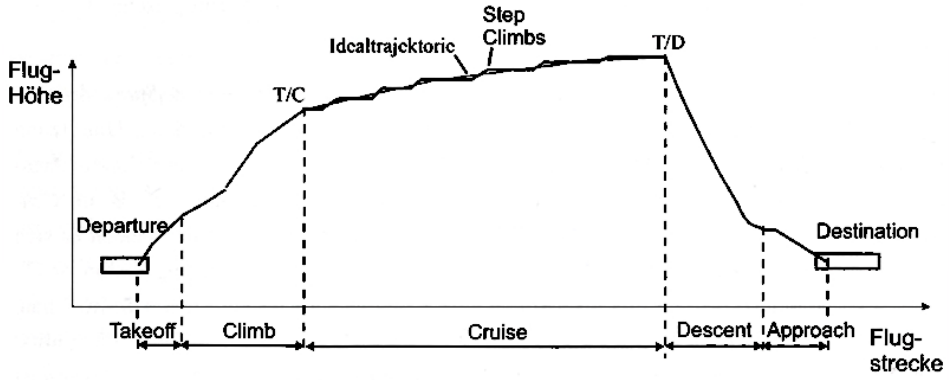


Abbildung 14: Vertikale Flugbahn: Idealtrajektorie und Step Climbs.[40]

2.6.3 Optimale Geschwindigkeit

Ein Flugzeug hat in jeder Flugphase und abhängig von der Höhe eine optimale Geschwindigkeit, bei welcher es einen minimalen und damit ökonomischen Treibstoffverbrauch aufweist. Dabei steht stets ein optimaler Treibstoffverbrauch im Vordergrund. Dies sei hier am Beispiel der wichtigen Flugphase des Cruise Flight näher erläutert:

Bei einem konstanten Cruise Verfahren wird die Reichweite durch die jeweilige Geschwindigkeit bestimmt. Die Reichweite bei bestimmten Bedingungen, genannt *Specific Range* (SR), ist definiert als Geschwindigkeit (TAS, gemessen in NAM[41]) geteilt durch den Treibstoffverbrauch *Fuel Flow* (ff, gemessen in Treibstoff pro Stunde) bei dieser Geschwindigkeit (in Meilen in der Luftmasse pro Fueleinheit). Die Flughöhe und das Gewicht des Flugzeugs sind bei dieser Betrachtung zunächst fixe Werte, weil ja diese Parameter die Rahmenbedingungen und damit die SR verändern. Für die Ermittlung der maximalen Reichweite wird der Wert

[39] Padilla (1996): S. 142 f.
[40] Tröndle (2001): S. 16
[41] NAM = Nautical Air Mile.

Maximum Range Cruise (MRC) ermittelt, aus welchem die korrespondierende Geschwindigkeit resultiert. Die MRC Geschwindigkeit wird dabei so lange variiert, bis die maximale Reichweite fest steht. Diese Geschwindigkeit gilt als effizienteste Geschwindigkeit, da sich so mit der verfügbaren Treibstoffmenge am weitesten fliegen lässt. Für den Windeinfluss, welcher dabei nicht berücksichtigt wird, sind Modifikationen zum *MRC* notwendig. Die *MRC* Machzahl (TAS wird unter Berücksichtigung der Temperatur in Mach umgerechnet) reduziert sich im Verlaufe des Fluges, da das Gewicht des Flugzeugs abnimmt.
Für die Praxis wurde in Abhängigkeit des *MRC* ein weiterer Wert definiert, welcher im Reiseflug bei reichweitenkritischen Flügen als optimale Geschwindigkeit benutzt wird*: Long Range Cruise (LRC)*. *LRC* entspricht 99% von *MRC* auf der rechten Seite der Kurve (der schnelleren Seite). Dazu folgendes Beispiel:

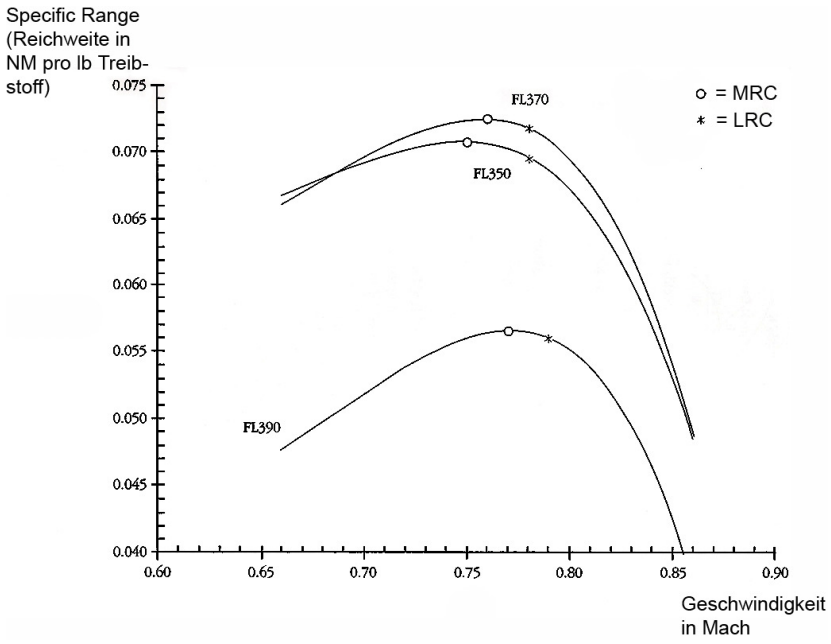


Abbildung 15: MRC (Kreis) und LRC (Stern) zeigen Reichweite (SR) pro Pfund Treibstoff im Vergleich zur Geschwindigkeit (Mach). Die Einheit NM ist in diesem Fall als Distanz in der Luft und nicht gegenüber Grund gemeint.[42]

Im Beispiel wird nochmals deutlich, dass die Flughöhe einen wesentlichen Einfluss auf die Reichweite hat. Auf FL 370 wird die grösste Reichweite pro Treibstoffmenge erreicht, während auf FL 390 bereits wesentlich weniger weit geflogen werden kann. Der Einfluss von Gegenwinden sorgt dafür, dass die *MRC* Geschwindigkeit höher zu liegen kommt, während gleichzeitig die Reichweite abnimmt.[43] Ferner nimmt die Reichweite mit steigendem Fluggewicht ab.[44]

[42] Padilla (1996): S. 135.
[43] Padilla (1996): S. 142.

2.6.4 Optimale Geschwindigkeit II: Cost Index und ECON Mach

Während in den oben gemachten Betrachtungen zur optimalen Geschwindigkeit stets die Reichweite (*SR*) das Kriterium war, welches durch Optimieren des *fuel flow* maximiert werden sollte, sprechen die Ökonomen vom Minimieren der Kosten. Es handelt sich dabei um die exakt gleichen Überlegungen, aus der jeweiligen Perspektive betrachtet. Die Gesamtkosten eines Fluges werden von zwei einander gegenläufigen Faktoren bestimmt. Einerseits entstehen durch den Betrieb eines Flugzeuges gewisse Kosten wie Löhne, Abschreibung, Wartung, Versicherung etc. Diese Kosten werden *Time Costs* genannt und fallen entsprechend der Flugdauer (Zeit) an. Es dürfen dabei nur jene Kosten berücksichtigt werden, die sich durch zusätzliche Flugzeit ergeben. Monatliche Gebühren oder jährliche Flugzeugchecks ohne Bezug zu Flugstunden sollen unter *Time Costs* nicht berücksichtigt werden. Die Berechnung bezieht sich auf die Blockzeiten. Die *Time Costs* fallen somit umso geringer aus, je kürzer der Flug dauert. Eine hohe Geschwindigkeit reduziert die Flugzeit und damit die *Time Costs*. Andererseits entstehen als wesentliche direkte Kosten des Flugbetriebs so genannte *Fuel Costs*. Die *Fuel Costs* sind abhängig von der gewählten Geschwindigkeit. Aus aerodynamischen Gründen (Widerstand durch Anstellwinkel) nehmen die *Fuel Costs* mit steigender Geschwindigkeit bis zu einem Optimum ab und steigen ab dort überproportional wieder an.[45]

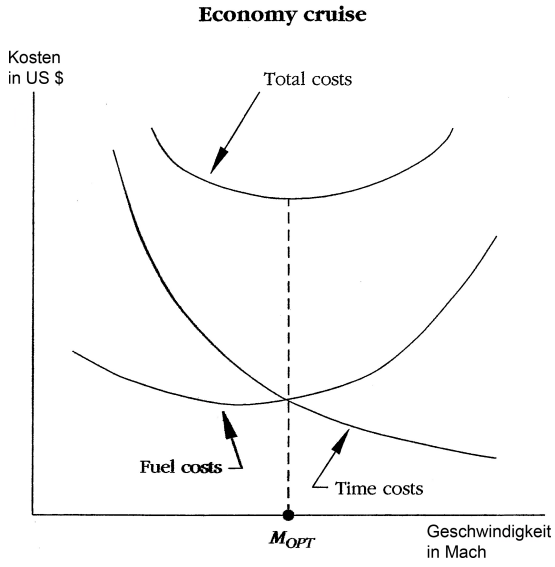


Abbildung 16: Gesamtkosten (Total Costs) aus Fuel Costs und Time Costs. M_{OPT} ist die Geschwindigkeit, bei welcher die gesamten Kosten am tiefsten sind.[46]

[44] Padilla (1996): S. 145.
[45] Padilla (1996): S. 131 f.
[46] Padilla (1996): S.156

Das Verhältnis zwischen *Time Costs* und *Fuel Costs* lässt sich formal definieren, um so eine gemeinsame Berücksichtigung zu erlangen. Der so genannte *Cost Index (CI)* entspricht dabei den Zeitkosten ($ pro min) geteilt durch die Treibstoffkosten (Dollar pro kg). Ein einfaches Rechenbeispiel ergibt bei einem Blockstundenpreis von 2340$ (Airbus A320) und einem Treibstoffpreis von 650 US Dollar/ Tonne einen *CI* von 60[47]. Die direkten Gesamtkosten ergeben sich aus Zeit Mal *CI* plus verbrauchte Treibstoffmenge und widerspiegeln sämtliche Kosten in kg Treibstoff pro Minute. Während vorgängig *SR* nach dem *fuel flow* optimiert wurde, wird der neu als (Δ Distanz / Δ Kosten) definierte Wert *Specific Range Economy* SR_E maximiert. Es resultiert eine optimale Geschwindigkeit *ECON Mach*, welche eine effiziente auf einer kombinierten Zeit- und Treibstoffverbrauchs- Betrachtung basierte Geschwindigkeit darstellt. SR_E hat bei einer tieferen Reichweite pro Pfund Treibstoff eine höhere Geschwindigkeit als *SR*. Das erklärt sich durch die Berücksichtigung der Zeitkosten in SR_E, während *SR* lediglich den Treibstoffverbrauch berücksichtigt. Bei einem *CI* von Null, was einer Nicht-Berücksichtigung der Zeitkosten gleich kommt, wären folglich *SR* und SR_E identisch.

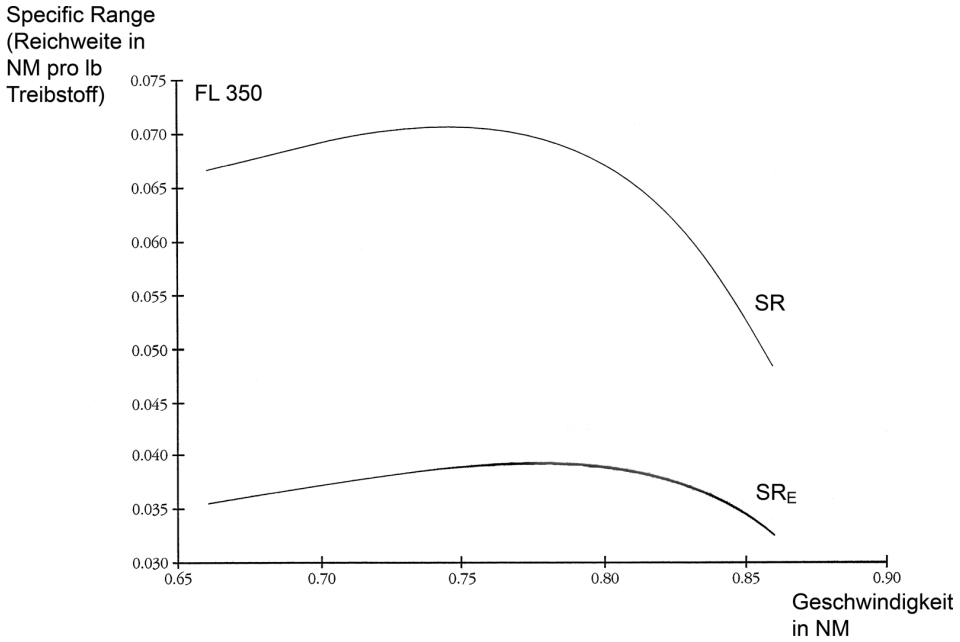


Abbildung 17: SR (Berücksichtigung von Treibstoffverbrauch) und SR_E (Berücksichtigung von Zeit- und Treibstoffkosten) bei verschiedenen Geschwindigkeiten.[48]

[47] (2340$/60min)/(650$/1000kg)=60.
[48] Padilla (1996): 160.

Somit ist für alle Rahmenbedingungen eine effiziente Fluggeschwindigkeit bekannt und deren Umsetzung in operationellen Verfahren sorgt für Geschwindigkeits-effiziente Flüge. Ganz so einfach ist dies in der Praxis jedoch bei Weitem nicht, da zusätzliche Parameter die Wahl eines abweichenden, und damit nicht-effizienten, Geschwindigkeitsregimes verursachen. Zeitdruck, Separation und Staffelung durch die Flugsicherung sowie weitere Gründe verhindern in der Praxis häufig, dass alle Flugzeuge mit ihrer ökonomisch effizientesten Geschwindigkeit fliegen können. Weitere Erklärungen zum Thema optimale Fluggeschwindigkeit finden sich in „Optimizing Jet Transport Efficiency“ von Padilla (1996).

2.7 Flugplanung im FMS

Das *Flight Management System* (*FMS*) ist eines der zentralen Flugplanungs- und -steuerungssysteme an Bord moderner Verkehrsflugzeuge. Das FMS berechnet gemäss eingegebenen Vorgaben resultierende Parameter in Form eines detaillierten 4D-Flugprofils. Die wesentlichen, dafür benötigten Parameter sind: Eine definierte laterale Route, Flugleistungsdatenbank (Performance Database), ATC-Vorgaben und aktuelle Winddaten. Daraus ermittelt das FMS in jeder Phase des Fluges die optimalen Flugparameter. Grundsätzlich werden damit die ökonomisch sinnvollsten Werte generiert. Mittels Beschränkungen (constraints) können die Berechnungen jedoch auf beliebige Werte hin fixiert werden, zum Beispiel betreffend der Zeit, Höhe, Geschwindigkeit, etc.
So lässt sich im FMS ein zeitgenauer Überflug eines bestimmten Waypoints vorausbestimmen, woraus dann die notwendige Geschwindigkeit resultiert. Dieses Verfahren ist jedoch nur so genau, wie die Eingangsdaten sind. Variationen in der tatsächlichen Windsituation gegenüber den Berechnungsdaten sowie Abkürzungen/ Verlängerungen durch die Flugsicherung gegenüber dem eingegebenen lateralen und vertikalen Flugweg verzerren das Resultat und sorgen für Ungenauigkeiten. Das FMS stellt eine computergesteuerte Plattform dar, welche einen effizienten Flug berechnet und diesen auf Grund zusätzlicher Daten an aktuelle Bedürfnisse und Restriktionen anpasst. Die gesamten Integrationsschritte des FMS zur Berechnung der 4D Trajektorie sind wesentlich komplexer als hier dargestellt und werden bei Tröndle genauer erklärt.[49]

[49] Tröndle (2001), Kapitel 4.

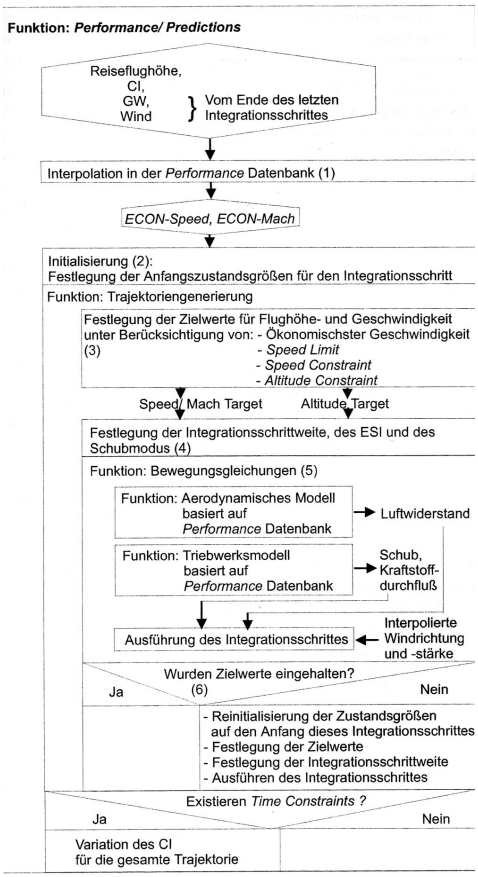


Abbildung 18: Integrationsroutine: Performance/ Predictions-Modul eines FMS.[50]

2.8 Gründe für Abweichungen von effizienten Flugrouten

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass ein Flug von A nach B nicht auf dem direktesten Weg fliegen kann. Dies ist in der Fliegerei nicht anders als bei Strassen- und Schienenverkehr, jedoch ist die Darlegung, wieso dies so ist, etwas komplexer. Grundsätzlich sind am Himmel keine Hindernisse (abgesehen von signifikanten, meteorologischen Ereignissen) zu sehen, wie dies beim erdgebundenen Verkehr der Fall ist. Somit wäre es, salopp gesagt, auch nicht notwendig, Umwege zu fliegen. Es liegt auf der Hand, dass diese Überlegung zu kurz greift. Im Folgenden werden die wesentlichen Gründe genannt, weshalb heutige Flugrouten nicht optimal und nicht stets auf direkten Kursen verlaufen.

[50] Tröndle (2001): S. 67.

2.8.1 Militärische Lufträume

Den militärischen Luftraumnutzern wird Luftraum für operationelle Flugaufträge zur Verfügung gestellt. Diese Lufträume sind verschiedenartig ausgelegt und werden entsprechend ihrer Funktion benannt. So gibt es beispielsweise in Deutschland Flugbeschränkungsgebiete für den militärischen Tiefflug. Von grosser Bedeutung für die kommerzielle Luftfahrt sind jedoch die *Temporary Restricted Areas (TRA)*. Eine TRA ist in ihrer vertikalen und horizontalen, sowie in der Regel auch ihrer zeitlichen Dimension definiert. Sie kann also aktiv oder inaktiv sein. Oft bilden mehrere benachbarte Sektoren zusammen einen grösseren militärischen Luftraum, können jedoch auch einzeln aktiviert werden. Nebst den temporären militärischen Zonen gibt es auch permanente Zonen, welche nie für die kommerzielle Luftfahrt frei gegeben werden.[51] Die folgende Abbildung 19 zeigt die wesentlichen militärischen Lufträume in Europa:

Abbildung 19: Militärische Lufträume in Europa.[52]

Auffallend ist, dass eine grosse Zahl von solchen Zonen über Europa verteilt ist. Jede Nation möchte ihrem Militär Übungsgebiete für die Luftwaffe zur Verfügung

[51] Mensen, 2004: S. 133 ff.
[52] EUROCONTROL.

stellen, was zu einer Verteilung von militärischen Lufträumen über den ganzen Kontinent führt. Somit erfährt die kommerzielle Luftfahrt Einschränkungen in der Gestaltung und Wahl von Luftverkehrsstrassen. Diese Art von Hindernis macht die optimale Nutzung des Luftraums unmöglich und führt einerseits zu bedeutenden Ineffizienzen, andererseits auch zu Kapazitätsproblemen. Besonders problematisch sind dabei jene militärischen Zonen, welche in den am dichtest beflogenen, zentraleuropäischen Lufträumen liegen.
In den USA wurden die militärischen Zonen vermehrt ausserhalb und an den Rändern des Festlandes, sowie ausserhalb der dicht beflogenen Regionen platziert. Dies ist in Europa nicht möglich, da es sich um zahlreiche Länder handelt, welche alle ihre Ansprüche im eigenen Land geltend machen.

2.8.2 Das System der ATS-Routen

Der Luftverkehr wird mit Hilfe von Luftstrassen, genannt *Air Traffic Services Routes (ATS-Routen)* geordnet. Ein Beispiel für ein System von ATS-Routen ist die Abbildung 1. Die ATS-Routen sind Verkehrswege und als Orthodrome zwischen bodengestützten Funknavigationsanlagen (VOR, NDB), und immer häufiger auch durch GPS-Koordinaten definiert. Durch die Aneinanderreihung der Grosskreisverbindungen zwischen diesen Navigationspunkten (*Waypoints*) ergeben sich Routenführungen und diese wiederum ein Netzwerk von Luftstrassen, das *System der ATS-Routen*. Das System der ATS-Routen ist historisch aus den herrschenden Bedürfnissen der Luftraumbenutzer sowie nach technischen Möglichkeiten entstanden und unterliegt einem steten Wandel mit dem Ziel, seine Nutzbarkeit zu optimieren. Bei Veränderungen wird darauf geachtet, dass die Neuerungen für die Mehrheit der Luftraumbenutzer Verbesserungen bringt, möglichst ohne andere dabei zu benachteiligen.
Es ist nicht möglich, alle wünschenswerten direkten Verbindungen als Luftstrassen zu gestalten, da die Vielzahl dieser Routen sonst nicht mehr überschaubar und auch nicht mehr koordinierbar wäre (Vorschriften für jede Luftstrasse). Aus diesem Grund führen zwangsläufig fehlende ATS-Routen zu Ineffizienzen bei der Durchführung der meisten Flüge. Das Ausmass der Ineffizienzen ist jedoch sehr unterschiedlich.
Ein gutes Beispiel für den Einfluss ATS-Routen auf die Effizienz von Flugrouten ist Afrika. In Afrika wurden Strecken primär in Nord-Süd Richtung definiert. Diese Strecken sind für den Verkehr zwischen Westeuropa und Afrika ideal und erlauben auf dieser Achse sehr effiziente Flüge. Die Hauptflugrouten sind in der folgenden Abbildung 20 durch blaue Linien abgebildet:

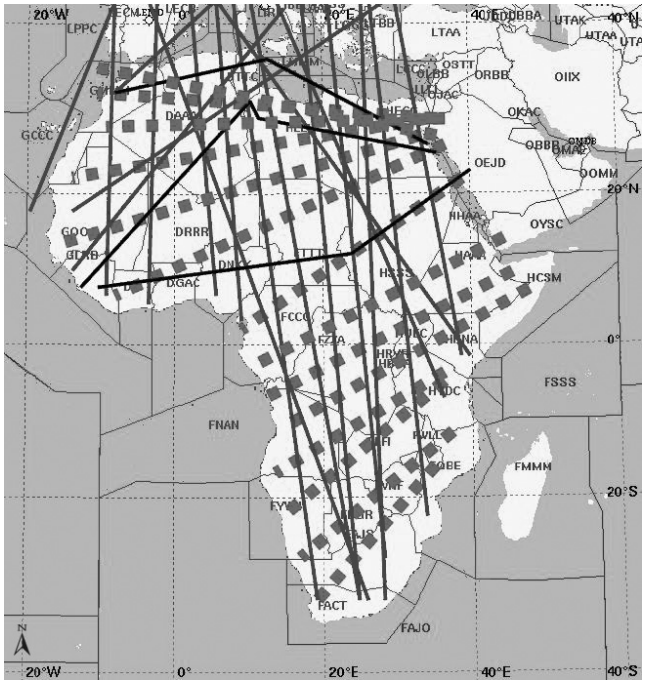


Abbildung 20: Routenstruktur über Afrika, primär Nord-Süd Verlauf (graue Linien). Die gestrichelten Ost-West Linien stellen gewünschte Verbindungen für einen AO in der Golfregion dar. Verfügbar sind jedoch nur die geknickten Ost-West Verbindungen (schwarze Linien).[53]

Fluggesellschaften, welche Afrika in Ost-West Richtung befliegen (schwarze Linien), erfahren das Problem fehlender Luftstrassen, wie das folgende Beispiel eines Fluges von Dakar nach Jeddah ebenfalls zeigt (Abbildung 21):

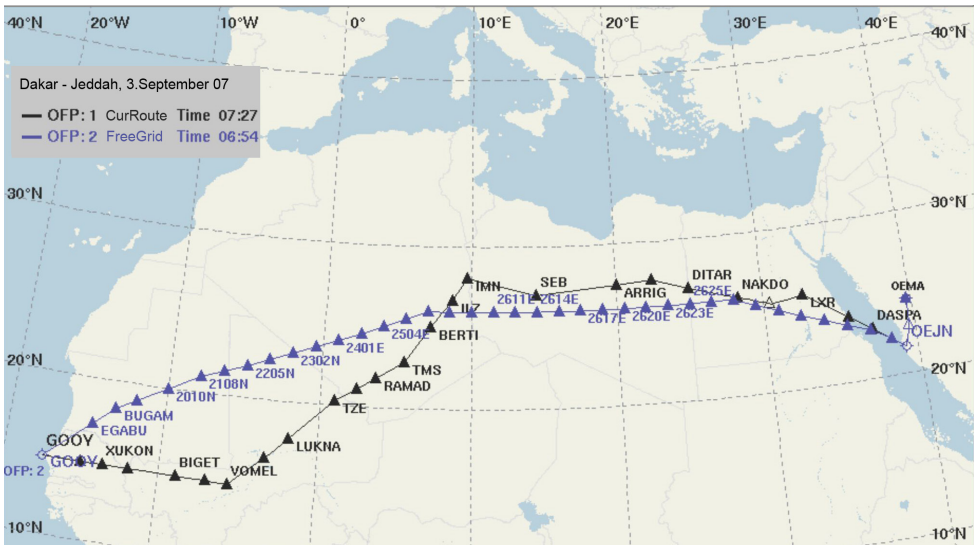


Abbildung 21: Flug Dakar – Jeddah am 3.September 2007.[54]

[53] Gutt (o.J.): S.43.
[54] Lufthansa.

Während die ATS-Routenstruktur über Afrika westeuropäischen Fluggesellschaften sehr effiziente Verbindungen erlaubt, müssen all jene Fluggesellschaften, welche primär entlang den Breitengraden fliegen, grosse Abweichungen von der optimalen Flugroute in Kauf nehmen.
Bei der Beurteilung des Systems von ATS-Routen wird zwischen zwei möglichen Problemen unterschieden: Einerseits können ATS-Routen suboptimal definiert sein, beispielsweise indem sie in der Form eines Zickzacks verlaufen. Ein Beispiel dafür ist die Luftstrasse B215/ B330 im chinesischen Luftraum. Andererseits kann es sein, dass Luftstrassen völlig fehlen und aus diesem Grund ein Umweg über mindestens einen zusätzlichen Waypoint geflogen werden muss.[55]

2.8.3 Kapazität im ATS-System

Die Kapazität der Lufträume ist ein viel diskutiertes Thema im Zusammenhang mit Verspätungen. Häufig fehlen Gesamtsimulationen auf der makroskopischen Ebene, sodass eine genaue Aussage über die tatsächliche und damit auch über die genutzte Kapazität des Systems nicht möglich ist. Bekannt sind jedoch jene Situationen, in welchen Kapazitäten von Sektoren begrenzt sind und daraus Verspätungen resultieren. Die begrenzten Kapazitäten von Flughäfen spielen die wichtigste Rolle als Grund für Verspätungen. Kapazitätsprobleme werden üblicherweise durch eine Zuteilung von slots (Zeitfenster) reguliert, womit die betroffenen Flugzeuge gegebenenfalls für eine bestimmte Zeit am Boden behalten werden. Betrifft ein slot einen Streckenbereich und nicht den Zielflughafen, dann kann sich eine Fluggesellschaft möglicherweise entscheiden, einen alternativen, längeren Flugweg zu planen, um eine grössere Verspätung zu verhindern. Dies entspricht einer ökonomischen Abwägung zwischen zusätzlichen direkten Flugkosten und den komplexen Kosten, welche aus Verspätungen resultieren. Ein Flug kann dann unter Umständen auf deutlichen Umwegen an sein Ziel gelangen, was eine Ineffizienz auf Grund von Kapazitätsmängeln im System darstellt.[56]
Die Notwendigkeit der Staffelung von Flugzeugen auf einer Luftstrasse stellt einen weiteren die Kapazität begrenzenden Faktor dar. Dabei kommen je nach verfügbaren technischen Hilfsmitteln (Radar etc.) unterschiedliche Regeln zu Anwendung. Im Extremfall kann eine Separation von 20 Minuten zwischen zwei einander folgenden Flugzeugen verlangt sein (Beispiel: Gewisse Regionen in Afrika)[57]. Problematisch ist dabei der Übergang von Gebieten mit engen

[55] Mensen (2004): S. 126.
[56] Donohue (1997): S.46.
[57] ICAO Doc 7030, Regional Supplementary Procedures, Kapitel Africa-Indian Ocean (AFI).

Staffelungsmöglichkeiten zu solchen mit grösseren geforderten Abständen zwischen den Flugzeugen.

2.8.4 Restriktionen im ATS-System

Um die Kapazität in den bestehenden Strukturen zu gewährleisten oder zu erhöhen, gibt es im ATS Netzwerk zahlreiche Restriktionen (Auf politische Restriktionen des ATS-Systems wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.). Solche Restriktionen können lateral und vertikal, aber auch zeitlich definiert oder an eine Bedingung geknüpft sein. Ein Beispiel für eine solche Restriktion betrifft die Strecke von London City nach Zürich. Wie in der untenstehenden Abbildung 22 ersichtlich ist, verlaufen die heutigen Flugrouten (rot, ergänzt durch dunkelgrün) östlich und westlich der direkten Verbindung (theoretisch, blau), obwohl eine Luftstrasse verfügbar wäre, welche wesentlich näher an der direkten Verbindung liegt und damit effizienter wäre (hellgrün gestrichelt). Diese UL15 genannte Luftstrasse ist jedoch nur für Verkehr zwischen Grossbritannien und Destinationen südlich von Lugano verfügbar und damit zwischen London City und Zürich keine Option, was zur nachfolgend dargestellten Ineffizienz führt.

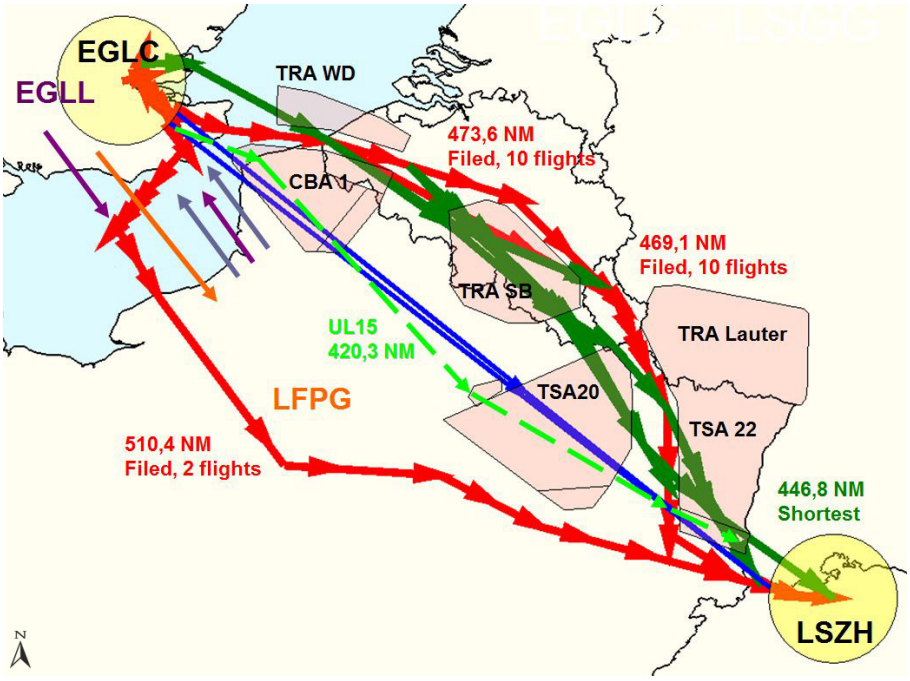


Abbildung 22: Flugstrecke London City – Zürich, Juli 2007: rot = Flugplan, dunkelgrün = tatsächlich geflogene Strecken (nur wo abweichend von rot), blau = direkte Verbindung (theoretisch), hellgrün = UL15.[58]

[58] EUROCONTROL.

Eine Beispiel für vertikale Restriktionen liefert das *Flight Level Capping* gennannte Verfahren. Diese Verfahren legt Höhenrestriktionen für eine Auswahl von Flugstrecken fest und entspricht einem komplizierten Regelwerk für die betroffenen Flugregionen und Städtepaare. Im Wesentlichen wurde *Flight Level Capping* eingeführt, weil für die meisten Flugzeuge die optimale Höhe zwischen FL 350 – FL 370 liegt. Somit herrscht auf diesen Höhen eine hohe Dichte an Verkehr. Da ein optimaler Kurzstrecken-Flug beinahe parabelförmig verläuft, steigen diese Flüge idealerweise in solche Höhen auf, während Langstreckenflugzeuge zu Beginn des Fluges auf Grund des hohen Gewichts Flughöhen unterhalb dieses Bereichs einnehmen. Dies führt bei den zahlreichen Kurzstreckenflügen zu entsprechend häufigen vertikalen Kreuzungspunkten im Steig- und Sinkflug, was die Koordination wesentlich erschwert. Deshalb erhalten Flüge von kurzer Zeitdauer zur Aufrechterhaltung der Kapazität keine Freigaben für diese Flughöhen. Die folgende Abbildung 23 eines Langstreckenfluges (Düsseldorf - Atlanta) und eines Kurzstreckenfluges (Amsterdam – Glasgow) veranschaulicht die Problematik:

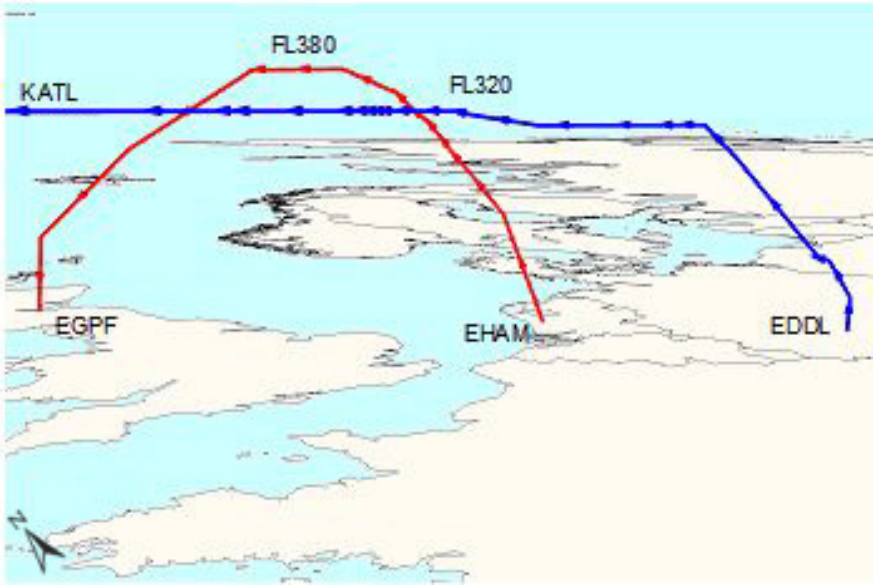


Abbildung 23: Grund für Flight Level Capping: Langstrecke (blau), Kurstrecke (rot).[59]

Im Wesentlichen entspricht Flight Level Capping einer vertikalen Restriktion im bestehenden ATS zur Wahrung der Kapazität.
Weiter gibt es Zeit-Restriktionen, während denen bestimmte Flugrouten und Luftraumsektoren benützt werden dürfen oder eben nicht. Prominentes Beispiel

[59] EUROCONTROL, ANT/42 WP 8, Kapitel 3.6.

aus Schweizer Sicht ist die *Durchführungsverordnung (220. DVO)* von Deutschland, welche zu Beschränkungen für die An- und Abflüge in Zürich führt. Anflüge von Norden her über Deutsches Hoheitsgebiet führend dürfen damit zwischen 21.00 und 07.00 Uhr nur in Ausnahmefällen[60] durchgeführt werden, was in diesem Zeitraum meist zu Süd- oder Ostanflügen führt. Daraus ergeben sich wesentliche Änderungen für die Nutzung der Luftraumstrukturen.[61]
Bei Langstreckenverbindungen werden transozeanische Strecken meist an kontinentale Regelwerke angebunden. So führen die Tracks des NAT beispielsweise in European Routes (EUR) und North American Routes (NAR) über, welche nach genauen Regeln vorschreiben, auf welchen Strecken ein Flug so zu seinem Zielflughafen gelangen darf. Diese Regelwerke dienen ebenfalls der Verkehrsflusssteuerung und bewirken für den einzelnen Flug teilweise deutliche Abweichungen von der optimalen Route.

2.8.5 Politische Differenzen

Politische Konflikte und Differenzen zwischen einzelnen Nationen führen immer wieder dazu, dass Lufträume für bestimmte Teile des Luftverkehrs oder auch ganz gesperrt werden. Beispiele aus der jüngeren Vergangenheit sind die Krisen in Afghanistan und Irak. Grundsätzlich bedarf es einer Bewilligung bzw. eines Abkommens zwischen zwei Nationen, damit ein Flugzeug den jeweils anderen Luftraum durchfliegen darf. Solch eine Vereinbarung kann meist jederzeit und oft fristlos gekündigt werden, was im Fall von politischen Krisen auch geschieht.
Eine weitere Art von politischen Differenzen sind jene Situationen, in denen gezielt einzelne Interessen blockiert werden. So werden derzeit Flugzeuge aus der Schweiz (sowie weiteren Nationen) im serbischen Luftraum zugelassen, dürfen jedoch auf Grund der Kosovo-Krise keine Anflüge durch serbischen Luftraum nach Pristina durchführen. Somit steht der serbische Luftraum auf einem Flug von Zürich nach Pristina nicht zur Verfügung, während ein Flug von Zürich nach Belgrad kein Problem darstellt. Dies ist ein Konflikt, der im Stillen ausgetragen wird – offiziell existieren dazu weder Restriktionen noch offizielle Anordnungen. Jeder weiss in der Praxis jedoch, dass ein Flugplan mit einem Routing über Serbien nach Pristina zwar eingereicht werden kann, der Flug jedoch von den zuständigen Stellen vor Ort umgeleitet werden wird. Das Resultat von dieser inoffiziellen Verfügung zeigt sich in Abbildung 24. Die Blockierung eines gesamten Luftraumes führt meist zu wesentlichen Ineffizienzen und kann sogar einen Flug

[60] Meteorologischer Natur.
[61] Nachrichten für Luftfahrer, DFS.

verunmöglichen oder eine Zwischenlandung für eine zusätzliche Betankung verlangen.

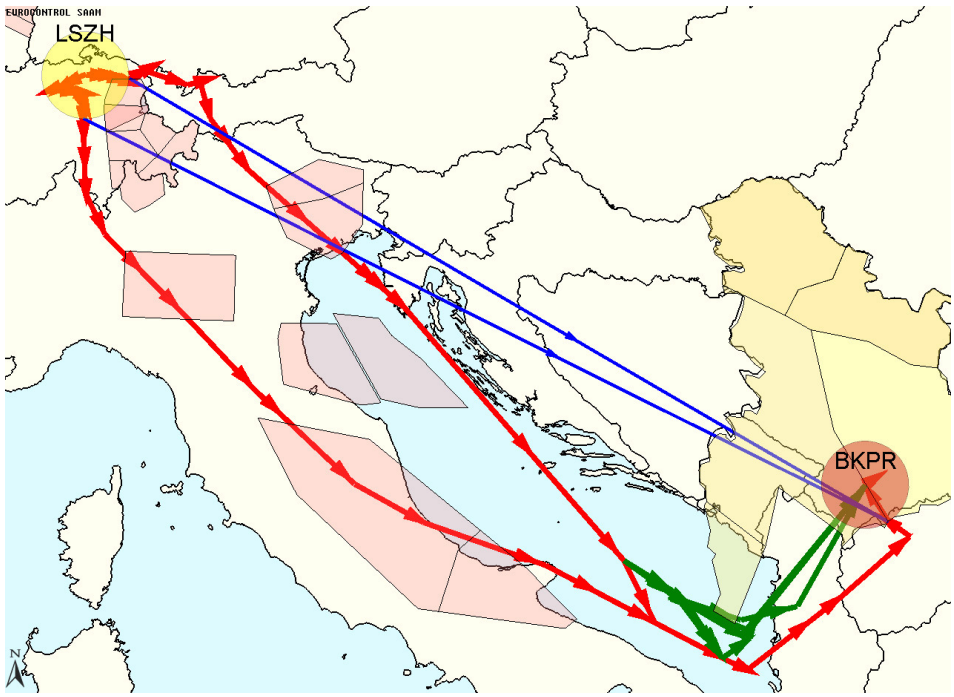


Abbildung 24: Flüge von Zürich nach Pristina im Juli 2007: rot = Flugplan, grün = tatsächlich geflogene Strecken (wo abweichend von rot), blau = direkte Verbindung (theoretisch).[62]

2.8.6 Meteorologische Gründe

„Das Wetter als eine der wichtigsten Einflussgrössen auf die Luftfahrt spielt bei den Bestrebungen nach Sicherheit und Wirtschaftlichkeit eine entscheidende Rolle.“[63] Während mit Wirtschaftlichkeit die Ermittlung der optimalen Route mit bestem Windeinfluss insgesamt gemeint ist, fallen unter den Aspekt Sicherheit primär fluggefährdende Phänomene. Dazu gehören vor allem Gewitter (Blitzschlag und starke Turbulenz), Hagel, Vereisung, Turbulenzen in klarer Luft, Windscherungen, Schnee- und Sandstürme, Starkniederschläge, Vulkanasche sowie sämtliche weiteren Sturmphänomene wie Windhosen und Zyklone. Abbildung 25 teilt die wichtigsten Ereignisse nach Bedeutung für Effizienz und Sicherheit ein.

[62] EUROCONTROL
[63] Mensen (2004): S. 51

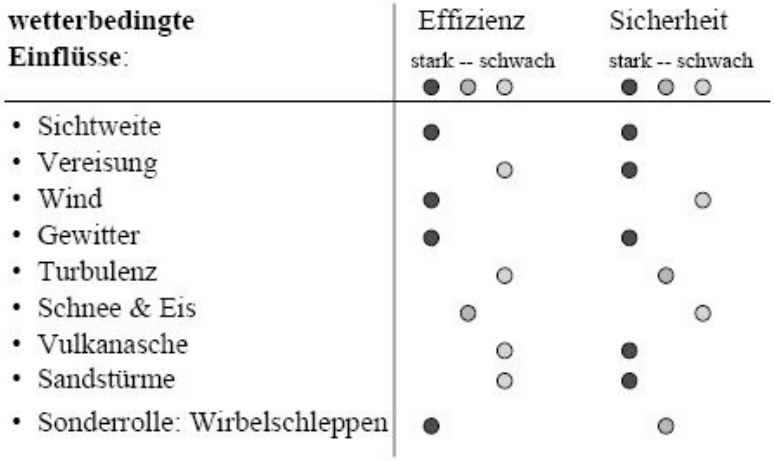


Abbildung 25: Wetterbedingte Einflüsse auf den Flugverkehr, aufgeteilt nach Effizienz und Sicherheit.[64]

Das Auftreten von solchen Ereignissen führt dazu, dass Flugzeuge diesen Gefahren unter Umständen ausweichen und damit Umwege in Kauf nehmen müssen. Es ist unbestritten, dass Wetter eine der Hauptursachen für Verspätungen (zeitlichen Verzögerungen, nicht zwingend Umwegen) ist. Dabei treten die Probleme meist am Flughafen beim Start oder bei der Landung auf. Dies gilt in weniger signifikantem Ausmass auch für die Effizienz auf Flugrouten im en route Bereich. Hauf ist der Ansicht, dass ein wesentlicher Teil der wettberbedingten Effizienzeinbussen durch einen verbesserten Wetterdienst verhindert werden könnte. Seiner Ansicht nach sind die heutigen Modelle und Messverfahren deutlich zu verbessern, um so über genauere Wetterdaten und Prognosen sich anbahnende Wetterphänomene frühzeitig einzuplanen. Auf diese Weise liessen sich deren Auswirkungen reduzieren.[65]

2.8.7 Weitere Gründe

Die Kompetenz jener Stelle, die die Flugplanung durchführt, in der Regel *Flight Dispatch*, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Flugplanung. Diese äussert sich in der in jeder Hinsicht optimalen Wahl der Flugroute. Fehlende Informationen, z.B. über neue, kürzere Streckenabschnitte, und das Fehlen eines umfassenden Verständnisses können dazu führen, dass Flugrouten nicht optimal geplant werden. Mangelnde personelle Ressourcen und fehlende technische Hilfsmittel können ebenfalls für geplante Ineffizienzen verantwortlich sein. Die Flugplanung wird aus Kostengründen bei einigen AO mit knapp bemessenen,

[64] Hauf (2004): S. 26.
[65] Hauf (2004): S. 10ff.

personellen Ressourcen und suboptimalen automatisierten Prozessen durchgeführt, was wiederum zu entsprechenden Resultaten führen kann.

Es gibt auch Situationen, wo Flüge bewusst nach Kriterien geplant werden, die einer optimalen Flugroute widersprechen. Beispiele dafür sind Ausbildungsflüge, welche bestimmte Verfahren abfliegen, oder Rundflüge, welche aus Effizienzbetrachtungen nicht erklärbar sind. Solche Flüge sind aus den Samples heraus zu filtern, um kein verfälschtes Bild zu erhalten.

3 Studie *EUROCONTROL*: Kontinentale Flüge

3.1 Über die Studie

Die vorliegende Studie wurde im Frühjahr 2007 im Anschluss an zwei Meetings mit EUROCONTROL in Brüssel initiiert und in Zusammenarbeit mit EUROCONTROL durchgeführt. Die Abteilung Airspace Network Design (AND) von EUROCONTROL führt seit rund zwei Jahren Studien zum Thema Flight Efficiency durch, wobei das Thema intern bei EUROCONTROL auch von weiteren Einheiten aus verschiedenen Blickwinkeln bearbeitet wird. AND lieferte sämtliche Daten für diese Studie.

Das Thema Flight Efficiency erfreut sich wachsender Beliebtheit bei Fluggesellschaften und Flugsicherungen, weshalb bereits eine Anzahl solcher Studien durchgeführt wurde. EUROCONTROL führt im Rahmen von *Route Extension Analysis* regelmässig Auswertungen für ausgewählte Traffic Samples durch und verfügt über umfassende Erfahrungen im Bereich dieser Untersuchungen. Der Fokus dieser Studie wurde durch die Wahl des Traffic Samples auf ein bestimmtes Netzwerk von Flügen gelegt. Die Wahl fiel dabei mit Swiss International Air Lines (Swiss) auf die bedeutendste Schweizer Fluggesellschaft.

3.2 Wahl der Flugrouten

Für die Studie wurden sämtliche Flüge von Swiss International Air Lines in der Woche vom 4. bis 10. Juli 2007 ausgewertet. In diesem Zeitraum wurden über 2'500 Flüge aufgezeichnet, wovon nach einer Datenbereinigung noch 2'326 Flüge auf 192 Flugverbindungen für die Berechnungen übrig blieben. All diese Flüge starteten oder endeten auf einem der folgenden Schweizer Flughäfen: Zürich, Basel, Genf und Lugano. Eine Liste aller in diesem Zeitraum angeflogenen und damit berücksichtigten Destinationen befindet sich im Anhang.[66] Die Wahl einer Woche in den Schweizer Sommerferien bedeutet, dass eine Anzahl nicht regelmässig bedienter Strecken (Charterflüge) ebenfalls ausgewertet wurden.

[66] Anhang B.I und B.II.

3.3 Daten

Die ursprünglichen Daten für die Durchführung der Analyse stammen von der Abteilung CFMU[67] von EUROCONTROL, welche sämtliche Flugpläne prüft und archiviert. Die Daten wurden von der Abteilung Airspace and Navigation Team (AND[68]) mit der Software SAAM eingelesen, um daraus die benötigten Daten zu berechnen. Die Daten stammen von den ECAC[69] Ländern, den Mittelmeerländern und Teilen von Russland.

Alle absoluten Zahlen wurden in Nautischen Meilen ermittelt. Die Messung von erdgebundenen Distanzen ist bei EUROCONTROL Standard, obwohl genau genommen der Windeinfluss mit in die Berechnung einfliessen müsste. Für die Ermittlung eines direkten Flugpfades (als optimale Flugroute) beispielsweise ist zwingend auf den Windeinfluss zu achten. Korrekterweise müsste der Berechnung ein bewegtes Medium (Luft) als Ausgangslage dienen, wobei der Windeinfluss dann als Distanzvektor zu- oder abgezählt werden sollte. Dies ist hier nicht gewährleistet, da Distanzen erdgebunden und damit als Grosskreisdistanzen ermittelt werden. Diese Ungenauigkeit bei der Ermittlung der Daten hat zwei Gründe: Einerseits ist es eine wesentliche Vereinfachung, da stets ändernde Windeinflüsse vorher zu sagen sind. Andererseits sind die Flüge innerhalb eines Kontinents (Europa) wesentlich kürzer im Vergleich. Daher lohnt sich ein Abweichen von einer Grosskreisroute weniger, da die laterale Komponente insgesamt mindestens durch den Gewinn an besseren Windverhältnissen kompensiert werden muss. Dies führt dazu, dass man der Ansicht sein kann, in einer pauschalen Berechnung den Windeinfluss vernachlässigen zu dürfen, ohne dabei grosse Fehler zu riskieren. Weiter wurde durch die reine Distanzbetrachtung die vertikale Komponente ausgeblendet. Die Berücksichtigung der Zeitkomponente war in dieser Studie nicht möglich.

EUROCONTROL benutzt für die Datensammlung zwei Arten von Modellen: Model 1 (M1) entspricht den Daten vor Aktivierung eines Fluges. Es handelt sich um Plandaten, wie sie vor Flugbeginn fest stehen. Das zweite Modell, Model 3 (M3) benutzt laufend aktualisierte Daten und stellt als Wert die Plandaten plus deren Anpassungen im Flugverlauf dar. Solche Anpassungen sind beispielsweise kurzfristig verfügbare Routen, taktische Abweichungen von der geplanten Flugroute sowie Änderungen der Flughöhe. Bei einem Vergleich sollten nach Möglichkeit Werte des gleichen Modells miteinander verglichen werden.

[67] Central Flow Management Unit, EUROCONTROL HQ, Brüssel.
[68] Airspace and Network Design, EUROCONTROL HQ, Brüssel.
[69] European Civil Aviation Conference (Auflistung der Länder im Anhang B.III).

3.3.1.1 Filed (F)

Der Wert *Filed* ist der Wert, der von den Fluggesellschaften als Flugplan eingegeben wird. Er entspricht den Angaben im OFP und wird so bei EUROCONTROL zur Bestätigung eingereicht. *Filed* ist damit jener Wert, der als letzte Version vor dem Abflug vorliegt und bestätigt wurde. In einer ideal effizienten Welt entspricht *Filed* dem Wert *Shortest*, da eine Differenz zwischen diesen Werten darauf hinweisen würde, dass die Flugplanung nicht den optimalen (hier kürzesten) Weg kennt. Bei Swiss waren die *Filed* Werte so nahe bei den *Shortest* Werten, dass man von einer effizienten Flugplanung sprechen kann. Der Mittelwert zwischen den Daten *Filed* und *Shortest* beträgt 0.55% Abweichung bei einem Medianwert von 0.00% (Anteil an *Filed*), was darauf hindeutet, dass einige wenige Abweichungen den Mittelwert deutlich anheben. Somit ist die Differenz pauschal betrachtet unbedeutend. Filed ist ein M1 Wert.
Die Wahl der Flugroute kann jedoch auch von anderen Kriterien als jenes der kürzesten Route erfolgen, zum Beispiel um hohe Flugsicherungsgebühren in einer Region zu vermeiden, re-routings bei überlasteten ATC-Sektoren u.a.

3.3.1.2 Shortest (S)

Unter dem Wert *Shortest* wird jener Wert in Nautischen Meilen verstanden, der der kürzesten planbaren Route entspricht. Es handelt sich im Wesentlichen um den Wert der bestmöglichen Flugstrecke unter Berücksichtigung bestehender Strukturen und Restriktionen. Für die vorliegende Studie wurde durch die Verwendung von *Shortest* die Annahme getroffen, dass die AO das Potenzial der Flugstrecken ausnutzen und Ineffizienz in der Planung nicht auftritt (Andernfalls müsste der Wert Filed benutzt werden.). Dies ist in der Praxis nicht immer so und hat im Wesentlichen mit Informations- und Softwareproblemen zu tun. *Shortest* liegt als M1 sowie als M3 Wert vor.

3.3.1.3 Actual (A)

Actual entspricht der tatsächlich geflogenen Distanz in Nautischen Meilen. Ermittelt wird dieser Wert mittels Radaraufzeichnungen im Abstand von einer Minute. Dies stellt somit ein gemittelter Wert dar, da beispielsweise ein Holding Pattern[70] nicht einbezogen wird und auch kleine Abweichungen (Kurven) nicht dargestellt werden. Dies betrifft jedoch primär die TMA und ist somit für den en route Bereich nicht von Bedeutung. Die Daten sind bereits leicht gemittelt, wegen den mit einer Minute relativ langen Intervallen. *Actual* ist ein M3 Wert.

[70] Warteschleife.

3.3.1.4 Direct (D)

Der Wert *Direct* entspricht einer direkten Grosskreis Verbindung zwischen Ausflugspunkt aus der TMA und Einflugspunkt in die TMA. Es handelt sich somit um eine Orthodrome zwischen den TMAs zuzüglich beider Segmente innerhalb der TMA. Die TMA wird zur Vereinfachung durch einen Kreis mit Radius 30 NM (ca. 55.5km) um Start- und Zielflughafen definiert. Für den Zahlenwert wird jedoch die tatsächliche Distanz in der TMA verwendet. Die resultierende Distanz in Nautischen Meilen entspricht so einem direkten Flug unter Berücksichtigung der Tatsache, dass für den An- und Abflug gewisse nicht-optimierbare Verfahren bestehen. Für die Auswertung wurden zwei verschiedene Werte für *Direct* benutzt: Der Wert Ds entspricht die kürzeste Route in M1, während der Wert D3 von M3 stammt.

Im Rahmen der „Flight Efficiency Study“ von EUROCONTROL wird noch der Wert *Great Circle* standardmässig ermittelt. Wie der Name sagt, handelt es sich dabei um die Grosskreisdistanz zwischen Start- und Zielflughafen. Dieser Wert ist auf Grund der in Kapitel 2.6.1 gemachten Aussagen in der vorliegenden Untersuchung nicht von Interesse. Bei EUROCONTROL jedoch stellt dieser Wert als Benchmark eine wichtige Grundlage bei verschiedensten Berechnungen, beispielsweise für die Berechnung von Flugsicherungsgebühren, dar.

3.3.1.5 Einteilung der Destinationen in Regionen

Die Destinationen wurden für eine Auswertung nach Regionen in einem einfachen Verfahren auf die Achtel der Kompassrose zugeteilt. Dabei wurde mit dem Great Circle Mapper[71] der direkte Kurs vom betreffenden Schweizer Flughafen zur Destination ermittelt und anschliessend die Einteilung in die folgenden 8 Himmelsrichtungen Nord, Nord-Ost, Ost, Süd-Ost, Süd, Süd-West, West und Nord-West gemäss Abbildung 26 vorgenommen.

[71] http://gc.kls2.com/.

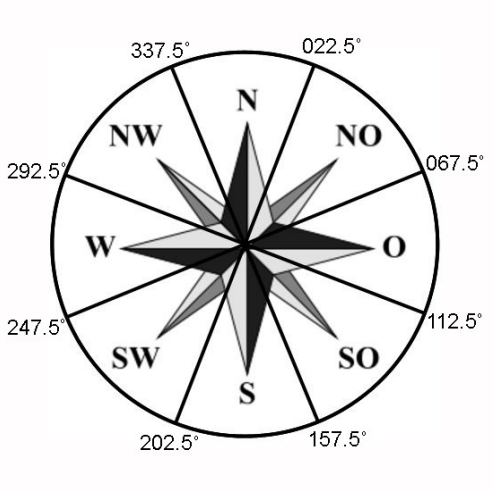


Abbildung 26: Einteilung in 8 Himmelsrichtungen nach der Kompassrose.[72]

3.4 Programm, Auflösung und Optimierung

Die Berechnungen und Darstellungen wurden mit der Software SAAM (System for traffic Assignment and Analysis at a Macroscopic level) von EUROCONTROL durchgeführt. Der Name der Software drückt bereits aus, dass sie primär für grossflächige Untersuchungen entwickelt wurde. Es handelt sich um ein Hilfsmittel zur Modellierung, nicht etwa zur Echzeit-Simulation von Abläufen. Die Software arbeitet mit Zugriff auf die Datenbank Prisme von CFMU und wurde von der Abteilung APN (Airspace, Network Planning & Navigation) bei EUROCONTROL entwickelt. SAAM verfügt über ausgereifte zwei- und dreidimensionale Darstellungsmöglichkeiten und kann vierdimensionale Trajektorien berechnen. Es handelt sich um ein GIS basiertes System, welches die Möglichkeiten der Analyse, Modellierung, Visualisierung und Präsentation von Fragen im Bereich der Verkehrsflusssteuerung und Luftraumoptimierung bietet. Für die vorliegende Arbeit wurde die Funktion „Route Extension Analysis“ verwendet. Die Hauptanwendung betrifft die Gestaltung des Luftraums und die Ermittlung der daraus resultierenden Konsequenzen für das gesamte Netzwerk.[73]

Die Berechnungen wurden unter den gängigen SAAM Annahmen gemacht. Es wurden sämtliche Restriktionen der Luftraumstrukturen berücksichtigt. Die Verfügbarkeit von Luftstrassen im Sinne der Kapazitätsfrage war stets gegeben, im Gegensatz zur Praxis.

Die Auflösung der Software hat mit einer Genauigkeit von 31cm eine sehr hohe Auflösung. Die Eingangsdaten werden mit unterschiedlicher, vom Potenzial der

[72] http://de.wikipedia.org/
[73] http://www.eurocontrol.int/.

Genauigkeit abweichender Auflösung gespeichert. Für die Berechnung der kürzesten Strecke verwendet SAAM den Dijkstra Algorithmus. Dieser wird im Kapitel 4.5.2 näher erklärt.

3.5 Vergleich der Werte

Im Rahmen der Studie wurden die Werte *Actual*, *Shortest, Filed* und *Direct* für die Auswertung verwendet. Aus den Differenzen dieser Werte wurden folgende Ineffizienzen ermittelt:

3.5.1 True Enroute Inefficiency

Der Wert True Enroute Inefficiency umschreibt die Ineffizienz auf der Strecke zwischen Start- und Zielflughafen. Der Begriff „True“ ist dabei nicht als „absolut wahr“ zu verstehen, sondern stellt den Bezug zu wahrhaft geflogenen Flügen dar. Während weitere Berechnungen und Werte rein rechnerischer Natur sind, fliesst mit dem Wert Actual in diese Betrachtung ein gemessener Wert aus der Praxis ein. Dabei wird der Effekt der TMA ausgeklammert, indem die direkte Strecke (*Direct*) dort beginnt, wo der Flug die TMA verlässt, und dort endet, wo der Flug in die TMA eindringt. Ermittelt wird dieser Wert aus *Actual* minus *Direct*.

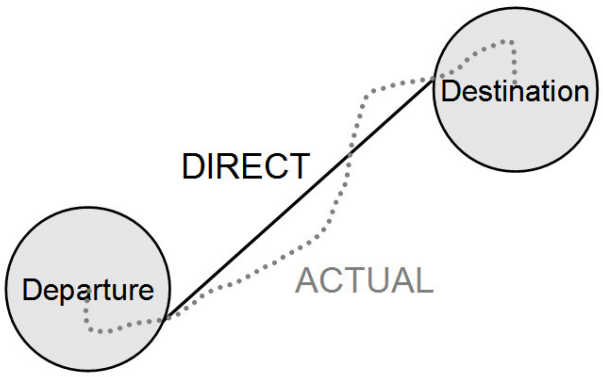


Abbildung 27: True Enroute Inefficiency.[74]

Der so ermittelte Wert entspricht weitgehend dem Potenzial von Free Flight. Die Distanz innerhalb des die TMA simulierenden Kreises ist bei beiden Werten identisch, sodass die Differenz nur den Unterschied auf dem en route Segment darstellt.

[74] eigene Darstellung

3.5.2 Route Design Inefficiency

Die Route Design Inefficiency untersucht den Unterschied zwischen der kürzest planbaren Route (*Shortest*) und der direkten Strecke (*Direct*). Dieser Ansatz ist grundsätzlich derselbe wie bei der Direct Route Inefficiency, zeigt aber durch die Anwendung des Wertes *Shortest* anstelle von *Actual* die Ineffizienz zwischen Flugplanung und Free Flight. Da in der Praxis von der Flugsicherung häufig Abkürzungen ermöglicht werden (so genannte *Direct To*, sowie weitere Flugwegverkürzungen), ist der Wert *Shortest* grösser als der Wert *Actual* und damit die Route Design Inefficiency grösser als die True Enroute Inefficiency. Die *Route Design Inefficiency* fokussiert auf die Gestaltung der Luftraumstrukturen, verglichen mit völlig freien Flügen, unabhängig von der aktuellen Nutzungsweise dieser Strukturen.

3.5.3 ATC Delta

Unter ATC Delta wird der Einfluss der Flugsicherung auf einen geplanten Flugweg verstanden. Dabei wird der Wert des optimal geplanten Fluges (*Filed*) mit dem Wert der tatsächlich geflogenen Strecke (*Actual*) verglichen. Die Differenz zeigt letztendlich auch auf, wie genau ein Flug einer geplanten Flugroute folgt, wobei lediglich die Abweichung insgesamt betrachtet wird. Das Delta ist im Wesentlichen das Resultat von Direct To's und anderen Abkürzungen. Wichtig ist es dabei, sich in Erinnerung zu rufen, dass der Wert *Actual* keine Holdings berücksichtigt, welche in der Praxis einen wesentlichen Einfluss haben. Da diese jedoch fast ausnahmslos in der TMA entstehen, ist deren Einfluss in der vorliegenden Studie nicht gesucht.
Zu erwähnen ist noch, dass die Flugsicherung sowohl Abkürzungen wie auch Verlängerungen (meist zum Zweck der Separation) der Flugstrecke bewirken kann. Dabei gibt es Situationen, in denen die Entscheidung, eine Flugwegänderung zu akzeptieren, den Piloten überlassen wird. Somit haben auch die Piloten einen, wenn auch sehr geringen, Einfluss auf den hier ermittelten Wert *ATC Delta*.

3.6 Resultate

Im Folgenden werden die Resultate der Studie gezeigt. Die Daten wurden mittels Excel verarbeitet und von den wesentlichen Resultaten wurden Diagramme angefertigt. Um eine Überladung dieses Kapitels mit Diagrammen zu verhindern,

wurden einzelne Abbildungen in den Anhang transferiert. Die Berechnung der relativen Werte fand auf der Basis des grösseren Eingangswertes statt, da der Blickpunkt vom heutigen Standpunkt aus gewählt wurde und somit die Einsparungen in Prozent für die Zukunft ermittelt wurden (vgl. Kapitel 1.4).
Im ersten Teil werden Resultate zur True Enroute Inefficiency dargestellt. Den Anfang macht ein absoluter Vergleich, gefolgt von einem relativen Vergleich in Abhängigkeit der Flugdistanz. Der relative Vergleich wird auch für die Aufteilung in Flugregionen gemacht. Die folgende Betrachtung der Ineffizienzen, gewichtet nach Anzahl Flügen, ist dann vor allem für einen AO interessant. Im zweiten Teil wird die Route Design Inefficiency, ebenfalls nach absoluten und relativen Standpunkten, untersucht. Gegen Ende des Kapitels folgt die Auswertung zum ATC Delta, welches den Effekt der Flugsicherung genauer untersucht.

3.6.1 True Enroute Inefficiency

Die True Enroute Inefficiency vergleicht Distanzen aus Radaraufzeichnungen heutiger Flüge (Actual, A) mit einem (theoretischen) direkten Flug (Direct, D3). Damit kann dieser Wert den Anspruch erheben, eine genaue Aussage über den heutigen Zustand im Vergleich zu Free Flight zu vermitteln. Da diese Untersuchung auf den Wert *Actual* zurückgreift, sind darin bereits Abkürzungen durch die Flugsicherung im Verlauf des Fluges enthalten. Gleichzeitig sind auch Verlängerungen gegenüber dem eingereichten Flug möglich, sodass nicht ohne weiteres eine Aussage über den Effekt der Flugsicherung gemacht werden kann. Allgemein handelt es sich aber meist um Abkürzungen. Sicher ist jedoch, dass die Werte von tatsächlich geflogenen Flügen stammen und damit einen engen Bezug zur Realität gewährleisten.

3.6.1.1 Absoluter Vergleich

Die folgende Abbildung 28 zeigt das Resultat von 192 Flügen, geordnet nach aufsteigender Differenz zwischen *Actual* und *Direct*.

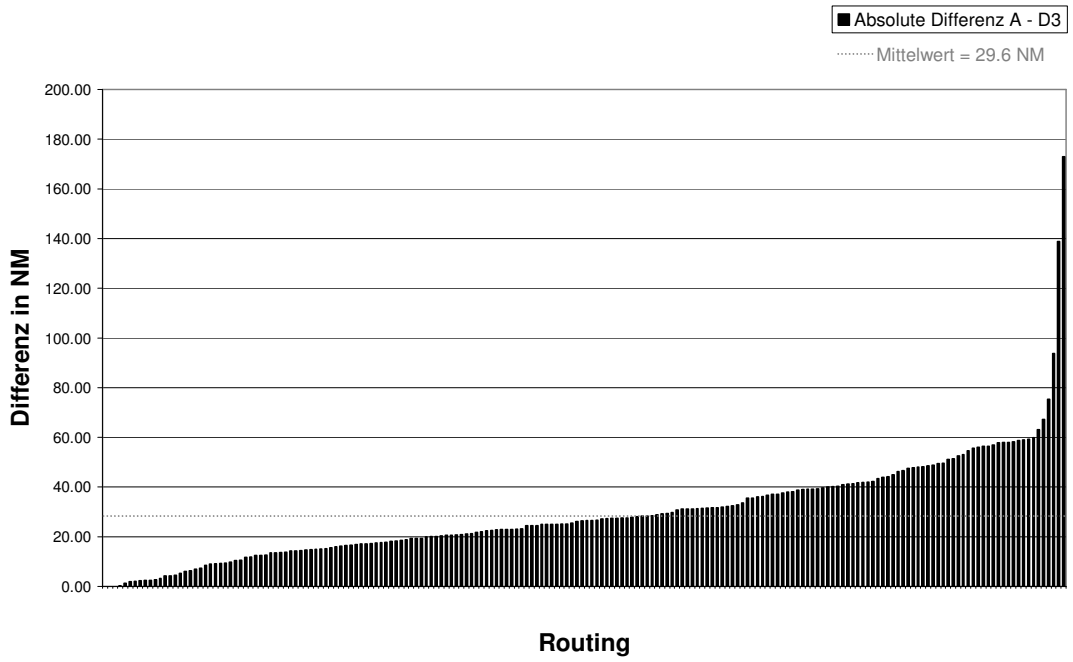


Abbildung 28: True Enroute Inefficiency, absoluter Vergleich Actual (A) – Direct (D3), 192 Flüge.

Der *Maximalwert* in Abbildung 28 beträgt 173.1 NM (ZRH – PRN), während der *Minimalwert* mit 0 NM (ZRH-LUG, LUG-ZRH, BSL-GVA) angegeben ist. Auffallend ist die beinahe lineare Verteilung über weite Teile des Spektrums. Die Werte am oberen Ende der Skala steigen exponentiell an, was darauf hin deutet, dass dort spezielle Einflüsse vorhanden sein könnten, welche dies bewirken. Der Mittelwert beträgt 29.6 NM über alle Strecken gemittelt. Auf Grund der exponentiell höheren Maximalwerte ist davon aus zu gehen, dass der Mittelwert durch diese einzelnen Werte nach oben beeinflusst wurde. Eine erneute Berechnung des Mittelwertes ohne die zwei Minimal- und Maximalwerte bestätigt diese Vermutung und ergibt 28.6 NM. Die Medianstrecke ist Zürich – Araxos mit einer Differenz von 24.95 NM. Dieser Wert ist im Vergleich zum Mittelwert ein weiterer Hinweis auf die ungleiche Verteilung der Werte.

Die folgende Abbildung 29 fokussiert auf die Werte in den Randbereichen und stellt nebst den grössten (Top Ten) auch die geringsten 10 (Bottom Ten) Werte dar.

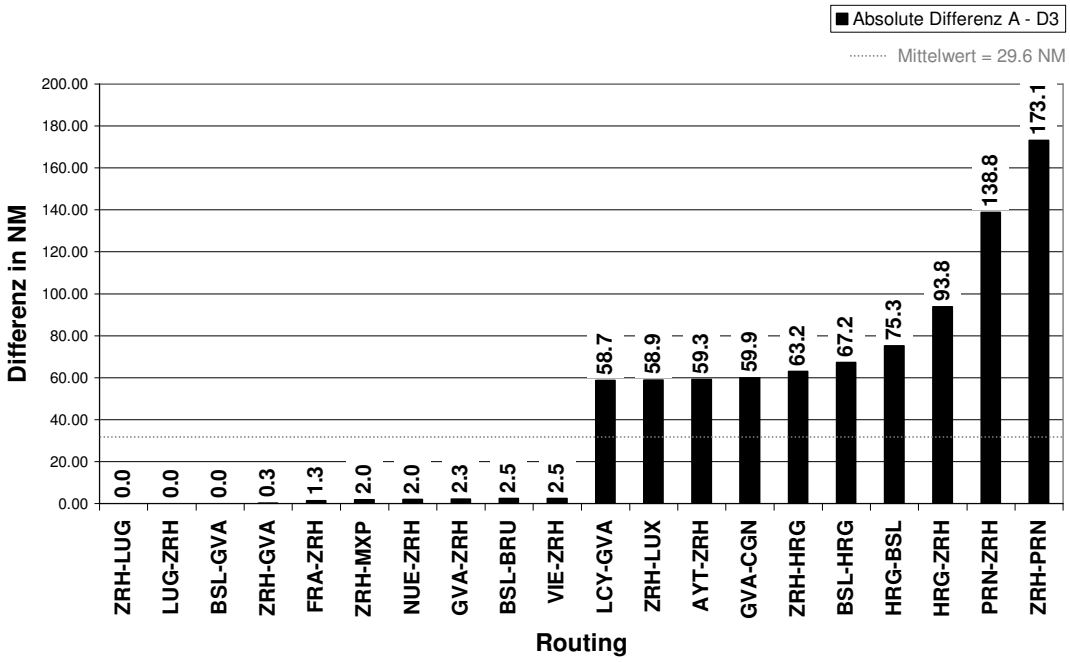


Abbildung 29: True Enroute Inefficiency, absoluter Vergleich Actual (A) – Direct (D3), geringste und grösste 10 Werte.

Die grössten absoluten Differenzen ergeben sich auf der Strecke von und nach Pristina. Diese Flugrouten führen wegen politischen Differenzen über wesentliche Umwege, was sich hier (mit 173.1 und 138.8 NM) klar niederschlägt. Die Problematik von Pristina ist in Kapitel 2.8.5 bereits näher erläutert worden. Die 3. bis 6. grössten Differenzen ergeben sich auf der Strecke von und nach Hurghada. Für diese Strecken liegt die Ursache in der Anbindung von Hurghada an das ägyptische/ internationale Flugnetz. In der folgenden Abbildung 30 ist deutlich erkennbar, dass An- und Abflüge nach Hurghada über ein Umwege verursachendes Ost-West Segment verlaufen, was für die Abweichung von der direkten Verbindung verantwortlich ist. Diese Problematik wurde erkannt und ein Routenvorschlag, der direkter verbindet, ist gemäss EUROCONTROL in Planung.
Auf der Seite der geringsten Werte fällt auf, dass unter den Bottom Ten fünf nationale Flüge sind. Die geringen Werte sind wenig aussagekräftig, da sie sich primär deshalb so optimal präsentieren, weil nach Abzug der 30 NM Kreise um Start- und Zielflughafen nicht mehr viel der Gesamtstrecke übrig bleibt, und damit grosse Abweichungen gar nicht auftreten können. Bei den geringsten Werten handelt es sich somit primär um kurze nationale und internationale Flüge.

Abbildung 30: Flug Hurghada – Zürich, Juli 2007.[75]

3.6.1.2 Relativer Vergleich

Die relative True Route Inefficiency gibt die tatsächliche Differenz in Prozent des Ausgangswertes *Actual* an. So lässt sich angeben, wie viel Anteil die potenzielle Einsparung an einem heutigen Flug ausmacht.

Der relative Vergleich der 192 Flugstrecken zeigt eine ähnliche Verteilung wie Abbildung 28. Die Darstellung befindet sich im Anhang (Abbildung 90). Die Extremwerte sind in Abbildung 32 gut erkennbar. Der *Maximalwert* ist mit 55.2% die Strecke Zürich – Stuttgart.

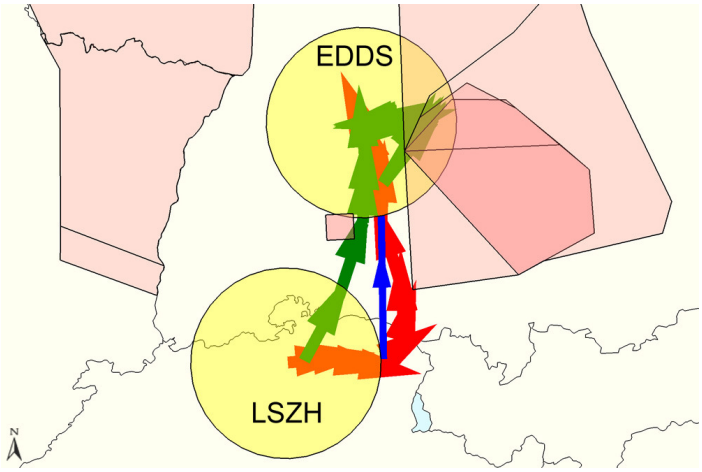


Abbildung 31: Flug Zürich – Stuttgart, Juli 2007; rot = geplante Flugrouten, grün = Abkürzungen von den geplanten Flugrouten, blau = direkte Verbindung, rosa = militärische Sperrgebiete (zeitabhängig).[76]

[75] EUROCONTROL.

Bei der absoluten Betrachtung fiel diese Strecke nicht auf (Platz 98 von 192) und liegt mit 26.53 NM Differenz unter dem Mittelwert. Der Grund, weshalb diese Strecke in der relativen Betrachtung weit über allen anderen Werten liegt ist erneut der, dass es sich um eine kurze Strecke handelt, welche nach Abzug der 30 NM Kreise noch eine Länge von 48 NM hat. Die Streckenführung ist wegen Militärischen Lufträumen zwischen Zürich und Stuttgart sowie der An- und Abflugverfahren der umliegenden Flughäfen nicht optimal. Wie die folgende Abbildung 31 zeigt, spielen bei dieser kurzen Strecke die vorgegebenen Strukturen eine wesentliche Rolle, da eine kleine Abweichung von der direkten Verbindung (Verlauf östlich der blauen Linie) beim relativen Vergleich stark ins Gewicht fällt. Auch der Rückflug von Stuttgart nach Zürich hat mit 17.2% (Platz 10) eine überdurchschnittlich hohe Differenz, was die Aussage stärkt.

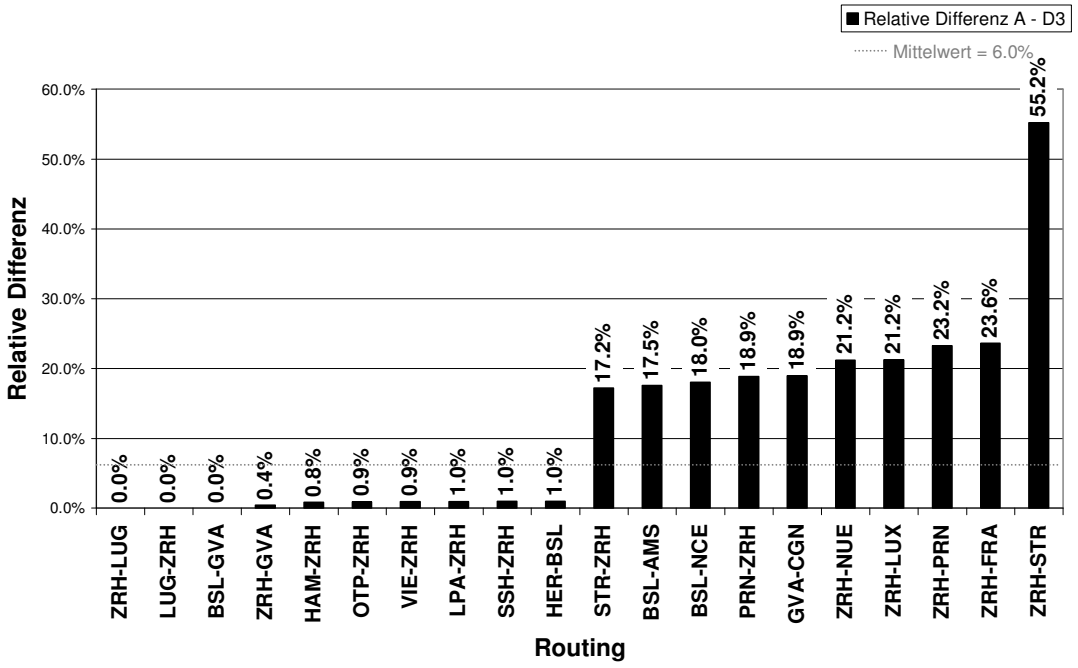


Abbildung 32: True Enroute Inefficiency, relativer Vergleich Actual (A) – Direct (D3), geringste und grösste 10 Werte.

Die Strecken von und nach Pristina finden sich auch in der relativen Betrachtung unter den Top Ten, während die Flüge von und nach Hurghada von ihrer Länge profitieren und nicht mehr als Extremwerte auftauchen. Auffallend ist, dass zu den Top Ten mit Zürich – Frankfurt, Zürich – Luxemburg, Zürich – Nürnberg, Genf – Köln, Basel – Amsterdam und den Verbindungen Zürich – Stuttgart sieben

[76] EUROCONTROL

Strecken in nördlicher Richtung liegen. Die *Minimalwerte* sind auch hier wieder die drei nationalen Strecken, was zu erwarten war, da bei einer Null-Abweichung auch der relative Anteil Null sein wird. Der geringste nicht-schweizerische Wert stammt von der Strecke Hamburg – Zürich, also auch einer Strecke des Nordens. Die weiteren Werte Bucharest – Zürich und Wien - Zürich sind Strecken aus östlicher Richtung, während die nächst folgenden, grösseren Werte verschiedenster Richtungen sind.

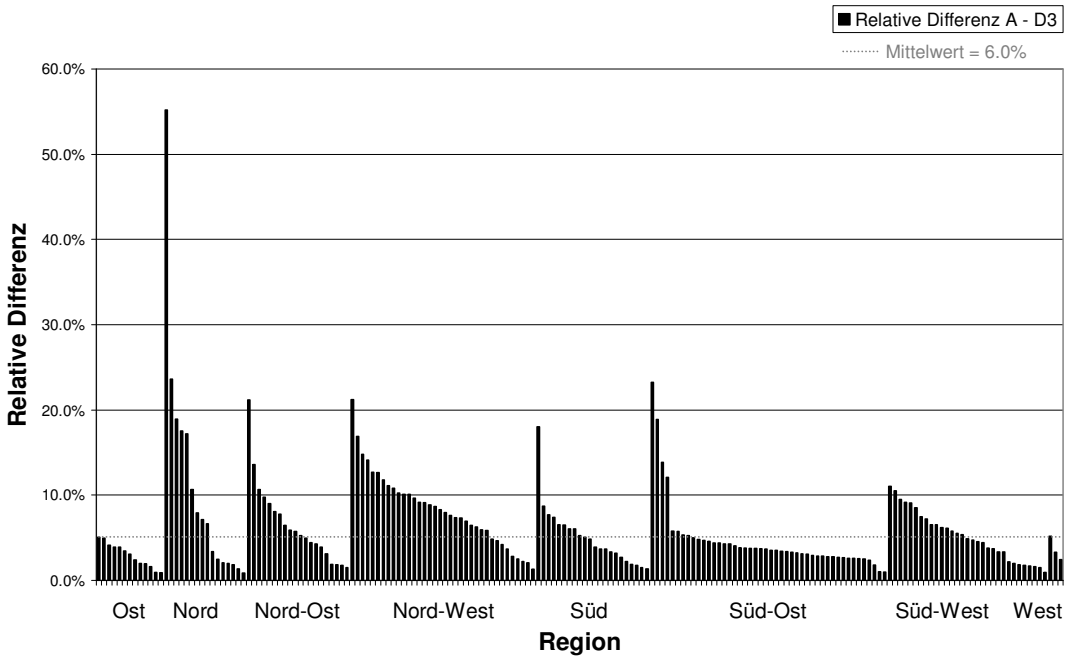


Abbildung 33: True Enroute Inefficiency, absoluter Vergleich Actual (A) – Direct (D3), 192 Werte, gegliedert nach Regionen.

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen die Verteilung nach Regionen. Auffallend ist einerseits, dass verschiedene Regionen grosse Ausreisser-Werte haben. Diese führen dazu, dass der Mittelwert in die Höhe getrieben wird. Aus diesem Grund wurden in Abbildung 34 mit und ohne Extremwerte dargestellt. Für die Berechnung ohne Extremwerte wurden der grösste und der kleinste Wert eliminiert. Die Tatsache, dass alle Werte anschliessend einen tieferen Wert annehmen, deutet auf die Inflation der Mittelwerte durch einen überdurchschnittlich hohen Maximalwert hin. Das Ausmass der Erhöhung hängt von der Magnitude dieses Wertes sowie von der Anzahl Werte einer Region ab.

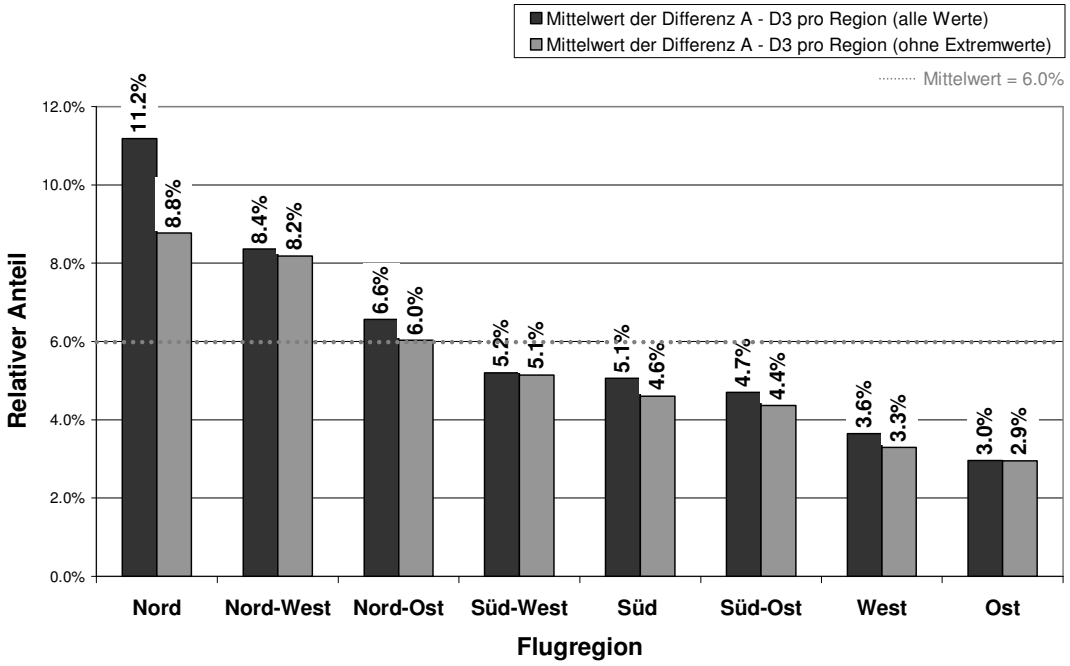


Abbildung 34: True Enroute Inefficiency, relativer Vergleich Actual (A) – Direct (D3), 192 Werte, Mittelwerte gegliedert nach Regionen, Vergleich mit (dunkel) und ohne (hell) Extremwerte.

Die Strecken nach Nord, Nord-West und Nord-Ost weisen Mittelwerte über dem Durchschnitt von 6% auf, während alle anderen Regionen teils deutlich (Ost und West) unter dem Durchschnitt liegen. Daraus lässt sich die pauschale Aussage gewinnen, dass Flüge aus der Schweiz entlang der Breitenkreise eine grössere Effizienz aufweisen als jene, welche den Meridianen folgen. Dabei sind die Effizienzprobleme in die nördlichen Regionen besonders ausgeprägt. So hat die Region Nord eine mehr als 3 Mal höhere Ineffizienz als die Region Ost. Diese Erkenntnis erklärt sich in der Praxis durch eine komplexe und mit zahlreichen Restriktionen behaftete Luftraumstruktur nördlich der Schweiz. Zu den Restriktionen zählen nebst den militärischen Lufträumen die An- und Abflugverfahren der grossen Hubs von Paris, Frankfurt und München sowie Amsterdam und London, welche alle wegen ihrer Komplexität zu Ineffizienzen für den Verkehr von und nach der Schweiz führen. Wegen der Anflüge von Norden her resultieren für Flüge in Richtung Nord und Nord-West Abflugrouten, welche weit über den 30 NM Kreis der TMA hinaus dauern und damit als Ineffizienz auffallen. Dies ist in Abbildung 35 gut ersichtlich.

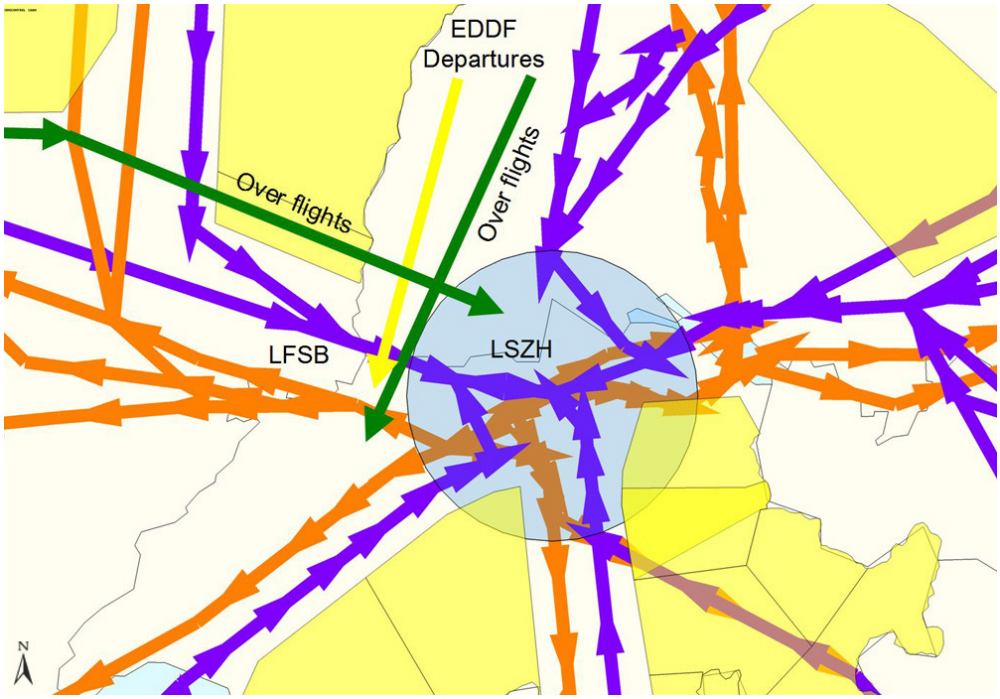


Abbildung 35: An- (violett) und Abflugverfahren (orange) von Zürich.[77]

3.6.1.3 Gesamteinfluss

Für eine Fluggesellschaft ist die Ermittlung der Effizienz auf ihren Strecken von Bedeutung, da sich so eine Verbesserung des Zustandes erreichen lässt. Mit Rücksicht darauf, dass nicht alle Probleme auf einmal thematisiert werden können, stellt sich die Frage, welches die dringendsten Probleme sind. Dabei spielt die Frequenz auf jeder einzelnen Strecke eine wichtige Rolle. Je häufiger eine Strecke beflogen wird, desto gravierender fällt eine Ineffizienz auf dieser Strecke für die betroffene Fluggesellschaft ins Gewicht. Oder anders betrachtet bringt die Verbesserung auf einer bestimmten Strecke einen mit der Frequenz multiplizierten Gewinn. Abbildung 36 zeigt jene Strecken, welche durch ihr Produkt von Ineffizienz Mal Frequenz (04.-07.Juli 2007) die grössten zusätzlichen Distanzen auf dem Swiss Kontinentalnetzwerk aufweisen.

[77] EUROCONTROL.

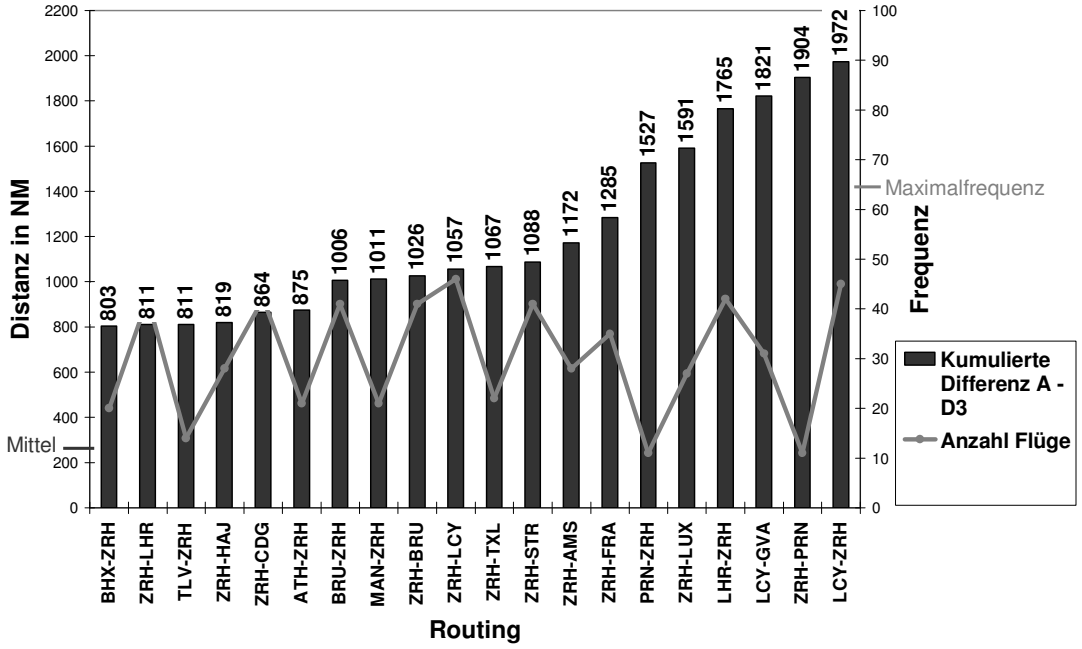


Abbildung 36: Die 20 effizienzschwächsten Strecken im Netzwerk von Swiss für die betrachtete Woche im Juli 2007. Absolute Betrachtung zusätzlich geflogener Distanzen (in NM) als Resultat von Actual (A) – Direct (D3). Summe aller Flüge in dieser Woche.

Der *Mittelwert* sämtlicher Strecken beträgt 285 NM. Dieser Wert ist unter Berücksichtigung der Frequenz zu betrachten und mit Vorsicht zu geniessen, wenn man die dahinter liegenden Frequenzen der einzelnen Strecken nicht kennt.
Es fällt auf, dass die Strecken von und nach London fünf Mal unter den 20 signifikantesten Strecken auftauchen und insbesondere die Plätze 1 (LCY-ZRH), 3 (LCY-GVA) und 4 (LHR-ZRH) belegen. Einerseits werden die Strecken nach London überdurchschnittlich häufig beflogen. Dies allein kann jedoch nicht Grund genug sein, um eine derart deutliche Vertretung zu bewirken. Abbildung 37 zeigt das Beispiel London City – Zürich, welches in der Summe die Grösste Ineffizienz aufweist. Man erkennt, dass die möglichen Flugrouten in einer gewissen Distanz parallel zum direkten Flugweg verlaufen. Der Airway UL15 (grün gestrichelte Linie) verläuft genau auf dem gewünschten Routing. Zurzeit ist der UL15 noch mit Restriktionen belegt, welche ihn für den Flug London City – Zürich nicht verfügbar machen (vgl. Kapitel 2.8.4).

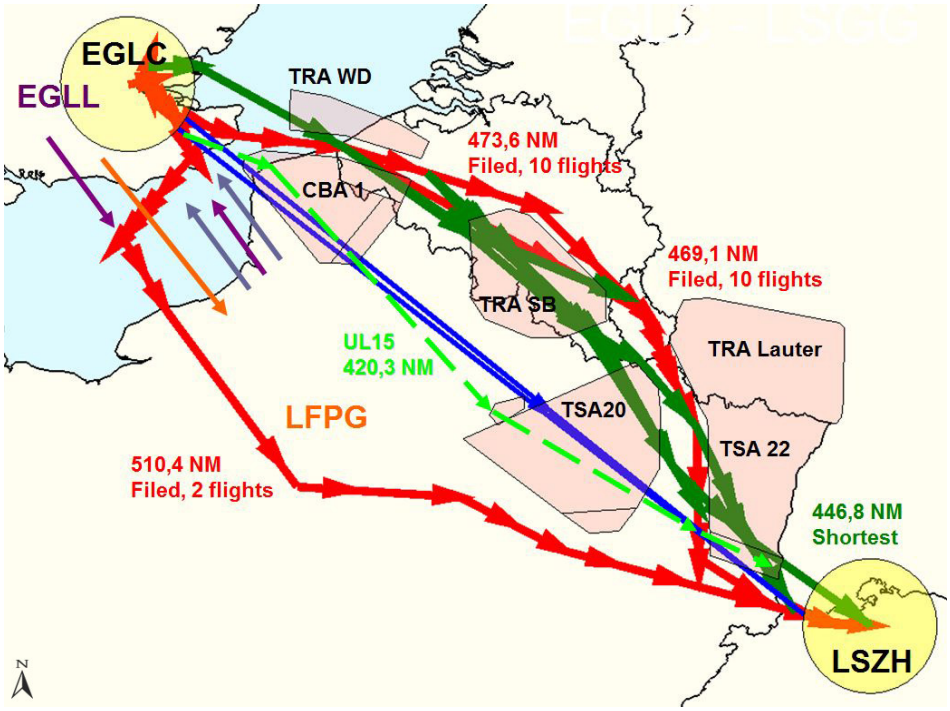


Abbildung 37: Flug London City – Zürich, rot = geplante Flugrouten, grün = Abkürzungen von den geplanten Flugrouten, blau = direkte Verbindung, rosa = militärische Sperrgebiete (zeitabhängig).[78]

Weiter fallen die Strecken Zürich – Luxemburg, Zürich – Frankfurt und Zürich – Amsterdam unter den gewichtigsten 20 auf. Dies sind alles Destinationen nördlich von Zürich. Nur gerade 4 Vertreter liegen nicht im nördlichen Bereich. Diese sind Pristina, Athen und Tel Aviv. Diese drei Strecken sind lange Strecken mit verhältnismässig geringen Frequenzen.

3.6.2 Route Design Inefficiency

Die Route Design Inefficiency vergleicht die kürzest planbare Flugroute (*Shortest*) mit der direkten Verbindung (*Direct*). Wenn man davon ausgeht, dass AOs eine gute Flugplanung machen, werden sie stets den Wert *Shortest* für den eingereichten Flugplan erhalten. Dies hat sich, wie bereits erwähnt, im Fall von Swiss so erwiesen. Die Route Design Inefficiency untersucht im Wesentlichen, wie sich das bestehende Netz von Luftstrassen dem Benchmark Free Flight gegenüber verhält. Oder anders gesagt steht folgende Frage im Vordergrund: Wenn der bestmögliche Flugweg im bestehenden System geplant wird, wie weit liegt dieser dann von einem direkten Flug entfernt?

[78] EUROCONTROL

Diese Art der Frage sollte ein Resultat liefern, welches nicht allzu weit von der True Enroute Inefficiency entfernt liegt. Es handelt sich jedoch keinesfalls um denselben Wert, da dieser Vergleich rein die Flugplanung betrifft – und damit nicht zuletzt für die Treibstoffplanung wichtig ist – während die True Enroute Inefficiency den Vergleich anhand tatsächlich geflogener Flugrouten macht.

3.6.2.1 Absoluter Vergleich

Der Vergleich aller 192 Flugstrecken gibt ein ähnliches Bild wie der Vergleich der True Enroute Inefficiency (Resultat im Anhang B.V, Abbildung 91). Es findet ein linearer Anstieg der Werte über die Verteilung statt, und die grössten Werte steigen überproportional an. Interessant sind dabei die grössten und geringsten Differenzen in Abbildung 38. Der Mittelwert beträgt 29.5 NM. Es finden sich dieselben, bereits kommentierten Strecken von Pristina und Hurghada unter den *Maximalwerten*. Neu ist, dass die Strecken von und nach Inverness gleich beide in den Top Ten liegen. Die *Minimalwerte* sind insgesamt alles kurze Strecken und gleich vier davon sind nationale Strecken. Interessant ist jedoch, dass Stuttgart – Zürich in dieser Betrachtung mit Null Differenz anzutreffen ist, während diese Strecke bei der Ermittlung der True Enroute Inefficiency noch zu den Top Ten gehörte. Dies ist durch die unterschiedliche Ermittlung der *Direct*-Werte erklärbar.

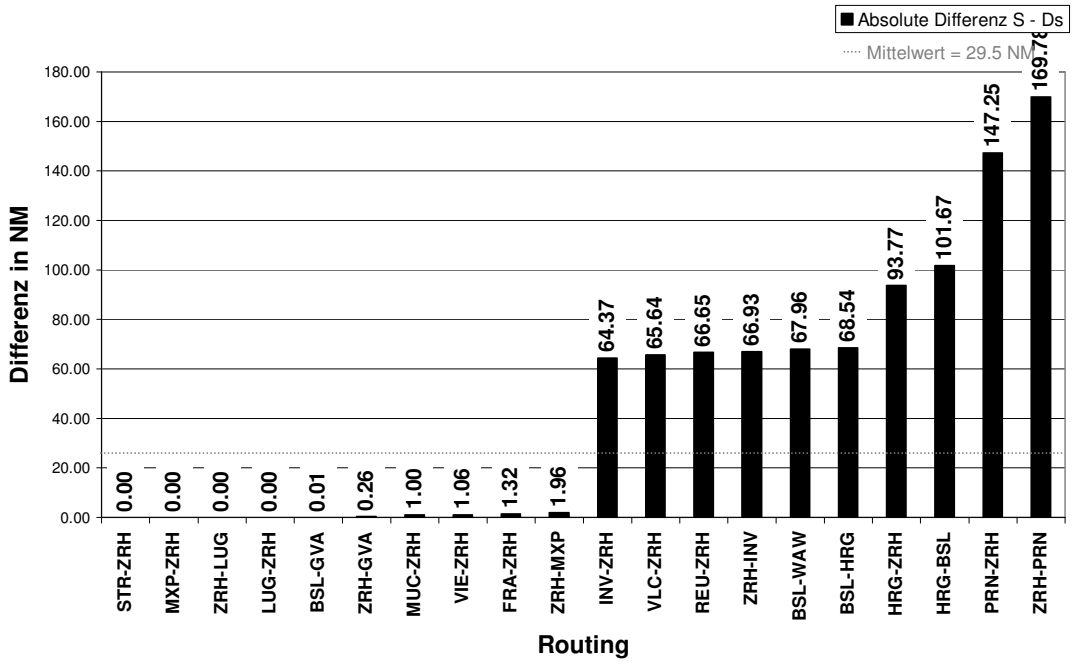


Abbildung 38: Route Design Inefficiency, absoluter Vergleich Shortest (S) – Direct (Ds), geringste und grösste 10 Werte.

3.6.2.2 Relativer Vergleich

Die relative Route Design Inefficiency gibt den Anteil an, den die Differenz von *Shortest* zu *Direct* gemessen an *Shortest* ausmacht. Damit erhält man eine Aussage, die das Potenzial von direkten Routen (*Shortest* minus *Direct*) als Anteil einer heute kürzest planbaren Route ausdrückt.

Die Kurve in Abbildung 39 des relativen Vergleichs steigt im Verlauf früher und steiler an als dies in den bisherigen Betrachtungen der Fall war. Vom unteren bis mittleren Verlauf verhält sie sich in etwa linear.

Die Minimalwerte finden sich auch bei relativer Betrachtung wegen der Null Abweichungen auf den kurzen Strecken im In- und nahen Ausland.

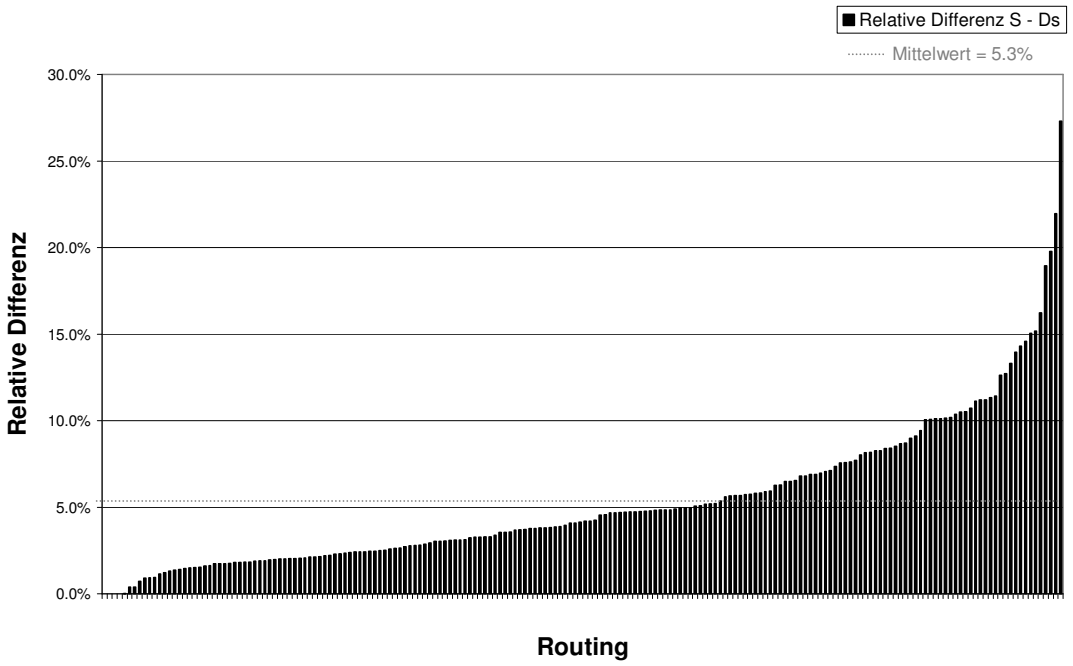


Abbildung 39: Route Design Inefficiency, relativer Vergleich Shortest (S) – Direct (Ds), 192 Flüge.

Der *Maximalwert* tritt auf der Strecke Zürich – Luxemburg auf und beträgt 27.3 %. Dies ist einerseits auf die relativ kurze Strecke zurück zu führen, andererseits liegt Luxemburg im Norden der Schweiz, was über suboptimale Ausflugrichtungen ein Problem darstellt. Zusätzlich bereiten besonders im Fall von Luxemburg die militärische Lufträume nördlich der Schweiz Ineffizienzen, wie Abbildung 40 zeigt.

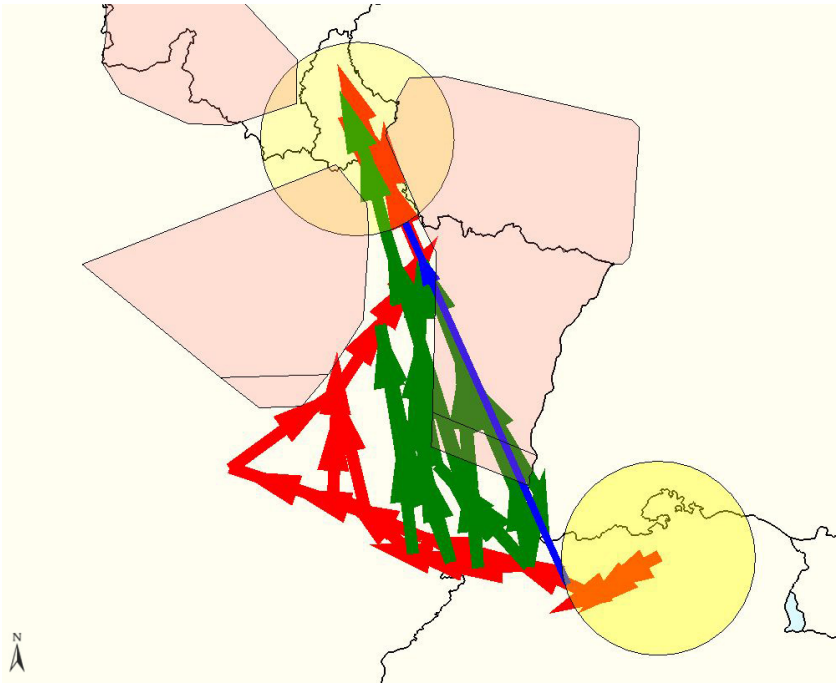


Abbildung 40: Flug Zürich – Luxembourg, rot = geplante Flugrouten, grün = Abkürzungen von den geplanten Flugrouten, blau = direkte Verbindung, rosa = militärische Sperrgebiete (zeitabhängig).[79]

Die Routenführung auf dieser Strecke erscheint auf den ersten Blick unverständlich, insbesondere wenn man sieht, dass einige Flüge eine Abkürzung von der Flugsicherung erhalten haben, die aus Effizienzgründen auch geplant werden sollte (grün, nahe der direkten Verbindung). Stattdessen führt die planmässige Strecke (rot) über einen weiten Bogen Richtung Westen. Die Situation über dieser Region von Frankreich ist wegen der Kanalisierung zwischen zwei militärischen Lufträumen schwierig gestaltet und beinhaltet einen so genannten *Double Crossover*. Ein Crossover bedeutet, dass die richtungsgetrennten, parallelen Luftstrassen die Seite wechseln, sich also kreuzen. Dies geschieht im Ganzen zwei Mal, ein Mal vor der für den Luxembourg-Flug relevanten Stelle und ein Mal über Luxembourg. Der Grund für dieses Verfahren liegt in der Separierung von Flugverkehr durch Vectoring. Unter Vectoring versteht man die Anordnung, einem exakten Vektor im Luftraum zu folgen, ausgedrückt durch Richtung und Höhe. Wenn dies von zwei sich nähernden Flugzeugen befolgt wird, lässt sich so ein sicherer Abstand gewährleisten. Um dies verordnen zu können, braucht es Platz, und der sollte jeweils in der nahen Richtung vom Konfliktpunkt liegen. Da im fraglichen Bereich des Fluges nach Luxemburg eine richtungsgetrennte Luftstrasse von Westen her

[79] EUROCONTROL

den Flugweg kreuzt, braucht es westlich Platz für Ausweichmanöver, was den Double Crossover erklärt. Folgende Abbildung 41 hilft für das Verständnis.

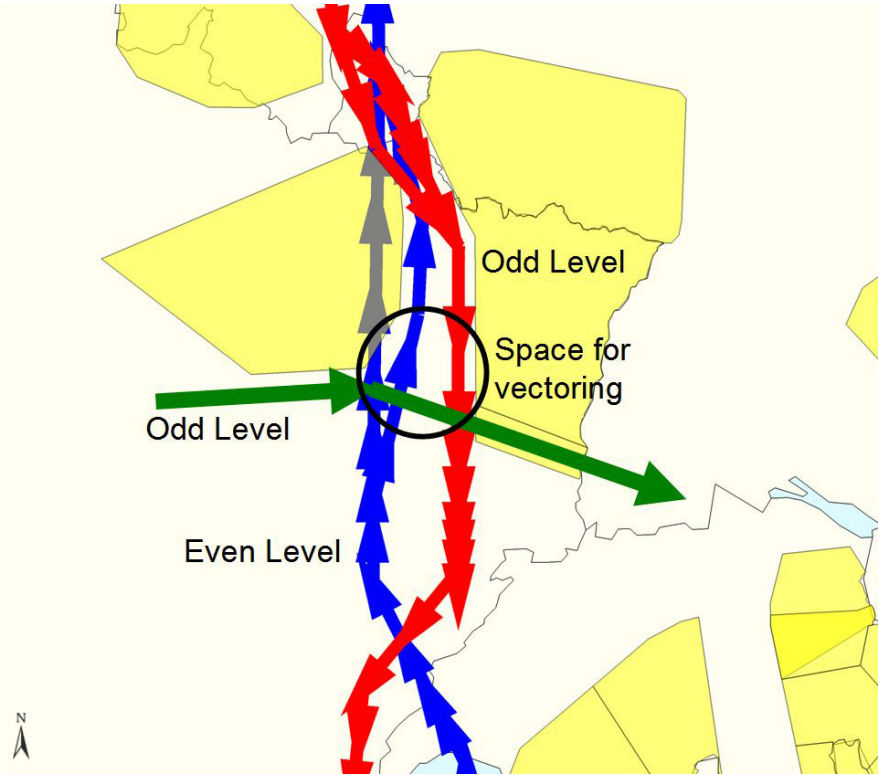


Abbildung 41: Luftraum über Ost-Frankreich, Double Crossover.[80]

Die weiteren Maxima- und Minimalwerte aus der relativen Route Design Inefficiency sind aus Abbildung 42 ersichtlich. Der *Mittelwert* beträgt 5.3% Die sieben geringsten Werte sind alles kurze Strecken, was bei der relativen Betrachtung nicht unbedingt zu erwarten war. Interessant sind auch die Strecken zwischen Hamburg und Zürich, welche beide unter den geringsten 10 Abweichungen zu finden sind.

[80] EUROCONTROL

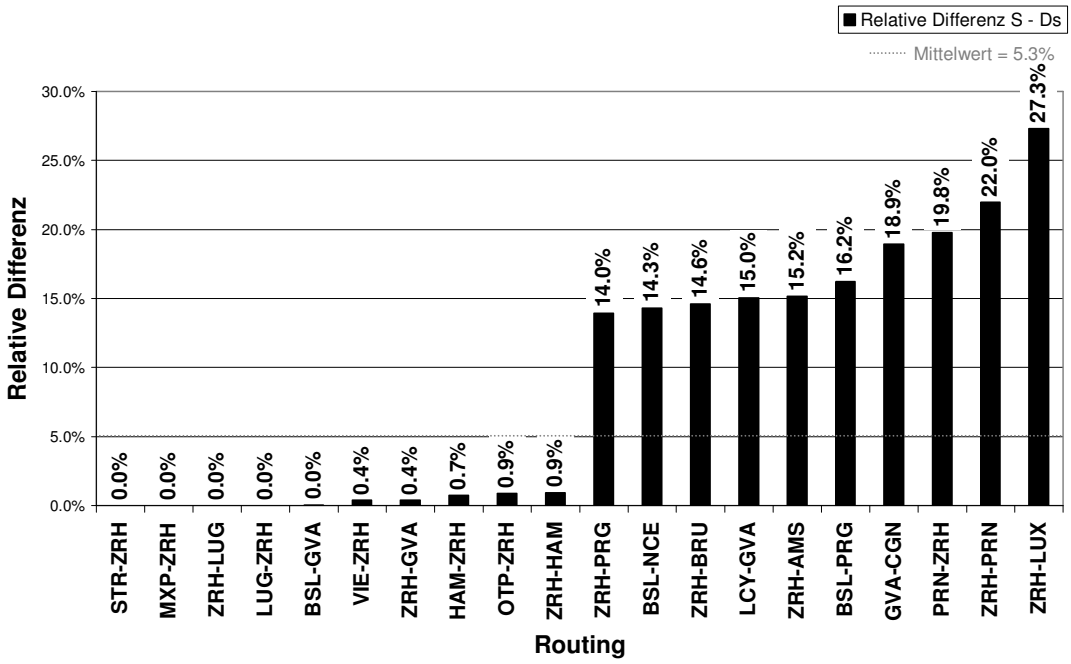


Abbildung 42: Route Design Inefficiency, relativer Vergleich Shortest (S) – Direct (Ds), geringste und grösste 10 Werte.

3.6.3 ATC Delta

Der Wert ATC Delta steht für den Einfluss der Flugsicherung auf einen geplanten Flug. Dabei wird der Wert *Filed* mit dem Wert *Actual* verglichen. Während der erste Wert vor Beginn des Fluges gemessen wird, entspricht der zweite Wert der Messung des tatsächlichen Flugverlaufes. So lässt sich ermitteln, welchen Einfluss die Flugsicherung auf einen geplanten Flug tatsächlich hat. Abbildung 40 zeigt ein Beispiel, wie Abkürzungen zustande kommen. Auf der abgebildeten Strecke Zürich – Luxembourg besteht die Organisation der Verkehrsströme mit Hilfe des bereits beschriebenen Double Crossover. Wenn kein Konfliktverkehr anwesend ist, kann von diesem Verfahren abgewichen werden, was zu den dargestellten Abkürzungen (grün) führt. Bei der Interpretation ist Vorsicht geboten, da die Anzahl geflogener Abkürzungen nicht bekannt ist. So kann aus der Darstellung nicht abgelesen werden, wie viele der 14 Flüge von Abkürzungen profitiert haben.

3.6.3.1 Absoluter Vergleich

Der absolute Vergleich aller ATC Delta Werte zeigt, dass es in etwa der Hälfte der Fälle zu einer Verkürzung der Flugwege kommt und etwa in einem Drittel der Fälle keine Veränderung gibt. Ein positiver Wert in Abbildung 43 bedeutet, dass die

Flugsicherung mit Hilfe von Direct To's und anderen Mitteln den Flug verkürzen konnte, während ein negativer Wert eine Verlängerung bedeutet. Die *Spannweite* liegt zwischen einer Verlängerung um 9.8 NM (FAO – ZRH) und einer Verkürzung um 31.2 NM (SSH-ZRH). Erwähnenswert ist der *Mittelwert* von 4.13 NM, welcher auf Grund einzelner hoher Werte deutlich über dem *Medianwert* von 0.43 NM liegt.

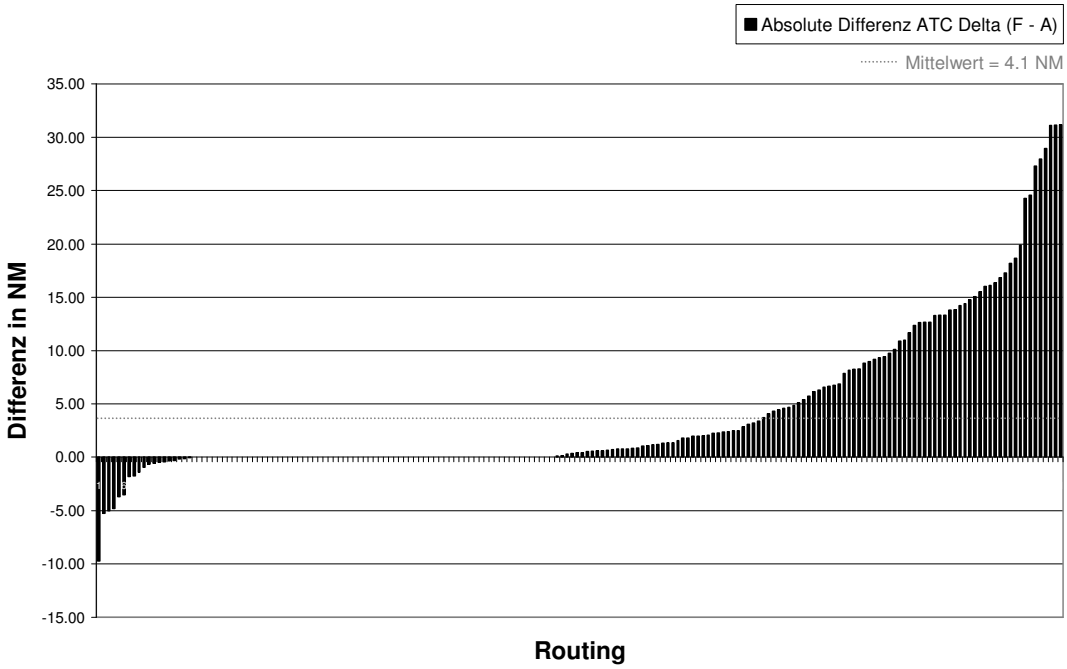


Abbildung 43: ATC Delta, absoluter Vergleich Filed (F) – Actual (A), 192 Flüge.

Die Abbildung 92 im Anhang zeigt die höchsten und geringsten 10 Werte. Dabei fällt auf, dass die drei grössten Verlängerungen absolut betrachtet im Südwesten stattfinden (*Minimalwerte*: FAO-ZRH, AGP-GVA und ZRH-LPA) während die 3 grössten Einsparungen im Südosten auftreten (*Maximalwerte*: SSH-ZRH, RHO-ZRH und ZTH-ZRH).

3.6.3.2 Relativer Vergleich

Der relative Vergleich setzt die im vorherigen Abschnitt ermittelten Differenzen zwischen *Filed* und *Actual* in ein Verhältnis zur Streckenlänge (F). Dabei wird berücksichtigt, dass auf einer längeren Strecke auch mehr Möglichkeiten zu Abkürzungen bestehen, wobei dieser Zusammenhang nicht proportional sein muss.

Die Verteilung der relativen Werte in Abbildung 44 zeigt ein ähnliches Bild wie jenes der absoluten Werte. Es findet jedoch eine Akzentuierung der Werte am

Ende der Skala statt. Der Mittelwert beträgt 0.8%, wird aber von den Maximalwerten stark beeinflusst, was der Median von 0.1% bestätigt.

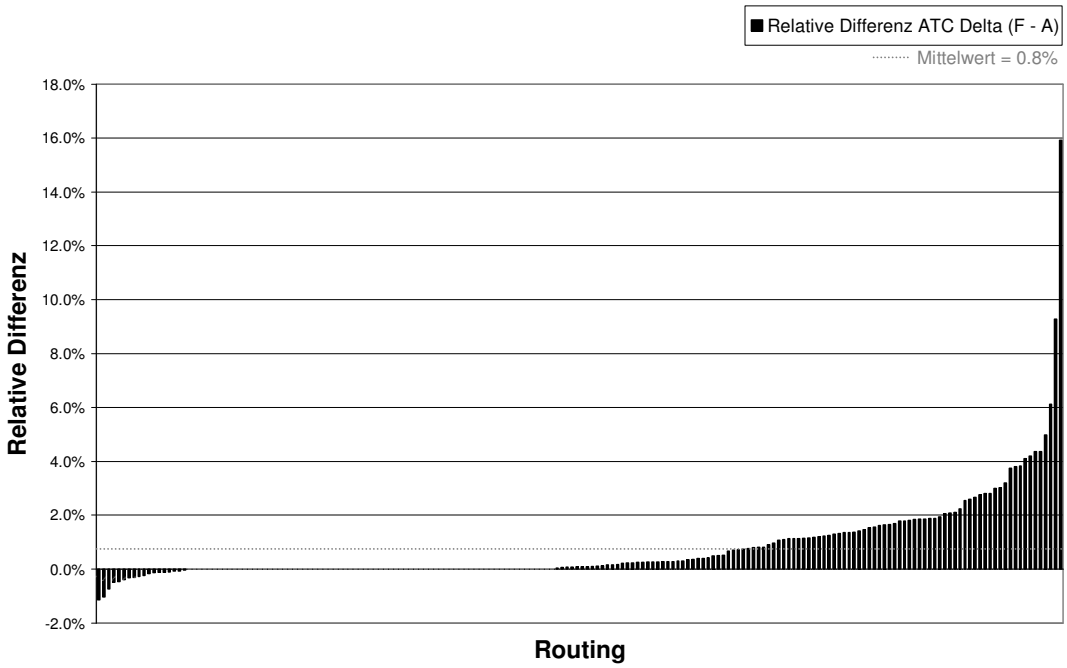


Abbildung 44: ATC Delta, relativer Vergleich Filed (F) – Actual (A), 192 Flüge.

Die Extremwerte verschieben sich bei der relativen Betrachtung erwartungsgemäss auf kurze Strecken. Die Strecke Zürich – Luxemburg stellt den *Maximalwert* mit einer Verkürzung von 15.9%. Dieselbe Strecke war auch Maximalwert der Route Design Inefficiency in Abbildung 42 und fiel auch bei der True Enroute Inefficiency unter die Top Ten (absolut 9. grösster, relativ 4. grösster Wert). Dieser Zusammenhang zeigt, dass die Flugsicherung in der Praxis nach Möglichkeiten die Ineffizienzen der Routen auszugleichen versucht. Direct To's erhöhen die Effizienz und liegen gleichzeitig im Interesse der Flugsicherung, da ein Flugzeug so schneller einen betreffenden Sektor verlässt und damit Platz für weiteren Verkehr schafft.

Die *Minimalwerte* und damit grössten Verlängerungen gegenüber den geplanten Flugrouten finden sich gemäss Abbildung 45 auch bei relativer Betrachtung im Südwesten (Minimalwerte in absteigender Reihenfolge: BSL-BCN, FAO-ZRH, AGP-GVA, GVA-AGP). Etwas erstaunlich ist die Strecke Genf – Zürich an fünfter Stelle, welche jedoch von der extrem kurzen Distanz auf diesen Platz verwiesen wird.

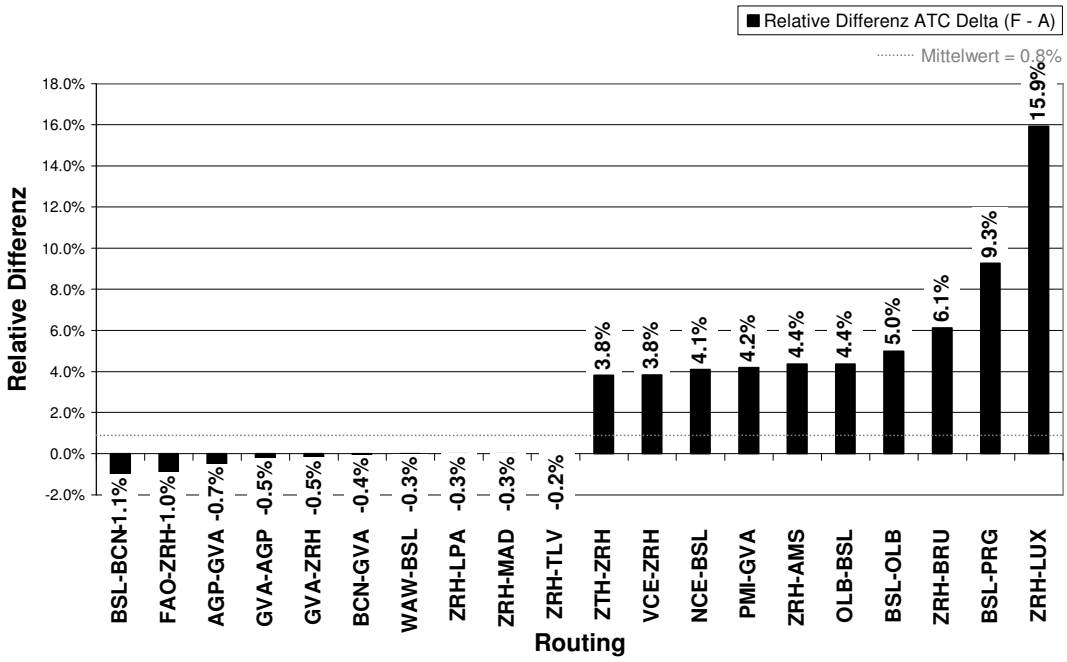


Abbildung 45: ATC Delta, relativer Vergleich Filed (F) – Actual (A), geringste und grösste 10 Werte.

3.6.4 Gesamtresultat

Eine abschliessende Aussage über die Resultate sollte sich am Wert True Enroute Inefficiency orientieren, da dieser Wert die real geflogenen Flugrouten (Radaraufzeichnung) mit einer Free Flight Welt vergleicht. Während der Vergleich Shortest zu Direct auf die Planung fokussiert, vermittelt der Bezug zur realen Welt, den die True Enroute Inefficiency durch die Verwendung von Actual bietet, ein möglichst authentisches Abbild aus der Praxis. Für ein besseres Verständnis und einen direkten Bezug zur Streckenlänge bietet sich eine Gesamtaussage aus relativer Sicht an. Die Berücksichtigung der Streckenlänge erlaubt eine Aussage für eine beliebige Strecke, während eine absolute Aussage stets längere Strecken benachteiligt, da mehr Flugweg, und damit nicht allgemein angewandt werden kann. Ein Mittelwert über die in Abbildung 90 gezeigten relativen Werte wird vom Maximalwert stark beeinflusst. Der resultierende Mittelwert beträgt 6% bei einem Median von 4.4%. In einem weiteren Vergleich in Abbildung 46 wird die Betrachtung ohne die Extremwerte durchgeführt, wobei stets die entsprechenden Maximal- und Minimalwerte gleichzeitig ausgeschlossen wurden:

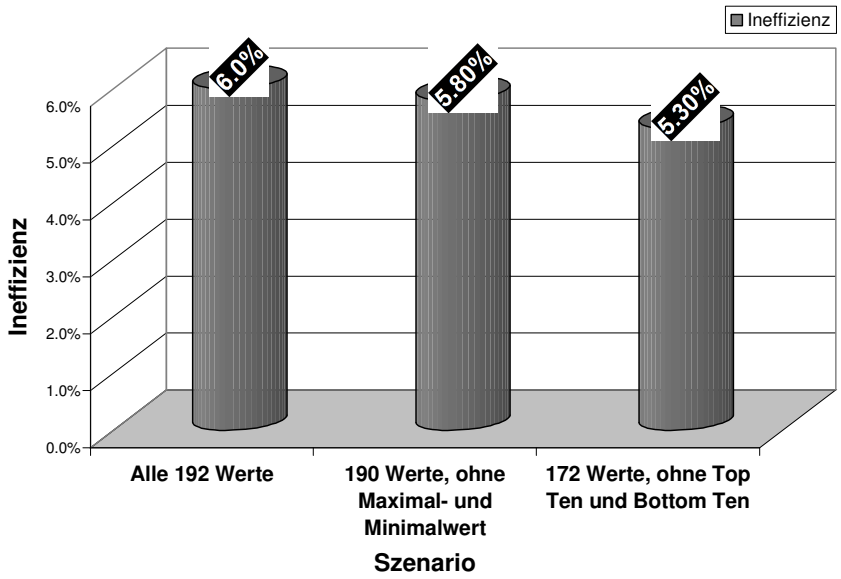


Abbildung 46: Mittelwerte der Ineffizienz in den verschiedenen Szenarien.

Bei Ausschluss der Extremwerte reduziert sich der Mittelwert deutlich. Diese Tatsache zeigt, dass wenige Maximalwerte einen gewichtigen Einfluss auf den Mittelwert haben.

Der Mittelwert lässt sich auch als Anteil der gesamten Differenz an der gesamten Streckenlänge (*Direct*) angeben und beträgt in diesem Fall 4.7%. Diese Zahl Vergleicht die gesamte Ineffizienz mit der gesamt geflogenen Strecke und hat keinen Bezug mehr zu den einzelnen Streckeneffizienzen, da die gesamten Distanzen addiert werden. So zeigt der vorher ermittelte Wert von 6% ein Bild über die einzelnen Strecken, während der Wert 4.7% von den Summen ausgeht und damit losgelöst von einzelnen Strecken entsteht. Diese wesentliche Differenz zu den ermittelten 6% ist in der Gewichtung der Strecken begründet: Kurze Strecken weisen tendenziell hohe Ineffizienzen auf, während viele lange Strecken deutlich geringere Ineffizienzen aufweisen. Diese wesentliche Erkenntnis ist in Abbildung 47 deutlich erkennbar.

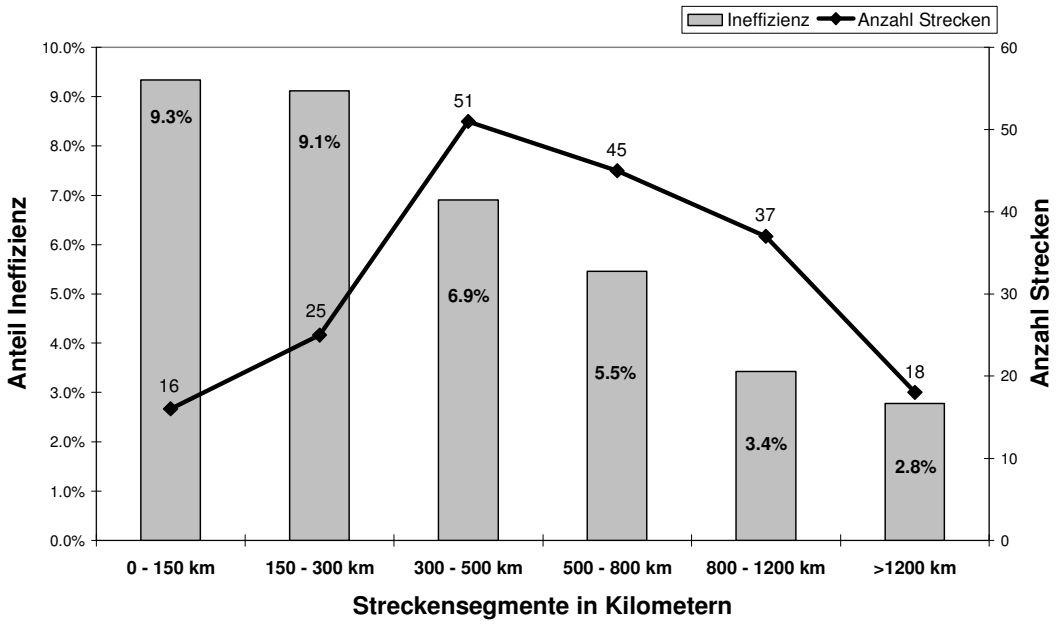


Abbildung 47: True Enroute Inefficiency (Actual – Direct) in Abhängigkeit von der Streckenlänge, gleichzeitig dargestellt ist die Anzahl Strecken der jeweiligen Segmente.

Die Frage nach dem „korrekten“ Mittelwert lässt sich nicht abschliessend beantworten. Eine Nicht-Berücksichtigung des Maximalwertes von 55.2% erscheint gerechtfertigt unter der Erkenntnis, dass der nächst folgende Wert mit 23.6% nur etwa die Hälfte des Maximalwertes beträgt und es sich damit um einen sehr Einflussreichen Extremwert handelt. Konsequenterweise wird aus diesem Grund der Minimalwert von 0.0% ebenfalls ausgeschlossen. Dies führt zu einem Mittelwert von 5.8% Ineffizienz, welcher somit als Gesamtresultat dieser Studie angegeben wird. Der Medianwert bleibt seiner Definition gemäss unverändert bei 4.4%.

3.7 Interpretation

Die Resultate aus Kapitel 3.6 zeigen eine Ineffizienz auf den Kontinentalstrecken von 5.8% oder etwa einem Siebzehntel. Auffallend ist im Vergleich der Resultate die Verschiebung der Strecken der Top und Bottom Ten je nach Betrachtungsweise. Die Beeinflussung der Mittelwerte durch Extremwerte, besonders Maximalwerte, ist bei der Ermittlung eines repräsentativen Mittelwertes ein Hindernis. Dies wurde bei der Ermittlung des Gesamtresultates an einem Beispiel gezeigt. Aus diesem Grund wurde jeweils der Medianwert zusätzlich genannt, welcher gegenüber Extremwerten unempfindlich ist.

Die Wahl der relativen True Enroute Inefficiency als Gesamtergebnis wurde aus den gemachten Überlegungen gewählt. Eine andere Argumentationsweise könnte zu einem abweichenden Resultat führen. Wenn die Route Design Inefficiency gewählt würde, ergäbe sich ein Mittelwert der 192 Flugstrecken von 5.3%. Ohne die beiden Extremwerte wären es 5.2% und ohne die Top und Bottom Ten wären es 4.9%. Diese Werte repräsentieren den Effekt der Struktur des Luftraums gegenüber einer direkten Route. Unter der Erkenntnis, dass die Flugsicherung meist Abkürzungen gegenüber den *Filed* Werten gewähren kann sowie der Tatsache, dass die Differenz zwischen *Filed* und *Shortest* vernachlässigbar klein ist, mag es erstaunen, dass die Route Design Inefficiency kleiner ist als die True Enroute Inefficiency. Dies liegt daran, dass für die Berechnungen nicht identische Werte für *Direct* verwendet werden konnten. Der aufmerksame Leser hat diesen Unterschied an der Bezeichnung bereits feststellen können. Während für die True Enroute Inefficiency der Wert D3 verwendet wurde, kam bei der Route Design Inefficiency der Wert Ds zum Zug. Der Unterschied zwischen diesen Werten beträgt im Mittel 1.9 NM (bei 190 Werten ohne Extremwerte) oder 1.3% von D3 (bei 190 Werten ohne Extremwerte). Dieser Unterschied erklärt denn auch, weshalb die spontane Gesamtrechnung True Enroute Inefficiency plus ATC Delta gleich Route Design Inefficiency nicht aufgeht.
Der Unterschied in den *Direct* Werten führt nur bei einer Strecke zu wesentlichen Abweichungen: Die Strecke Zürich – Stuttgart weist Werte von D3 = 21.52 NM und Ds = 45.02 auf, was einer Differenz von mehr als Faktor 2 entspricht. Dies erklärt das Unterschiedliche Auftauchen von dieser Strecke in den beiden Route Inefficiencies. Mit Ausnahme von fünf[81] Direct-Differenzen liegen alle Differenzen unter 10%, sodass sich ausser den erwähnten keine wesentlichen Unterschiede ergeben.

3.7.1 Vergleich mit weiteren Studien

Der Vergleich mit weiteren Studien zur Effizienz von Flugrouten im Kontinentalbereich gestaltet sich schwierig, da die Untersuchungen auf unterschiedlichen Annahmen und Methoden beruhen.

3.7.1.1 Auswertung des Traffic Samples von EUROCONTROL

EUROCONTROL hat eine eigene Auswertung der gleichen Daten im Rahmen einer Route Extension Analysis vorgenommen. Die Auswertung des

[81] 23.0% bei ZRH-FRA, 21.2% bei STR-ZRH, 16.4% bei ZRH-NUE, 13.6% bei ZRH-LUX und 10.9% bei ZRH-HAJ

Gesamtresultats erfolgte als Vergleich der gesamten Differenz zwischen *Shortest* und *Direct* jeweils durch Verwendung der ermittelten totalen Distanzen. Dabei fallen häufiger beflogene und lange Strecken stärker ins Gewicht. Die Differenz zwischen dieser Gewichtung beträgt bis zu einem Faktor 64 (Frequenz), da einige Flüge nur 1 Mal durchgeführt, die häufigste Strecke jedoch 64 Mal (Zürich – Genf) geflogen wurde. Weiter basiert die prozentuale Ermittlung der Differenz auf dem tieferen Wert *Direct*, im Unterschied zur Methode der Studie in dieser Arbeit, welche den höheren als Ausgangswert annahm. Der Fokus der Verlängerung von Routen (Extension) verlangt nach dieser Methode. EUROCONTROL hat die Auswertung mit verschiedenen Eingangsdaten doppelt gemacht. In der Model 1 (M1) genannten Auswertung wurden Daten vor Beginn des Fluges gewählt während im Model 3 (M3) genannten Vergleich laufend aktualisierte Daten im Verlauf des Fluges benutzt wurden. Die M3 Daten ergeben kleinere Abweichungen, da Abkürzungen, welche sich nach Flugantritt auf Grund frei werdender Luftraum Kapazitäten ergeben, als solche bereits für den mit *Direct* verglichenen Wert angepasst werden.
Eine direkte Vergleichbarkeit der Studien ist aus den genannten methodischen Abweichungen nicht möglich. Die Resultate von EUROCONTROL liegen jedoch mit 6.17% (M1) bzw. 5.53% (M3) dennoch sehr nahe an den 5.8% und dürfen als Bestätigung gewertet werden. EUROCONTROL hat dieselbe Studie mit Daten vom gesamten Europäischen Luftraum im selben Zeitraum durchgeführt und dabei die Werte 5.15% (M1) bzw. 4.38% (M3) ermittelt. Interessant dabei ist, dass die Swiss eine um etwa 1% (oder rund 1.2 Mal) höhere Ineffizienz erfährt als der europäische Durchschnitt. Dies ist unter anderem auf die Luftraumstruktur in und um Zürich zurück zu führen, welche grössere Ineffizienzen als an anderen Hubs verursacht, sowie wegen den eng belegten Lufträumen im Zentralbereich Europas.

3.7.1.2 Flight Efficiency Studies in Europe and the United States

Im Jahr 2003 führten EUROCONTROL und die Federal Aviation Administration (FAA) Flight Efficiency Studies in ihren Zuständigkeitsbereichen durch. EUROCONTROL verglich dabei tatsächliche Flüge (Radaraufzeichnungen, *Actual*) mit theoretisch direkten Flügen. Für direkte Flüge wurde ein Great Circle Wert gewählt. Die Differenz wurde ebenfalls als prozentualer Wert des Great Circle Wertes formuliert. Es wurden insgesamt 16'000 Flüge in der Studie berücksichtig, jedoch fanden diese vorwiegend in westeuropäischen Ländern (ohne Deutschland) statt, da nur jene Flugsicherungen Radardaten lieferten. Die resultierende Ineffizienz wurde von EUROCONTROL mit 10.2% ermittelt. Dieser

wesentlich höhere Wert als derjenige aus der vorliegenden Studie ergibt sich aus der Verwendung des Great Circle Vergleichswertes und den damit berücksichtigten zusätzlichen Flugweginеffizienzen in den TMAs.
Die Resultate der FAA wurden aufgeteilt in eine Betrachtung über die gesamte Streckenlänge, analog dem Ansatz von EUROCONTROL (im Jahr 2003, seither um Kreise mit 30 NM erweitert) sowie einen Ansatz mit Kreisen von 50 NM Radius um Start- und Zielflughafen. Dies führt im ersten Fall zur Betrachtung mit, im zweiten Fall ohne TMA. Die FAA ermittelte Ihre Resultate an jeweils einzelnen Tagen im Jahr 2002 sowie erneut im Jahr 2004. Es wurden ca. 40'000 Flüge ausgewertet. Dabei ergab sich 2004 eine gesamte Ineffizienz von 5.8% sowie eine en route Ineffizienz von 1.8%. Diese Werte ergaben sich an einem Schönwetter Tag ohne nennenswerte Beeinträchtigung der Flüge durch das Wetter. Dieselbe Studie von 2002 ergab für die Gesamtbetrachtung Werte von 6.9% (analog M1) bzw. 7.7% (analog M3) und für den en route Bereich 3.1% (analog M1) bzw. 2.4% (analog M3). Diese Werte liegen tiefer als die Werte aus Europa, was unter anderem auf die durchschnittlich längeren Flüge in den USA zurück zu führen ist. Ein weiterer begünstigender Grund in den USA sind die weiter auseinander liegenden TMAs, welche eine effizientere Gestaltung des Luftraums ermöglichen.[82]

3.7.2 Einschränkungen der Studie

Der in dieser Studie gemachte Vergleich von Distanzen fokussiert auf die 2D Effizienz, während die Eingangsdaten auf einem 3D Konstrukt beruhen (im Fall von Radardaten sogar auf 4D). Die Abhängigkeit der mit Tageszeit und Wochentag variierenden Rahmenbedingungen wurde ebenfalls nicht berücksichtigt. Die Flughöhe als Effizienzkriterium lässt sich mittels Distanzen nicht messen und ist somit aus dieser Untersuchung ausgeklammert.
Der Wert *Actual* beruht auf Radardaten in einem Intervall von 1 Minute. In dieser Zeit bewegt sich ein Flugzeug etwa 13 Kilometer. Diese geringe Auflösung der Daten kann zu ungenauen Werten führen. Holdings sind im Wert *Actual* ebenfalls ausgeklammert, obwohl dieser Wert den Anspruch tatsächlicher Flüge hat. Holdings führen in der Praxis zu weiteren Streckenverlängerungen und damit einer geringeren Effizienz. Dieser Einfluss kann in zahlreichen Fällen die ermittelten Werte deutlich verschlechtern. Eine Ausklammerung der Holdings ist jedoch dennoch gerechtfertigt, da diese meist innerhalb der TMA stattfinden und somit in jedem Fall aus der Betrachtung ausgeklammert worden wären.

[82] http://www.eurocontrol.int/ EEC SEE 2005.

4 Studie *Lufthansa*: Interkontinentale Flüge

4.1 Über die Studie

Die folgende Studie wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung OZ/G „Operations Engineering und Standards“ der Deutschen Lufthansa (DLH) in Frankfurt durchgeführt. Diese Abteilung befasst sich unter anderem mit der Optimierung von Flugstrecken und verfügt auf diesem Gebiet über jahrelange Erfahrung.
Ziel der Studie war es, eine Aussage über die Effizienz der Flugplanung und Flugdurchführung auf interkontinentalen Flügen zu erhalten. Nebst einer Aussage über gemittelte Zahlen zu den Langstreckenflügen interessierte auch der Vergleich von Flügen in verschiedenen Flugregionen. Der Einfluss des europäischen Luftraumes (bereits untersucht in Kapitel 3) lässt sich aus dieser Betrachtung nicht ausklammern, stellt jedoch nur einen kleineren Flugabschnitt der Langstreckenflüge dar.

4.2 Wahl der Destinationen

Die Auswahl der untersuchten Flugstrecken wurde zusammen mit den Experten bei der DLH getroffen, welche die spezifischen Eigenschaften jeder Flugstrecke aus der Praxis kennen und somit eine interessante und repräsentative Selektion ermöglichten. Die Grundlage für die Datenauswertung bildete das Streckennetz der Lufthansa in der Zeit von Juli bis Oktober 2007 und in diesem Zeitraum wurden die Berechnungen durchgeführt. So konnte gewährleistet werden, dass sämtliche Daten verfügbar waren sowie wesentliche Kenntnisse bei den Berechnungen einfliessen konnten. Es wurden 17 Destinationen identifiziert, welche das Langstreckennetz der Lufthansa weitgehend repräsentieren. Kriterium für das jeweils gewählte Sample war, dass andere (nicht berechnete) Strecken aufgrund von deren ähnlich verlaufenden Flugrouten jeweils durch dieses Sample mit abgebildet wurden. Diese Auswahl musste getroffen werden, da eine Untersuchung über sämtliche Langstrecken Destinationen der Lufthansa aus Zeitgründen nicht möglich war. Die Berechnung eines einzelnen Fluges auf einer Strecke dauerte auf Grund der Komplexität mancher Berechnungen bis zu 25 Minuten, womit klar wird, dass der Zeiteinsatz für die Berechnungen allein mit den gewählten 34 Flugstrecken (jeweils tägliche oder quartalsweise Berechnungen) bereits enorm war (172 Berechnungen). Es wurden die folgenden Gruppen mit den dazugehörigen Destinationen gebildet:

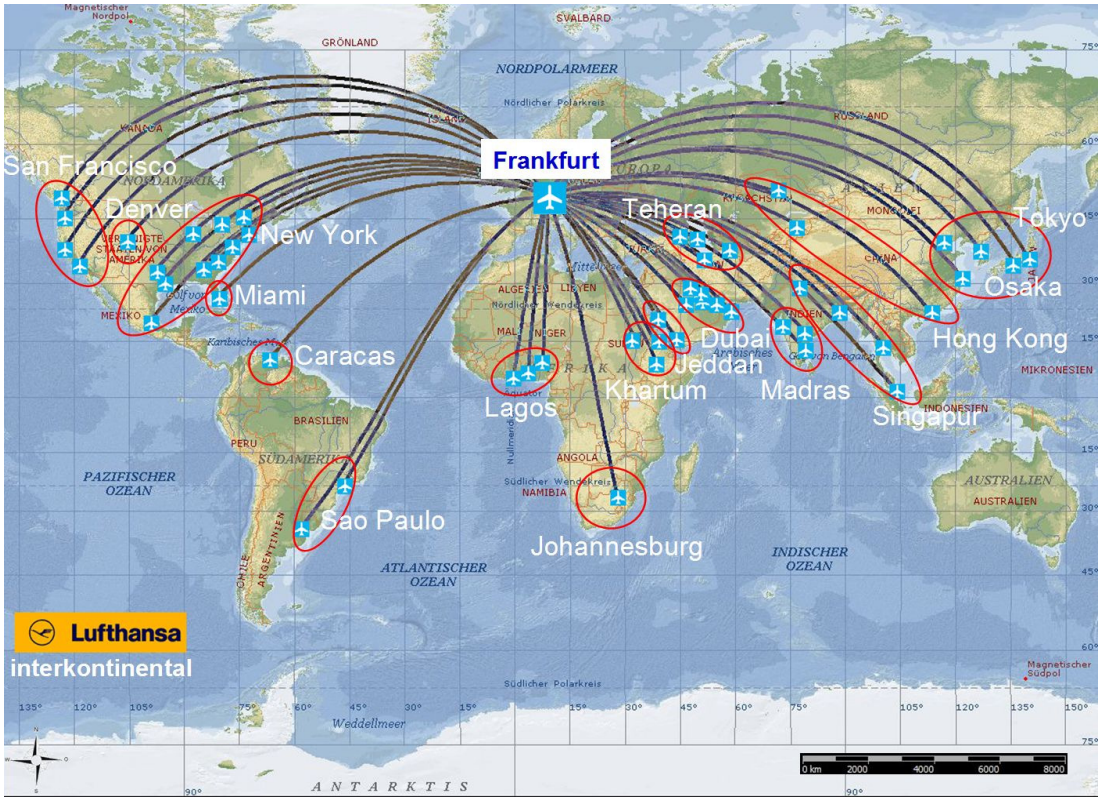


Abbildung 48: Klassierung und Auswahl der Destinationen für die Studie. Roter Kreis = Gruppe, weisse Schrift = Vertreter, Verbindungen als Great Circle dargestellt.[83]

Ähnlich verlaufende Grosskreis Routen (als Näherung, braun eingezeichnet) deuten auf ähnliche Rahmenbedingungen der Luftraumstruktur und Flugsicherung hin. Solche Routen wurden als Gruppe zusammengefasst und die für diese Gruppe berechnete Strecke ist der Vertreter. Unter einem Vertreter wird ein für eine Region repräsentativer Flughafen verstanden, dessen Flugberechnungen ähnliche Resultate ergeben wie bei den anderen Flughäfen derselben Gruppe.
Im Folgenden wird nun genauer auf die einzelnen Gruppen sowie deren Vertreter eingegangen. Bei dieser Gelegenheit werden auch die den Flughäfen entsprechenden *3-letter-codes* von IATA eingeführt.

4.2.1 Nordatlantik

Flughäfen: Miami *International* (MIA), New York *John F. Kennedy* (JFK), Denver *International* (DEN), San Francisco *International* (SFO).
Innerhalb des nordamerikanischen Kontinentes wird vorwiegend in Ost- und Westküste unterteilt. Die Ostküste weist das grösste Volumen an

[83] Eigene Darstellung, Karte in Microsoft Encarta erzeugt, Zylinderprojektion

transatlantischem Verkehr auf und wird in der vorliegenden Auswahl durch den New Yorker JFK Flughafen repräsentiert. Miami wurde zusätzlich als südlicher Vertreter der Ostküste gewählt, da die Flugrouten aufgrund der südlichen Lage nicht gleich verlaufen wie für die nördlicher gelegenen Destinationen der Ostküste. Miami nimmt deshalb eine Sonderstellung ein.
Denver wurde als Vertreter des kontinentalen Festlandes gewählt, um diese weniger stark frequentierte Region für transatlantische Verbindungen zu repräsentieren.
Als Repräsentant der ebenfalls verkehrsstarken Westküste wurde San Francisco gewählt. In einer ersten Konzeption wurde ohne einen Vertreter der Westküste gearbeitet, später jedoch erkannt, dass dies kein umfassendes Bild ergeben würde. Die Flugrouten für die Westküste verlaufen von Europa her weit nördlich, meist ausserhalb der NAT und haben damit auch ihre eigene Charakteristik.

4.2.2 Südatlantik

Flughäfen: Sao Paulo *Guarulhos* (GRU), Caracas *Simon Bolivar* (CCS).
Der Südamerikanische Kontinent ist im Streckennetz der Lufthansa mit 3 regelmässig bedienten Strecken nur schwach vertreten, was die Auswahl stark eingeschränkt hat. Nebst den ausgewählten wird nur noch Buenos Aires *Ezeisa Ministro Pistarini* (EZE) angeflogen, wobei der Flugweg nahezu identisch mit dem Flug nach Sao Paulo ist. Die Flüge nach Südamerika führen vorwiegend über die SAT, wobei Caracas als nördlichste Destination nicht über die SAT erreicht wird.

4.2.3 Afrika

Flughäfen: Johannesburg *O.R. Tambo International* (JNB), Lagos *Murtala Mohammed International* (LOS), Khartoum *International* (KRT).
Von den 11 Destinationen auf dem afrikanischen Kontinent liegen sechs in Nordafrika zwischen Casablanca und Kairo. Flüge an diese Destinationen gelten als kurze Flüge und finden zu einem überwiegenden Teil im europäischen Luftraum statt, weshalb sie nicht in die Studie aufgenommen wurden.
Für die drei Destinationen im Golf von Guinea wurde Lagos als mittlere der drei Destinationen gewählt, und für Südafrika war Johannesburg die einzige Destination. Ostafrika wird durch die Strecke nach Khartoum repräsentiert.

4.2.4 Naher- und Mittlerer Osten

Flughäfen: Dubai *International* (DXB), Jeddah *King Abdul Aziz International* (JED), Teheran *Mehrabad International* (THR)
Flüge zu den Lufthansa Destinationen im Nahen und Mittleren Osten werden durch die Destinationen Jeddah, Dubai und Teheran repräsentiert.

4.2.5 Ferner Osten

Flughäfen: Tokio *Narita* (NRT), Hong Kong *International* (HKG), Singapur *Changi International* (SIN), Chennai *Anna International* (MAA), Osaka *Kansai International* (KIX)
Die mehr als 20 Lufthansa Destinationen im Fernen Osten lassen sich in vier kleine Gruppen unterteilen, welche über ähnliche Flugrouten von Deutschland aus erreicht werden. Die Destination Osaka wurde nachträglich für das Sample gewählt, da auf dieser Strecke besonders interessante Rahmenbedingungen gelten.

4.2.6 Nicht berücksichtigte Regionen

Im Lufthansa Streckennetz nicht enthalten sind Destinationen in Australien, Ozeanien und in den polaren Regionen. Destinationen in diesen Gebieten werden im Codeshare mit anderen Fluggesellschaften angeboten, während sich für die polaren Regionen kaum Flüge finden lassen. Solche Strecken liessen sich mit dem benutzten Verfahren zwar ebenfalls berechnen, wurden aber für die Studie nicht berücksichtigt, da die Kompetenz sowie die Relevanz für Lufthansa auf den beflogenen Strecken höher ist.

4.2.7 Intervalle der Berechnungen

Die Berechnungen für die einzelnen Strecken sollten möglichst nach identischen Bedingungen durchgeführt werden, um eine Vergleichbarkeit zu garantieren. Bei einer stark begrenzten Anzahl von Flügen wird diese Vergleichbarkeit und eine Repräsentanz der Aussagen am besten durch Berechnungen mit statistischen Winden erreicht. Dies war auf Grund der täglich wechselnden Tracks auf dem Nordatlantik nicht möglich. Da auf dem Nordatlantik keine starre ATS Struktur existiert, sondern eine täglich wechselnde, musste als Basis der Berechnungen der jeweils täglich vorhergesagte Wind zugrunde gelegt werden. Für die Studie sind somit sieben Tage im Juli und August gewählt worden, an welchen die

Nordatlantik Strecken berechnet wurden. Die Flüge nach Caracas, welche als Südatlantik Strecke klassiert wurden, fliegen ebenfalls auf täglich wechselnden Tracks und wurde somit auch täglich berechnet. Die restlichen Destinationen werden auf fixen ATS Strukturen beflogen und wurden somit nicht täglich, sondern quartalsweise berechnet. Die Quartale sind: Januar bis März, April bis Juni, Juli bis September und Oktober bis Dezember. Es hätten auch monatliche Intervalle gewählt werden können, jedoch hätte dies kaum Zugewinn an Genauigkeit, jedoch erheblich mehr Rechenaufwand bedeutet (entsprechende Vergleichsberechnungen wurden stichprobenartig vorgenommen). Aus einer hinterlegten Datenbank wurden bei den quartalsweisen Berechnungen statistische Winde für das betreffende Quartal benutzt, während bei den täglichen Berechnungen die aktuellen Windverhältnisse und daraus resultierenden Tracksysteme in die Berechnungen eingeflossen sind. Es wurde darauf geachtet, dass keine aussergewöhnlichen Verhältnisse wie starke Stürme oder ähnliches das Bild verzerrten.
Es muss unterstellt werden, dass die quartalsweise Berechnung ein genaues Bild der tatsächlichen Situation widerspiegelt, weil die grossräumigen Windströmungen über den Kontinenten relativ stabil sind und sich primär mit dem Wandel der Jahreszeiten verschieben.

4.3 Daten

Die Auswertung zur Effizienz interkontinentaler Flüge lehnt sich von der Vorgehensweise an das in Kapitel 1.4 erläuterte Vorgehen an. Die Daten wurden über Berechnungen ermittelt und anschliessend in eine Excel-basierte Auswertung übertragen. Ein Beispiel für ein Resultat der Berechnungen findet sich im Anhang C.VIII. Die Daten lassen sich als Analyse in Zahlen betrachten oder graphisch als Darstellung auf einer Karte (Lambert konformen Karte mit Standardparallelen 1/6 vom unteren bzw. oberen Kartenrand).
Für die Auswertung wurden drei Werte ermittelt, für welche aus Gründen der Vereinfachung eine Bezeichnung gefunden werden musste, die möglichst ihre Bedeutung widerspiegelt. Es sind dies die folgenden, neu definierten Werte:

4.3.1 CurRoute

Der Wert *CurRoute* steht für *Current Route* und repräsentiert eine tatsächlich geflogene Route. In der Praxis wird täglich die jeweilige Flugroute aus einer Anzahl von vordefinierten Flugrouten (*Predefined Route*) ausgewählt. Diese vordefinierten Flugrouten sind gewachsene Strukturen, die auf Grund jahrelanger

Erfahrung festgelegt wurden und stellen die verschiedenen möglichen, optimalen Verbindungen für verschiedene Rahmenbedingungen dar. Unter den variablen Bedingungen sind primär die Windverhältnisse zu nennen, jedoch werden einzelne Routen auch als Alternativen definiert, um gewisse Gebiete (z.B. Krisengebiete, Gebiete mit aussergewöhnlich hohen Flugsicherungsgebühren, etc.) umfliegen zu können.

Das folgende Beispiel eines Fluges von Frankfurt nach Tokio zeigt die neun möglichen CurRoutes graphisch (Abbildung 49). Die anschliessend folgende Tabelle (Abbildung 50) zeigt die analytischen Resultate für die Berechnungen auf allen neun Flugrouten an einem bestimmten Tag. Im vorliegenden Beispiel ist der OFP[84] Nummer 10 der schnellste (unter den berechneten MFT) mit einer Zeit von 10 Stunden 31 Minuten. In diesem Beispiel weist der schnellste Plan auch den geringsten Treibstoffverbrauch aus und ebenfalls die geringsten Kosten (Costs), was nicht grundsätzlich der Fall sein muss.

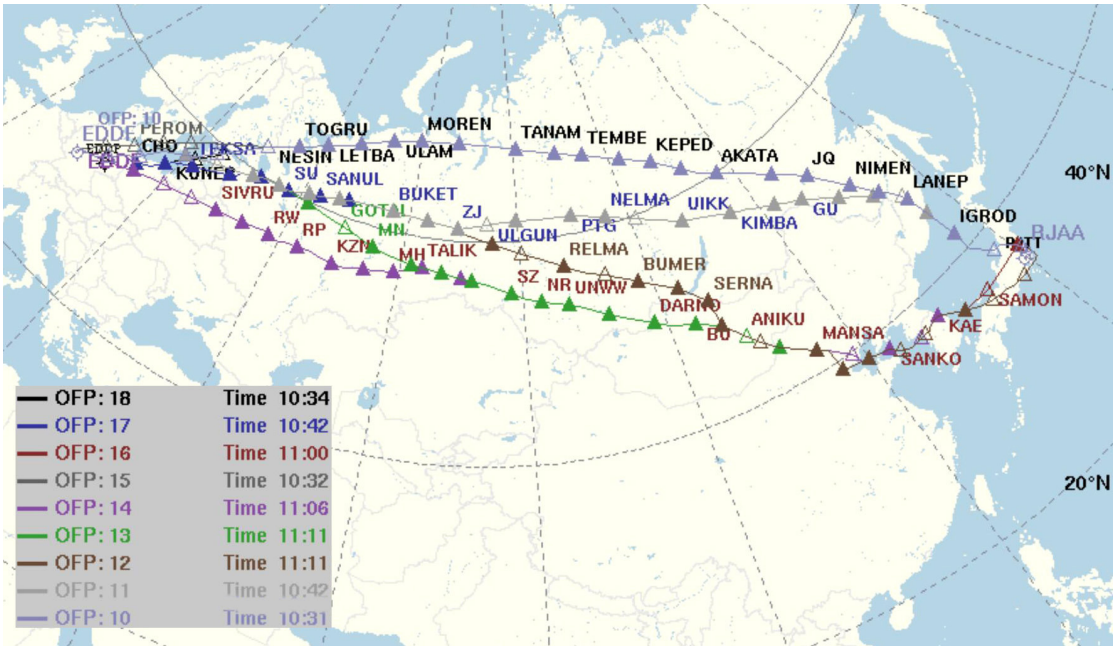


Abbildung 49: Flug Frankfurt – Tokio, alle 9 vordefinierten Routen (CurRoute) am 09. August 2007mit den korrespondierenden Flugrouten, teils überlappend.[85]

[84] Operational Flight Plan, Flugplan.
[85] Lufthansa.

ROUTE	NRT1RPL	NRT2RPL	NRT3RPL	NRT4RPL	NRT5RPL	NRT6RPL	NRT7RPL	NRT8RPL	NRT9RPL	NRT1RPL
OFP NO	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
REG	DABTK	DABTK	DABTK	DABTK	DABTK	DABTK	DABTK	DABTK	DABTK	DABTK
CRUISE	CI70	CI70	CI70	CI70	CI70	CI70	CI70	CI70	CI70	CI70
TRIP	108326	109971	115669	115540	114603	108430	113306	109952	108564	109407
TTIME	1031	1042	1111	1111	1106	1032	1100	1042	1034	1033
ETA	2047	2058	2127	2127	2122	2048	2116	2058	2050	2049
COSTS	82657	83518	87454	87209	86975	83002	86124	83516	82799	83366

Abbildung 50: Auswertung der 9 vordefinierten Routen (CurRoute). TRIP = Treibstoff in Kilogramm, TTIME = Gesamtflugzeit (bis zur Destination), ETA = Erwartete Ankunftszeit (hier fiktiv), COSTS = Kosten in US-Dollar für den gesamten Flug.[86]

4.3.2 AirwOpt

Die kürzeste Strecke innerhalb der heutigen Strukturen des ATS wurde AirwOpt, in Anlehnung an *Airway Optimum*, benannt. Dabei wird eine bestimmte Strecke unter Berücksichtigung der aktuellen Windverhältnisse innerhalb bestehender ATS Strukturen optimiert, ohne jedoch die herrschenden Restriktionen auf diesen Strecken zu berücksichtigen. Es wurde jede vorhandene Verbindung optimal genutzt, was in der Praxis auf Grund von Restriktionen häufig nicht möglich ist. Das Resultat entspricht von der Logik her weitestgehend der kurz- bis mittelfristig gesehen schnellsten planbaren Verbindung, da die ATS Strukturen nur längerfristig veränderbar sind.

4.3.3 FreeGrid

In einer idealen Welt ist ein Flugzeug nicht an bestehende ATS Strukturen gebunden und kann die Flugroute selbst wählen. Dies wird mit den Begriffen „Free Flight“ und „Free Flow“ umschrieben und entspricht aus heutiger Sicht (noch) einem theoretischen Wert. Wäre ein Flugzeug nicht den globalen Windsystemen ausgesetzt, so würde diese günstigste Verbindung entlang dem Great Circle in der optimalen Höhe über der Erdoberfläche verlaufen.
Der Wert *FreeGrid* optimiert das Segment eines Fluges zwischen dem äussersten SID Punkt des Startflughafens und dem ersten STAR Punkt des Zielflughafens. Die Optimierung des en route Segmentes läuft entlang dem vordefinierten Raster (Grid) auf der Erdoberfläche völlig frei nach ausgewählten Optimierungskriterien. Entscheidend für die korrekte Ermittlung dieses Wertes ist die Berücksichtigung der Windsituation. Diese führt auf der Langstrecke zu wesentlichen Unterschieden der Flugzeiten gegenüber einer Great Circle Route.

[86] Lufthansa

4.4 Das Programm

Die Berechnungen für die vorliegende Studie wurden auf einer so genannten Lido OC Grid-Workstation durchgeführt, welche auf dem Lido OC Optimizer basiert. Die Grid-Workstation wurde speziell für Berechnungen in einer Free Flight Welt (Grid) im Auftrag von Lufthansa entwickelt und stellt somit eine „frühe" Speziallösung dar. Früh deshalb, weil Free Flight zwar (noch) nicht fliegbar ist, die Berechnungen aber jetzt schon an Interesse gewinnen und damit eine weitere Nachfrage durch neue Anwender entstehen wird. Grid-Optimierungen können aber heute schon in die Diskussion über optimierte ATS-Strukturen eingebracht werden, wenn es um die Einrichtung neuer Strukturen geht.[87]

4.4.1 Parameter für die Berechnungen

Sämtliche Berechnungen wurden unter stets gleichen Einstellungen der Parameter gemacht, um eine Vergleichbarkeit der Werte sicher zu stellen. Dies betrifft die folgenden Parameter:

4.4.1.1 Flugzeugtyp

Der gewählte Flugzeugtyp ist die Boeing 747-400 (Immatrikulation: D-ABTK), welche seit 1989 das Rückgrat der Langstreckenflotte bei Lufthansa darstellt. Mit einer aktuellen Stückzahl von 30 Flugzeugen ist es auch der am stärksten vertretene Flugzeugtyp der Langstreckenflotte. Mit einer Reichweite von 12'750km und einer maximalen Flughöhe von 13'700m gibt es keine limitierenden Faktoren aus den Flugeigenschaften, welche die Berechnungen verzerren würden.[88]
Die Flugeigenschaften eines Flugzeuges hängen unter anderem von seinem Gewicht ab. Bei einer Boeing 747-400 sind beim Start zu einem ca. 8 – 9 Stunden dauernden Flug etwa 100 Tonnen Treibstoff an Bord, welche im Verlauf des Fluges zum grössten Teil aufgebraucht werden. Dadurch wird das Flugzeug leichter, was wiederum die optimale Flughöhe beeinflusst. Das Flugzeug steigt typischerweise im Verlauf des Fluges, um möglichst immer in einer für sein aktuelles Gewicht optimalen Flughöhe zu fliegen. Um Verbrauchswerte, Zeiten etc. sinnvoll auswerten zu können, ist die Masse des Flugzeuges ohne Treibstoff (ZFW, siehe unten) ein wichtiger Ausgangsparameter, welcher immer gleich gewählt werden muss, um eine Vergleichbarkeit zu garantieren. Nachfolgend die für die Berechnung eingegebenen Massen:

[87] Powerpoint „Grid-Workstation", Lido Systems.
[88] http://konzern.lufthansa.com/.

DOW = Dry Operating Weight
Masse des Flugzeuges in flugfertigem Zustand, jedoch ohne Zuladung und ohne Treibstoff
= 187'090 kg

Payload = Zuladung in Form von Passagieren, Fracht und Post; auch bekannt unter Nutzlast
= 45'000 kg

ZFW = Zero Fuel Weight
Masse des Flugzeuges nach Beladung, ohne Treibstoff
entspricht dem DOW plus Payload
= 232'090 kg

Das ZFW ist natürlich nicht gleich dem Take Off Weight (TOW), da noch kein Treibstoff eingerechnet ist. Die Menge an Treibstoff ist das Ergebnis genauer Vorplanung und der Flugplanberechnung. Alles bisher zur Streckenführung Gesagte spielt dabei eine wesentliche Rolle.

4.4.1.2 Fluggeschwindigkeiten

Die Reisegeschwindigkeit im cruise hängt vom Flugzeugtyp und der Höhe ab. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden der Vergleichbarkeit wegen Standardverfahren angewandt. Selbst für einen Flugzeugtyp gibt es abweichend vom Standard verschiedene so genannte Cruise Procedures, also Geschwindigkeits-Regimes. Eine Aussage zur Reisegeschwindigkeit hängt also von vielen Faktoren ab, die an dieser Stelle nicht im Einzelnen diskutiert werden können. Die im Kapitel 2.6.4 gemachten Erläuterungen zum Thema ECON-fuel liefern die Erklärungen dazu. Die gewählte Fluggeschwindigkeit für die Berechnungen entspricht einem Kostenindex von 70 (vgl. Kapitel 2.6.4.) Die Parameter sind in Abbildung 51 ersichtlich.

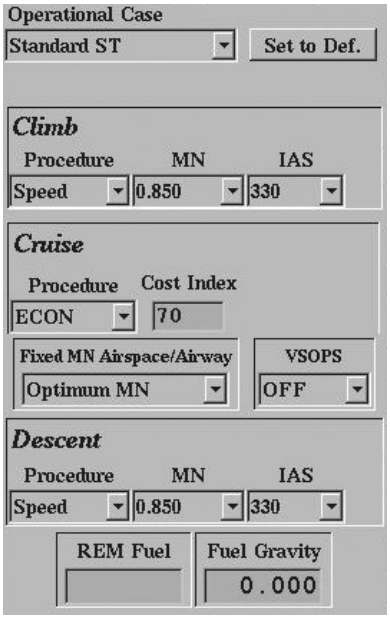


Abbildung 51: Einstellung der Fluggeschwindigkeit auf der Gridworkstation.[89]

4.4.2 Auflösung des Grid

Für die Berechnung der Grid-Werte (FreeGrid) ohne Berücksichtigung des bestehenden ATS Netzwerkes benutzt die Software einen Raster, welcher über die Erdoberfläche gelegt wird. Die Einteilung in zonaler Richtung (ΔLängengrad) beträgt zwischen dem Äquator und 60º Nord/ Süd Schritte von 30', zwischen 60º und 80º Nord 1º und nördlich von 80º Nord sind es 5º Schritte[90]. Die Rasterdimension geographische Länge ist somit von der Breite abhängig. Eine Abdeckung über 60º Süd ist nicht vorgesehen, da dies ausserhalb des Bereichs der Lufthansa Flüge liegt. Die Einteilung in meridionaler Richtung (ΔBreitengrad) beträgt konstant 30'. Eine Breitenminute entspricht genau einer Nautischen Meile, also 1.852 km. Somit beträgt die Rasterweite auf dem Äquator 30 NM Mal 30 NM (55.6 km Mal 55.6 km), auf 50º Nord 30 NM Mal 19,3 NM (55.6 km Mal 35.75 km und auf 70º Nord 30 NM Mal 20.5 NM (55.6 km Mal 38 km).[91]

Die Auflösung entspricht somit etwa einer Bedeckung der gesamten Erde mit Feldern der Grösse des Kantons Tessin (mit 2'812km^2 ungefähr die Auflösung am Äquator) und des Kantons St.Gallen (mit 2'096km^2 ungefähr die Auflösung bei 50º respektive 70º Nord).[92]

[89] Lufthansa.
[90] Dies wurde wegen der Meridiankonvergenz so entschieden.
[91] Berechnungen im Anhang C.III.
[92] http://www.tell.ch/.

4.5 Optimierung

Für sämtliche Optimierungen und resultierenden Werte wurde der Einfluss der TMA nicht berücksichtigt, wie bereits eingangs erwähnt wurde. Das bedeutet, dass innerhalb der TMA keine Optimierung vorgenommen wurde und somit die Zeitwerte für den Flug innerhalb der TMAs (Departure and Destination) identisch sind. Dies wird nicht direkt ersichtlich, da diese Werte nicht einzeln verfügbar sind. Im Zeitwert stellt dies jedoch ein Anteil an der gesamten Flugzeit dar. Die so gewonnene Betrachtung fokussiert damit ausschliesslich auf den en route Bereich.

4.5.1 Optimierung der Werte

Der Wert *CurRoute* ist das Resultat eines Vergleichs sämtlicher vordefinierter Strecken, welche Lufthansa auf den gewählten Flugverbindungen kennt und benutzt. Jahrelange Planung, Erfahrung und tägliche Anwendung liessen diese entstehen und bilden so das Rückgrat der täglichen Planung. So kann dort auf diese vordefinierten Strecken zurückgegriffen werden, ohne stets aufwändiges Suchen der optimalen Verbindung. Da in den *CurRoute* sämtliche Restriktionen bereits eingespiesen sind, ist die Durchführbarkeit eines Fluges entlang einer *CurRoute* stets auch in der Praxis möglich. Für die tägliche Optimierung auf einer Flugverbindung werden dann alle bekannten Predefined Routes, in der Regel zwischen fünf und maximal fünfzehn, berechnet und miteinander verglichen. Ausgewählt wird jeweils jene Strecke, welche unter Berücksichtigung eines optimalen Treibstoffverauchs (MFT) die kürzeste Flugzeit ergibt. Diese kürzeste der *CurRoutes* entspricht der optimalen Wahl aus den möglichen und fliesst so in die Auswertung der Studie ein.
Grundsätzlich würde man für diese Berechnung den MTT wählen, da man in der Diskussion um kürzeste Flugzeiten die Zeit minimieren möchte und nicht den Treibstoff. Für die Berechnung des MTT wählt der Algorithmus jedoch stets die Flughöhe, in welcher die Windverhältnisse am besten sind. So kann es sein, dass ein Flugzeug rein zum Zweck der Zeitersparnis einen höheren Flight Level verlässt und absinkt, um ein paar wenige Minuten Zeit auf einem windgünstigeren, tieferen Flight Level einsparen zu können. Ein solches Vorgehen spart wenig Zeit unter Einsatz relativ grosser zusätzlicher Treibstoffmengen, welche durch den Flug in tieferen Luftmassen und den erneuten Steigflug verbraucht werden. In der Praxis kommt es vor, dass ein Flugzeug einen höheren Flight Level kurz- bis mittelfristig gegen einen tieferen Flight Level eintauscht, jedoch sind solche Fälle eher selten und meistens auf weitere Faktoren wie zum Beispiel ATC Kapazität zurück zu

führen. Der Unterschied in der Berechnung vom MFT zum MTT kann sowohl in der gewählten Flughöhe als auch im horizontalen Flugweg liegen.
Die folgende Graphik (Abbildung 52) eines Fluges von Frankfurt nach Miami am 21. August 2007 zeigt die Resultate eines MFT gegenüber dem Resultat eines MTT. Im grau umkreisten Bereich erkennt man einen vorübergehenden Steigflug auf einen höheren Flight Level, gefolgt von einem Sinkflug auf einen tieferen cruise level. In diesem umgekehrten, von der Logik her aber identischen Beispiel optimierte der Algorithmus auf günstigere, höher gelegene Winde, um Zeit zu sparen. Sol ein Fall ist nur beim MTT möglich, weil beim MFT die ungünstigere Treibstoffrechnung dies verhindert.

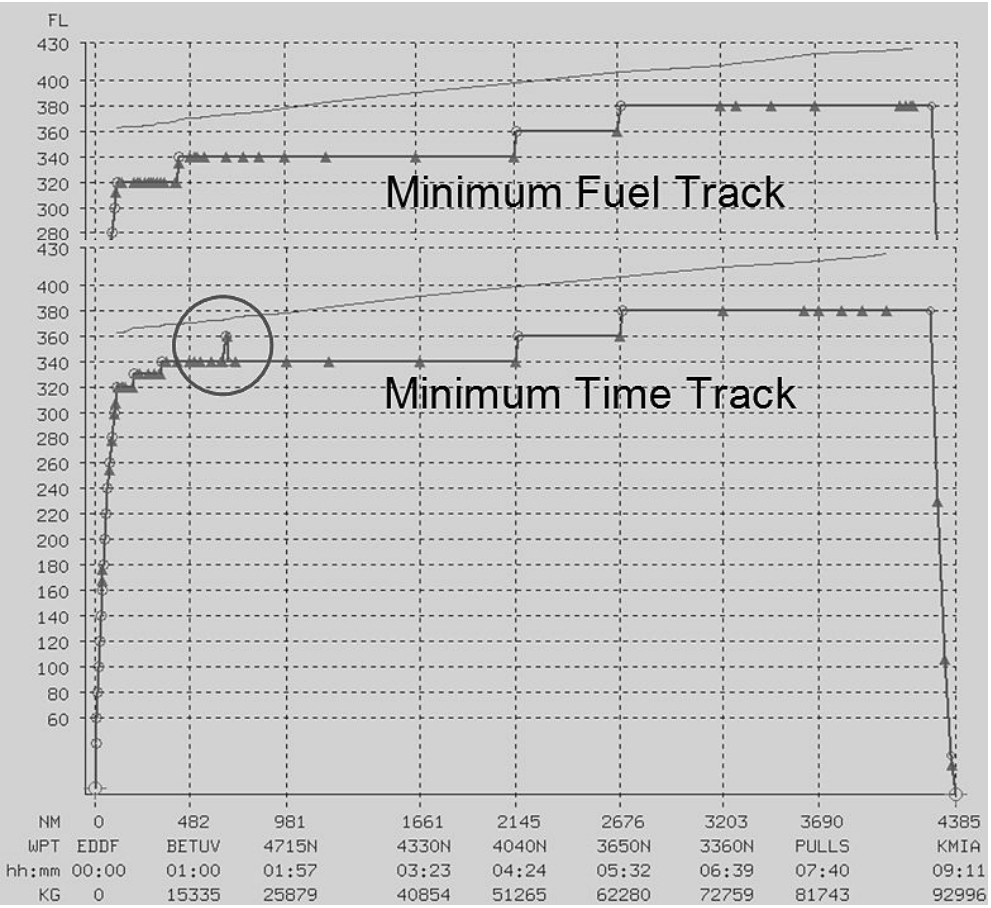


Abbildung 52: Flug Frankfurt – Miami vom 21. August 2007; Minimum Fuel Track (MFT) verglichen mit Minimum Time Track (MTT).[93]

[93] Lufthansa.

ROUTE	MFT/R	MTT/R
OFP NO	1	2
REG	DABTK	DABTK
CRUISE	VRBL	VRBL
TRIP	92759	92996
TTIME	0911	0911
ETA	1712	1712
COSTS	66762	65430
CONT	3365	3373
CONT POL	CONT20M	CONT20M
ALTN	KFLL	KFLL
AFUEL	2062	2062
HOLDING	3901	3901
PLNTOF	102087	102332
P EXTRA	44345L	44337L
DIST	4364	4385

Abbildung 53: Analyse des Fluges Frankfurt – Miami vom 21. August 2007; OFP No 1 ist der MFT, OFP No 2 ist der MTT. TTIME = Zeit, TRIP = Treibstoff in Kilogramm.[94]

Der MFT weist in diesem Beispiel (Abbildung 53) typischerweise einen geringeren Treibstoffverbrauch (TRIP) bei identischer Zeit (TTIME) auf (zu erwarten wäre eine kürzere Zeit, jedoch findet eine Rundung auf Minuten statt und es handelt sich hier um einen kleinen Ausschlag), und ist zudem auch kürzer betreffend der Distanz (DIST). Eher untypisch ist, dass die Kosten (COSTS) für den MFT jedoch über jenen des MTT liegen. Diese Differenz begründet sich in den unterschiedlichen ATC Gebühren. In Abbildung 54 und im Anhang C.II ist genauer zu sehen, dass der MFT über den Luftraum von Grossbritannien führt, weshalb dort höhere Flugsicherungsgebühren resultieren.

[94] Lufthansa.

Abbildung 54: Flug Frankfurt – Miami, 21. August 2007; blaue Linie = MTT, schwarze Linie = MFT.[95]

Die Optimierung des Wertes *AirwOpt* ist etwas aufwändiger, da dafür keine Referenzstrecken bestehen. Die Software berechnet aus diesem Grund auf dem Netzwerk von Luftstrassen die kürzeste Wegstrecke, wiederum unter MFT Bedingungen. In dieser Berechnung fallen die örtlichen Restriktionen weg und es wird die Annahme getroffen, dass sämtliche existierenden Luftstrassen und Strukturen der Flugsicherung genutzt werden können.

Für die Optimierung des Wertes *FreeGrid* werden freie Optimierungsbedingungen (Systemeingabe FO, FE) angenommen und ein MaxFactor von 1.05 gewählt[96]. Darunter versteht man eine komplett freie Streckenwahl auf einer Free Flight Basis. Einzige Restriktion stellt die Auflösung des Rasters (Grid) dar.

4.5.2 Algorithmus für die Optimierung: Dijkstra Algorithmus

Die Software verwendet für die freie Optimierung innerhalb eines Rasters den Dijkstra Algorithmus. Der niederländische Informatiker Edsger W. Dijkstra erfand diesen Algorithmus 1959. Der Dijkstra Algorithmus gehört zur Klasse der gierigen Algorithmen und berechnet die kürzeste Distanz von einem Ausgangspunkt bis zu

[95] Lufthansa
[96] weitere Angaben dazu im Kapitel 4.5.2.

einem definierten Endpunkt. Für die Berechnung werden gewichtete Kantenlängen in einem Netzwerk von Knoten benutzt.
Im Wesentlichen ist das Vorgehen so, dass jede Verbindung von Kanten als Summe im Endpunkt kurzzeitig gespeichert wird. Jede Kante entspricht einem Zahlenwert, entsprechend ihrer Distanz (Gewichtung). Die aktuell geringste Summe (also die kürzeste Strecke) wird um das nächste (kürzeste) Kantenstück erweitert. Nach dieser Erweiterung wird erneut evaluiert, welches die geringste Summe ist, und an diesem Punkt wird das wiederum kürzeste Stück angehängt. So ist gewährleistet, dass immer nur jeweils an der kürzesten Verbindung (ausgedrückt durch die geringste Kantensumme) weiter gearbeitet wird. Trifft eine Verbindung auf einen Knoten, der bereits über einen anderen Weg erreicht wurde, so wird der Pfad nur weitergeführt, wenn der neue Weg eine kürzere Verbindung dahin darstellt als der bereits vorhandene.[97] Ein sehr anschaulicher Verweis auf eine animierte Darstellung im Internet[98] stellt hier eine Möglichkeit zum besseren Verständnis dar.

Bei der Ermittlung des kürzesten Weges werden meist zusätzliche Restriktionen in Form von geographischen Zusatzinformationen berücksichtigt, um den Rechenaufwand zu reduzieren.[99] Sonst könnte ein Weg theoretisch in jede Richtung weitergeführt werden, bis der direkte Weg endlich ans Ziel gelangt, obwohl von Beginn weg klar war, dass man bei vielen Möglichkeiten „in die falsche Richtung“ geht.
Die Grid-Workstation von Lido berücksichtigt dies dadurch, dass eine so genannte *target area* festgelegt wird, in welcher sich der kürzeste Weg befinden muss. Diese vordefinierte Zielzone verläuft in einer Ellipse entlang der Great Circle Verbindung zwischen Start- und Zielflughafen.

[97] http://www.uni-stuttgart.de/.
[98] http://www.cs.sunysb.edu/.
[99] http://algo2.iti.uni-karlsruhe.de/.

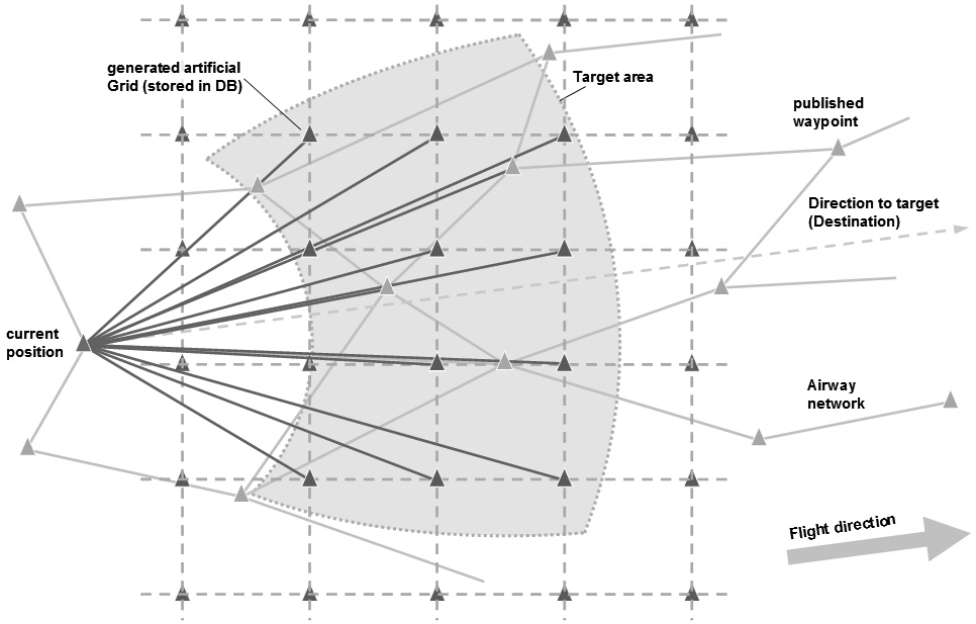
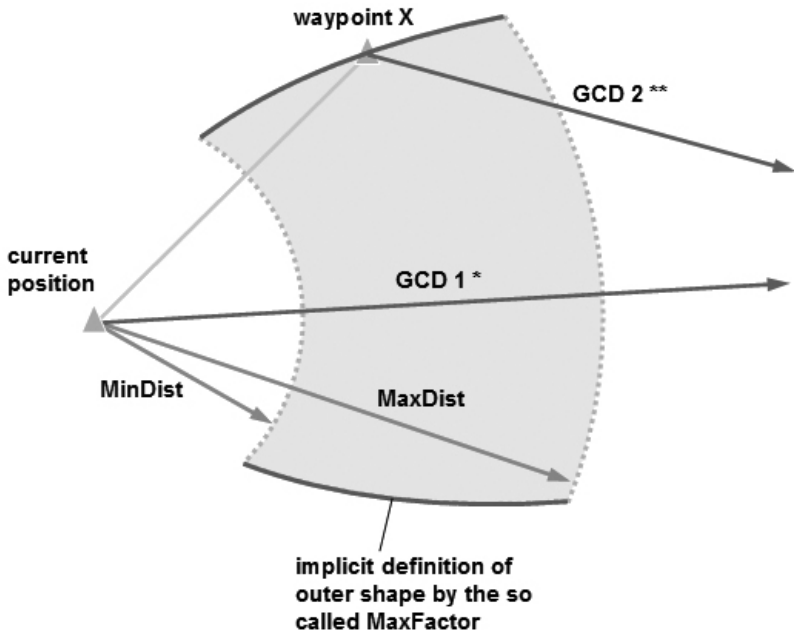


Abbildung 55: Target Area für die Berechnung des Dijkstra-Algorithmus.[100]

Der Dijkstra Algorithmus rechnet wegen der target area „in die richtige Richtung". Mathematisch wird für die Bestimmung der target area ein so genannter *Max Factor* verwendet und eine Minimal- (*MinDist*) und Maximaldistanz (*MaxDist*) definiert. Diese Parameter werden für jeden Luftraum einzeln gesetzt und damit für jede Teilregion einzeln definiert. Ausgehend von der aktuellen Position bestimmt ein Minimal- und ein Maximalradius die Distanz von der aktuellen Position, während der Max Factor das Kreissegment ausschneidet, welches von Interesse ist (graue Kreissequenz in Abbildung 55). Ein beliebiger Punkt (Waypoint X) wird dann für die weitere Berechnung als relevant betrachtet, wenn die Grosskreisdistanz zwischen diesem Punkt und der Destination (GCD 2 in Abbildung 56) kleiner als (oder gleich gross wie) die Grosskreisdistanz der gesamten Strecke mal einen fest zu legenden Faktor (GCD 1 Mal MaxFactor in Abbildung 56) ist.

[100] Powerpoint: Grid-Workstation.



* Great circle distance between the current position and the target position, which is in most cases the Destination

** Great circle distance between a potential gridpoint and the target position, which is in most cases the Destination

```
if GCD 2 > MaxFactor * GCD 1 THEN
   do not consider waypoint X
else
   consider waypoint X
```

Abbildung 56: Max Factor, MinDist und MaxDist für die Berechnung des Dijkstra-Algorithmus[101]

Ein Schritt für Schritt erklärendes Beispiel zum Dijkstra-Algorithmus befindet sich im Anhang C.IV.

4.6 Vergleiche der Werte

Die drei in der Studie ermittelten Werte führen beim Vergleich miteinander zu diversen Aussagen. Es ist wichtig, diese unterschiedlichen Erkenntnisse der einzelnen Vergleiche zu verstehen und deren Aussage richtig zu interpretieren.

[101] Grid-Workstation Powerpoint, Lido

4.6.1 *CurRoute* versus *AirwOpt*

Der Vergleich zwischen dem Wert *CurRoute* und dem Wert *AirwOpt* lässt eine Aussage über das **Ausmass der Restriktionen** in einem bestehenden System von Luftstrassen zu. Einerseits versteht man darunter Restriktionen, welche primär zum Ziel haben, die Verkehrsflüsse zu regeln und ein optimales Über- und Nebeneinander von verschiedenen Flugzeugen zu garantieren. Solche Reglementierungen verhindern, dass ein Flugzeug durch ein ungünstiges belegen eines Luftraumes beispielsweise im Steig- oder Sinkflug den Luftraum für sämtliche weiteren Teilnehmer blockiert.
Andererseits versteht man unter Restriktionen den Ausschluss von einem bestimmten Luftraum. Solche Ausschlüsse können politischer Natur sein, beispielsweise darf ein neutrales Land möglicherweise von gewissen Armeeflugzeugen nicht überflogen werden, oder der Grund kann technischer Natur sein, indem ein Flugzeug eine vorgeschriebene technische Ausrüstung (beispielsweise Navigationsgeräte: FANS etc., oder Ausrüstung für Notfälle: z.B. Sauerstoffversorgung) nicht mitführt. In extremen Fällen können auch Flugzeuge von gewissen Lufträumen aus Sicherheitsgründen komplett ausgeschlossen werden, wie dies die Schwarze Liste der EU vorsieht[102]. Dies ist bei Lufthansa selbstverständlich nicht der Fall.
Die Betrachtung der Differenz zwischen CurRoute und AirwOpt untersucht den Effekt, den ein Fallenlassen der Restriktionen auf dem in seiner Form unveränderten Netz von Luftstrassen hätte.

4.6.2 *AirwOpt* versus Free*Grid*

Wenn man die beste Lösung in den bestehenden Strukturen (*AirwOpt*) mit einer theoretischen, hindernisfreien (Free Flight) Welt (Free*Grid*) vergleicht, so ergründet man im Wesentlichen die Effizienz des bestehenden Netzes von Luftstrassen. Liegen diese Werte sehr nahe beieinander, so ist das heutige System der Luftstrassen effizient, während eine grosse Abweichung der beiden Werte darauf hindeutet, dass fehlende Strukturen zu ineffizienten Flugrouten führen. Die Betrachtung fokussiert auf den Unterschied zwischen einem restriktionslosen (und damit optimalen) heutigen System und den Möglichkeiten einer Free Flight Welt.
Dieser Vergleich ist aus heutiger Sicht rein theoretischer Natur, da die Einführung eines Free Flight Systems weder absehbar noch konkret geplant ist.

[102] http://ec.europa.eu/.

4.6.3 *CurRoute* versus *FreeGrid*

Aus dem Vergleich von heute geflogenen Strecken (optimiert aus einer Auswahl, *CurRoute*) und theoretisch möglichen Flügen entlang eines optimalen Flugweges (*FreeGrid*) ergibt sich das volle Potenzial, welches Free Flight gegenüber dem heutigen Zustand bringen würde. Der Logik folgend setzt sich dieser Wert aus den beiden vorherigen Werten zusammen. Mit anderen Worten lässt sich das volle Optimierungspotenzial in zwei heute die Effizienz mindernde Hauptursachen, Restriktionen und Netzwerk von Luftstrassen, aufteilen.

4.6.4 Verschiedene Vergleiche

Der Vergleich von Werten findet im Rahmen dieser Studie grundsätzlich auf zwei Arten statt. Einerseits werden *absolute Werte* miteinander verglichen, andererseits wird eine *relative Betrachtung* gemacht.
Beim Vergleich der absoluten Werte wird die Aussage gewonnen, wie gross die Differenz zwischen den einzelnen Werten in Flugminuten ist. Dabei wird nicht berücksichtigt, wie lang die Strecke ist. Es ist nahe liegend, dass auf einer besonders langen Strecke die Wahrscheinlichkeit einer grossen Differenz grösser ist als bei einer kürzeren Strecke. Die durchschnittlichen hier betrachteten Flugzeiten betragen zwischen 4 Stunden und 17 Minuten (FRA-THR) und 12 Stunden und 6 Minuten (SIN-FRA). Die längste Strecke ist damit knapp drei Mal länger als die kürzeste. Wenn nun auf beiden Strecken dieselbe Zeitdifferenz ermittelt wird, so ist das Potenzial auf der kürzeren Strecke relativ betrachtet wesentlich höher. Die relative Betrachtung ist denn auch die zweite Form des Vergleichs. Bei der relativen Betrachtung wird die Zeitdifferenz als Anteil an der Gesamtflugzeit dargestellt, wobei stets der grössere Wert (CurRoute beim Vergleich CurRoute mit FreeGrid, AirwOpt beim Vergleich von AirwOpt und FreeGrid) als 100% gilt. Dies wurde so festgelegt, um den Bezug zur heutigen Situation herzustellen und entspricht der Logik, dass eine Veränderung der Situation stets vom heutigen Zustand aus gehen wird und somit die längere Flugzeit die Basis der Überlegung darstellt. In anderen Studien wird jeweils die kürzeste Verbindung als 100% gewählt, was einer anderen Perspektive entspricht, nämlich jener der *Route Extension* Betrachtung. Als prominenter Vertreter für dieses Vorgehen gilt EUROCONTROL. Es liegt auf der Hand, dass dort grössere prozentuale Werte entstehen, da der Bezugswert kleiner ist.
Im Wesentlichen ist es jedoch die Frage nach dem Blickwinkel, welche für oder gegen ein Verfahren entscheidet. In der vorliegenden Studie wurde der Blickwinkel in Übereinstimmung mit Lufthansa von der heutigen Situation aus gewählt.

Für eine Fluggesellschaft bedarf die relative Betrachtung jedoch einiger Erläuterungen, da zunächst nur eine Verbesserung der Flugzeiten in absoluten Werten tatsächlich die gewünschte Kosten- und Emissionsreduktion bringt. Ob diese Minuten nun auf einer langen oder kurzen Strecke eingespart wird, interessiert auf den ersten Blick nur marginal. Interessant ist diese Differenzierung aber dennoch, wenn man bedenkt, dass eine Verkürzung der Flugzeit gegen Ende eines 12 Stunden Fluges nicht nur jene Menge an Treibstoff einspart, welche an diesem Endsegment nicht benötigt wird, sondern auch jene Menge Treibstoff und damit Kosten, welche für den Transport dieser zusätzlichen Menge Treibstoff bis zu deren Verbrauchsort angefallen wären. Der Transport einer zusätzlichen Tonne Treibstoff (reicht in etwa für 6 Minuten Flugzeit bei einem Verbrauch von 10 Tonnen pro Stunde)[103] kostet auf einem 11 Stunden Flug etwa 233 US$ an reinen Transportkosten.[104] Der genaue zusätzliche Treibstoffverbrauch für Gewichtserhöhungen wird in jedem Flugplan standardmässig berechnet, und beträgt zwischen 20% und 60% (für extreme Langstrecken mit mehr als 12 Flugstunden) auf den untersuchten Flügen. Im Anhang finden sich die Beispiele für Frankfurt - Teheran (plus 202 kg Treibstoff für 1 Tonne zusätzliche Fracht/ Treibstoff/ Passagiere) und Osaka – Frankfurt (plus 509 kg pro zusätzliche Tonne). Eine Flugverlängerung am Ende des Fluges um 6 Minuten kostet also auf der Strecke Osaka – Frankfurt insgesamt 1,509 Tonnen Treibstoff, wobei davon zum Zeitpunkt des Gebrauchs bereits 0,509 Tonnen verbraucht worden sind. Bei Abkürzungen auf der Flugroute können also maximal 60% Treibstoff zusätzlich zum gesparten Treibstoff für das Abfliegen dieses Segmentes eingespart werden. Aus dieser Überlegung ist es interessant zu wissen, ob der zusätzliche Treibstoff nach 11 Flugstunden oder nach 3 Flugstunden benötigt bzw. eingespart werden kann.[105]

Aus dem relativen, also prozentualen Vergleich der aktuellen Gesamtflugzeit (*CurRoute*) mit dem Optimum auf bestehenden Luftstrassen (*AirwOpt*) resultiert ein Wert, der in Relation zur zurückgelegten Distanz (gemessen in Zeit) steht. Bei der absoluten Betrachtung der Differenz in Flugminuten lässt sich erkennen, wie viel die absolute Zeitdifferenz unabhängig von der Länge des Fluges beträgt. Dies sollte man sich bei der Betrachtung der nun folgenden Resultate stets vor Augen halten.

Eine Addition der beiden Teil-Differenzen kann bei relativer Betrachtung nicht dasselbe Resultat ergeben, wie die relative Gesamtdifferenz, da die Basis der prozentualen Ausdrucksweise nicht dieselbe ist.

[103] Siehe Anhang C.V.
[104] Siehe Anhang C.VI.
[105] Siehe Anhang C.VI.

4.7 Resultate

Die folgenden Diagramme wurde alle als Resultat einer Microsoft Excel basierten Auswertung erstellt. Die Originaldaten befinden sich im Anhang[106]. In einem ersten Schritt wurden sämtliche Daten aus den ermittelten Flugzeitenblättern in diese Excel Datei übertragen. Ein Beispiel für die Ausgangsdaten in Papierformat befindet sich im Anhang.[107] Alle Zeitwerte wurden übertragen und anschliessend die Differenzen, Mittelwerte und relativen Anteile ermittelt. Dargestellt werden für die Resultate nur die Mittelwerte, welche sich aus mindestens sieben Tagen oder vier Quartale Berechnungen ergeben. Einzelne Werte können vor allem bei der tageweisen Betrachtung den Mittelwert beeinflussen, wobei das Gewicht höchstens ein Siebtel beträgt.
Es werden zuerst die absoluten Vergleiche dargestellt, anschliessend die relativen Vergleiche.

4.7.1 Absolute Zeitvergleiche

Das folgende Beispiel (Abbildung 57) zeigt die drei Werte *CurRoute*, *AirwOpt* und *FreeGrid* aus der Excel Tabelle, welche für alle anschliessenden Berechnungen verwendet wurden. Die Werte werden in Flugminuten für jede einzelne Beobachtung (hier 7 Tage im Juli und August 2007) festgehalten.

[106] siehe Anhang C.VI.
[107] siehe Anhang C.VII.

DEN-FRA	CurRoute	AirwOpt	FreeGrid
29.07.	518	514	509
30.07.	523	520	518
31.07.	519	515	513
01.08.	511	510	508
02.08.	517	512	509
03.08.	520	518	516
04.08.	527	526	523

Mittelwert	**519.3**	**516.4**	**513.7**
Min	511	510	508
Max	527	526	523
Spannweite	16	16	15
Median	519	515	513
Summe	3635	3615	3596

Abbildung 57: Flug Denver – Frankfurt, ermittelte Flugzeiten in Minuten. Die untere Hälfte wertet die oben stehenden 7 Werte aus.

Eine graphische Darstellung dieses Beispiels vereinfacht eine Vergleichbarkeit der Werte (Abbildung 58):

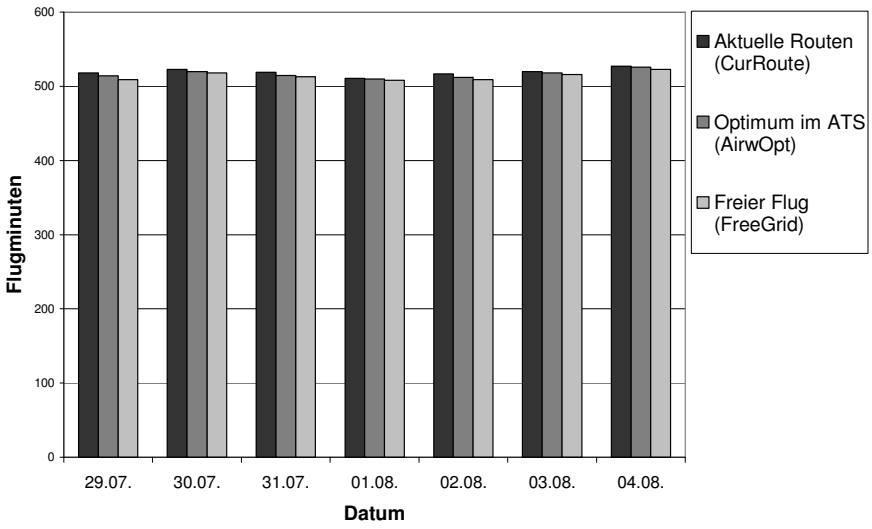


Abbildung 58: Flug Denver – Frankfurt, graphische Darstellung der ermittelten Flugzeiten in Minuten.

Auffallend ist, dass die Differenzen zwischen den ermittelten Werten klein sind. So klein, dass die graphische Betrachtung kaum eine Aussage über das Ausmass der Differenzen zulässt. Aus diesem Grund wurden in der folgenden Abbildung 59 die Differenzen zwischen den drei Werten (wiederum in Flugminuten) ermittelt:

DEN-FRA	CurRoute-AirwOpt	CurRoute-FreeGrid	AirwOpt-FreeGrid
29.07.	4	9	5
30.07.	3	5	2
31.07.	4	6	2
01.08.	1	3	2
02.08.	5	8	3
03.08.	2	4	2
04.08.	1	4	3
	CurRoute-AirwOpt	**CurRoute-FreeGrid**	**AirwOpt-FreeGrid**
Mittelwert	**2.9**	**5.6**	**2.7**
Min	1	3	2
Max	5	9	5
Spannweite	4	6	3
Median	3	5	2
Summe	20	39	19

Abbildung 59: Flug Denver – Frankfurt im Juli/ August 2007, ermittelte Differenzen (absolut) zwischen den Flugzeiten. Die untere Hälfte wertet die oben stehenden 7 Werte aus.

Eine graphische Darstellung der Differenzen ergibt folgendes Bild (Abbildung 60):

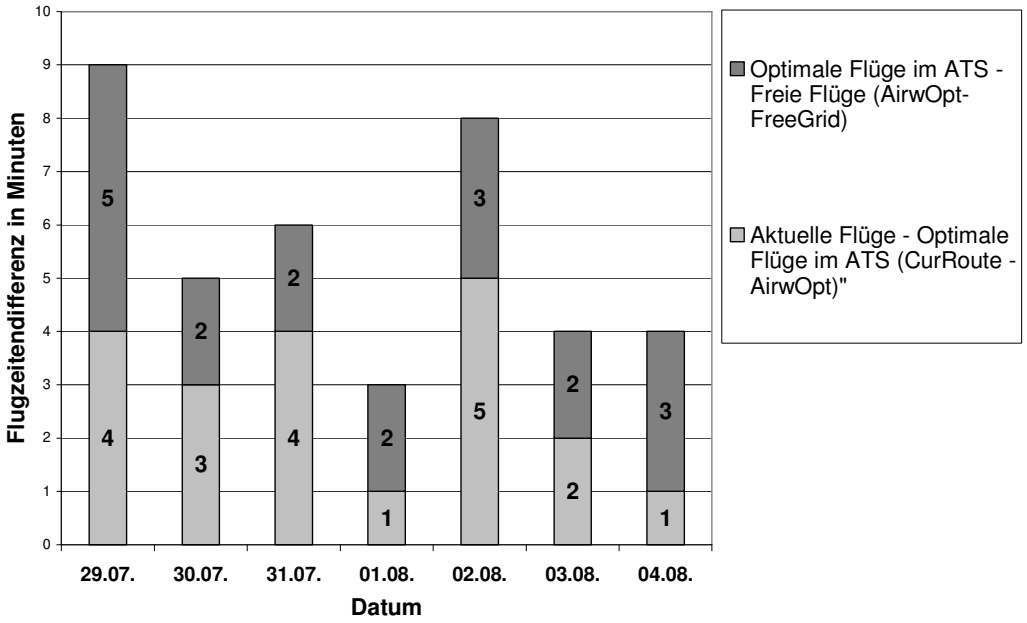


Abbildung 60: Flug Denver – Frankfurt, Total sowie Aufteilung der Differenz nach Restriktionen (AirwOpt – FreeGrid) und Mangel an Luftstrassen (CurRoute – AirwOpt) der Flugzeiten. Alle Angaben in Flugminuten.

In Abbildung 60 sind sowohl die Differenzen zwischen Aktuellen Routen (CurRoute) und dem Optimum im ATS (AirwOpt) dargestellt (hellgrau), als auch die Differenzen zwischen dem Optimum im ATS (AirwOpt) und einem Freien Flug

(FreeGrid, dunkelgrau). Die Summe der beiden und damit die gesamte Säulenhöhe drückt die Gesamtdifferenz zwischen dem heutigen Zustand und einer theoretischen Welt mit Freien Flügen aus (CurRoute – FreeGrid). Die Gesamtdifferenz schwankt im Beispiel zwischen drei und neun Minuten, während der Anteil der Restriktionen auf den ATS Strecken (hellgrau) im Schnitt etwa gleich viel an der Gesamtdifferenz ausmacht wie der Anteil der Mangel an Luftstrassen. (dunkelgrau).

4.7.1.1 Einfluss der Restriktionen auf die Flugzeit

Es folgt nun in Abbildung 61 eine Rangliste sämtlicher 34 Flüge, welche den Einfluss der Restriktionen auf dem bestehenden System von Luftstrassen auf die Flugzeit aufzeigt. Die dargestellte Differenz ergibt sich aus dem Wert Aktuelle Routen (CurrRoute) minus den Wert Optimum im ATS (AirwOpt).

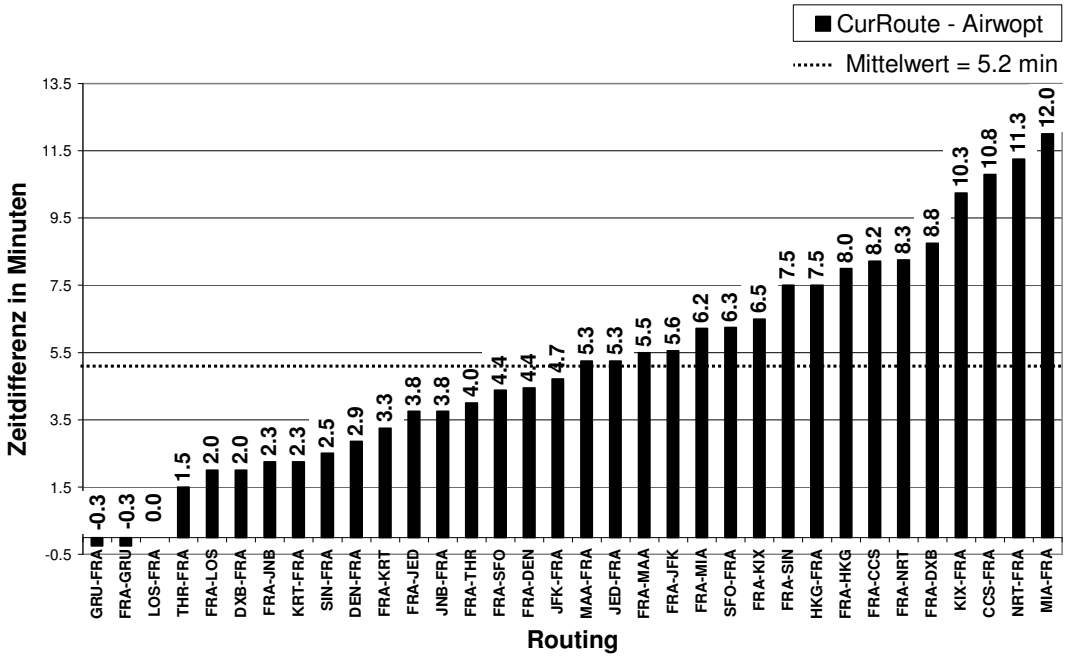


Abbildung 61: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz in Minuten, Aktuelle Routen (CurRoute) gegenüber Optimum im ATS (AirwOpt).

Extremwert stellt die Strecke Miami – Frankfurt mit 12.0 Minuten dar. Bei dieser Strecke geht der MFT häufig in den nördlichen Bereich des Nordatlantiks, um den Rückenwind auszunutzen. Naturgemäss liegen hier auch die veröffentlichten ATS-Routen (NAT Tracks). Wegen der südlichen Lage von Miami aber hat der MTT die Tendenz, quer zum System der Luftstrassen und in diese hinein zu verlaufen. Das ist aber nicht planbar und deshalb können die ATS-Routen ein Hindernis für die

Planung darstellen. Der Flug wird dann südlich der Routen geplant oder auch auf dem südlichsten Track. Um den für den Flug günstigsten Track nutzen zu können muss der Weg ungefähr entlang der Ostküste geplant werden, um dann von Westen in das Routen-System einfliegen zu können. Jede der Optionen geht aber auf Kosten einer längeren Flugzeit.
Der *Minimalwert* betrifft die Strecken Sao Paulo – Frankfurt sowie Frankfurt – Sao Paulo und beträgt mit -0.3 Minuten einen negativen Wert. Dies scheint auf den ersten Blick ein Widerspruch zu sein, da ja die Restriktionen zu einer Verlängerung der Flugzeiten führen sollten und somit der Wert *AirwOpt* ohne diese Restriktionen geringer sein sollte. Eine genauere Betrachtung dieser typischen Südatlantik Verbindung zeigt, dass die bestehenden Strukturen auf dieser Strecke kaum Restriktionen erfahren und somit bereits ideal genutzt werden können. Die negative Differenz ergibt sich aus einem Höhenprofil als Ergebnis einer Restriktion, die dazu zwingt, zeitweise tiefer und damit schneller zu fliegen als es wünschenswert wäre, weil der Treibstoffverbrauch dabei steigt.

4.7.1.2 Einfluss der ATS Struktur auf die Flugzeit

Es folgt eine Rangliste aller 34 Flüge, welche den Einfluss der Anordnung von Luftstrassen, sowie deren Verbindungen, auf die Flugzeit in Abbildung 62 aufzeigt. Die Frage untersucht, ob neue Luftstrassen bzw. Free Flight die Flugzeit wesentlich verkürzen könnten. Die dargestellte Differenz ergibt sich aus dem Wert Optimum im ATS (AirwOpt) minus den Wert eines Freien Fluges (FreeGrid). Die vier auffallenden *Maximalwerte* sind alle Vertreter der Fernost Strecken zwischen Frankfurt und Hong Kong sowie zwischen Frankfurt und Osaka. Von den zehn Werten über dem Mittelwert sind acht Vertreter der Fernost Strecken. Aus dieser Erkenntnis lässt sich ableiten, dass die Struktur der Luftstrassen auf den überflogenen Gebieten in Richtung Ferner Osten sowie in den Regionen des Fernen Ostens selbst noch nicht optimal ausgestaltet ist. Betroffen davon sind primär die Länder Russland und China. Russland ist erst seit wenigen Jahren in einem mehr oder weniger konstruktiven Kontakt mit den weltweiten Luftverkehrs Organisationen sowie mit einzelnen Fluggesellschaften. Die kommunistischen Strukturen haben Jahrzehnte lang einen echten Dialog zwischen den Benutzern des Luftraumes (AOs) und der Flugsicherung (ANSP) bzw. dem russischen Staat verhindert. Zudem sind die technischen Hilfsmittel der russischen Flugsicherung mit wesentlichen Mängeln behaftet und nicht selten geschieht die Sicherung des Luftraumes „von Hand“. Daraus resultieren überdurchschnittliche Longitudinal-staffelungen von bis zu 20 Minuten. Flugstrecken werden in Russland noch heute vielfach über NDBs konstruiert, sodass grundsätzlich nur Streckenabschnitte

zwischen diesen Navigationshilfen existieren und damit über Wasser (Kara Meer und Laptev Meer) keine Verbindungen möglich sind.

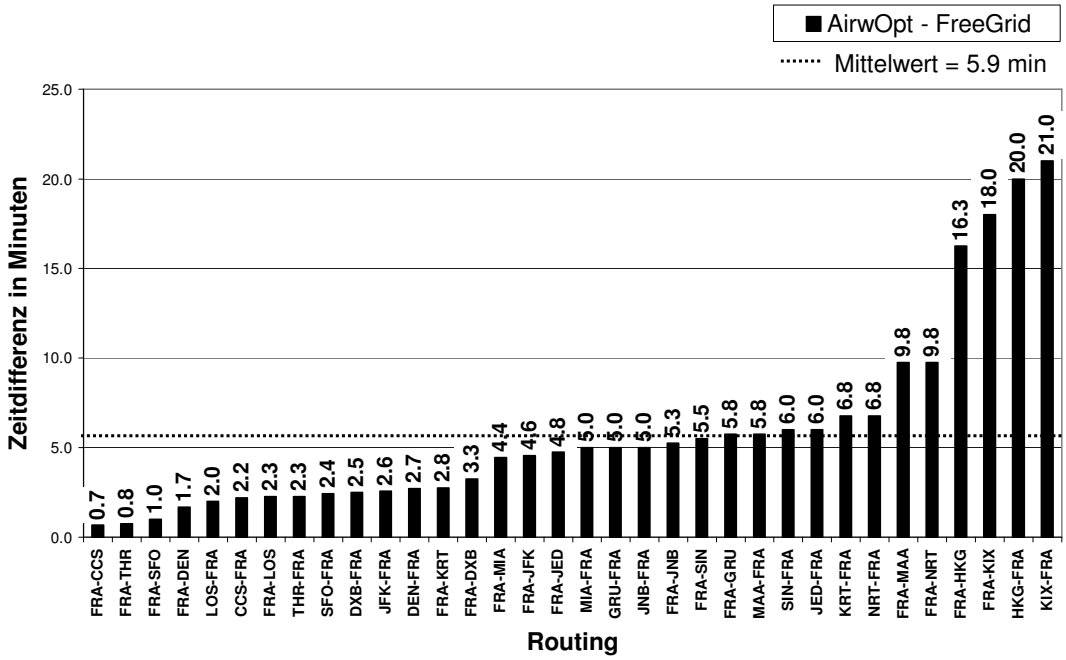


Abbildung 62: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz in Minuten, Optimum im ATS (AirwOpt) gegenüber Freien Flügen (FreeGrid).

Vorschläge für neue Strecken finden bei der russischen Flugsicherung erst seit wenigen Jahren Gehör, aber die Umsetzung steht auf einem völlig anderen Blatt und ist aus technischen, organisatorischen und finanziellen Gründen im besten Fall langfristig zu erwarten. Mittlerweile wurde zwar erkannt, dass sich damit viel Geld verdienen lässt, jedoch ist die gesamte Infrastruktur in einem derart schlechten Zustand, dass Veränderungen aus den genannten Gründen grosse Probleme bereiten. Es gibt in weiten Teilen des Streckennetzes keine Radar Überwachung und damit keine Möglichkeit, mit den vorhandenen Mitteln ein dichteres Netz von Luftstrassen einzurichten. Ein weiteres Problem ist die Macht der Militärs, welche in Russlang, aber in noch stärkerem Masse in China über den Luftraum bestimmen und somit stets ihre Zustimmung für Veränderungen geben müssen, selber aber kaum Interesse an einer solchen Freigabe haben.
Die Flugrouten nach Hong Kong, Osaka und Tokio führen über weite Gebiete Russlands und bei Flügen nach Hong Kong auch über chinesisches Territorium. Die folgende Karte zeigt die Problematik nicht verfügbarer Strukturen in nördlichen Regionen Russlands inklusive Sibirien am Beispiel des Fluges Osaka - Frankfurt:

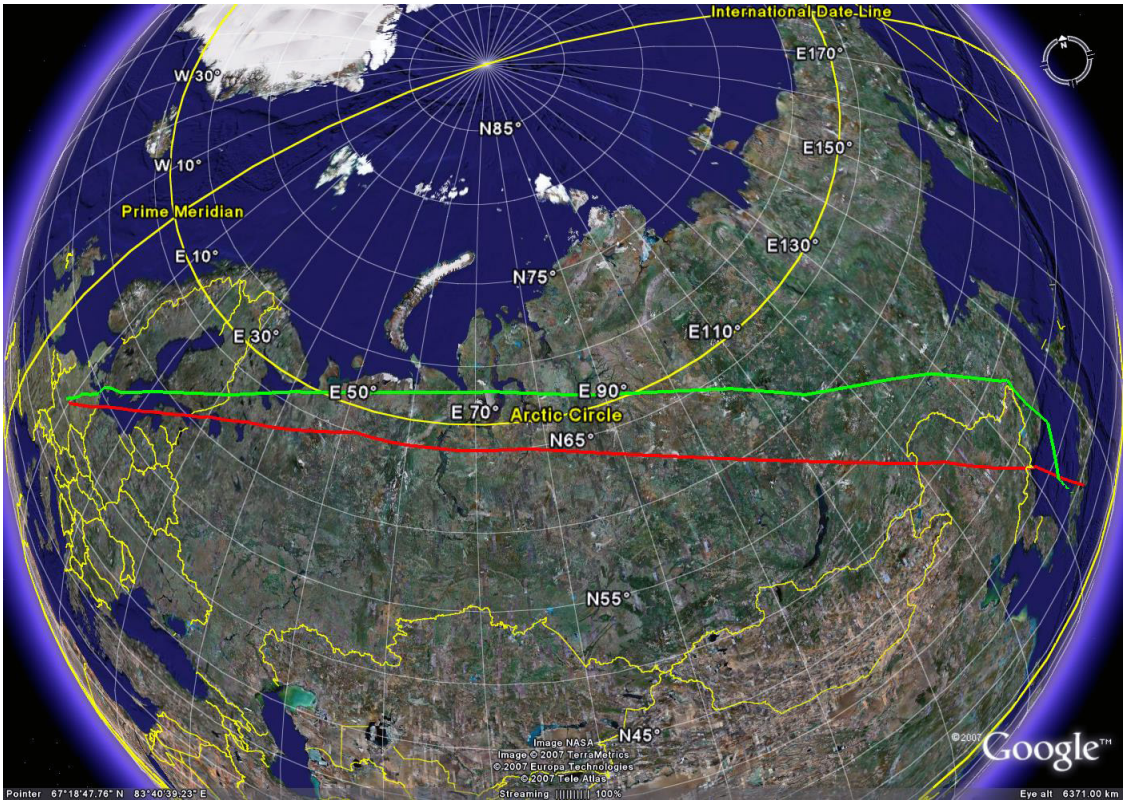


Abbildung 63: Flug Osaka – Frankfurt, grün = Optimum im ATS (AirwOpt), rot = Freier Flug (FreeGrid).[108]

Auffallend ist auf den ersten Blick, dass der optimale Flugweg im ATS-Netzwerk um China herum führt. Es ist daher notwendig, die dort herrschenden Verhältnisse genauer zu betrachten. Wie die folgende Abbildung 64 verdeutlicht, gibt es im Bereich von Nordchina keine passenden Transitrouten, sodass der Flugweg um den Luftraum von China herum geführt werden muss. Ein Ausweichen auf die kürzere, südlichere Transitroute macht aus zwei Gründen keinen Sinn: Erstens führt diese direkt in den Jetstream hinein, was die Flugzeit wesentlich verlängert. Zum anderen nützt eine südliche Route nur dann etwas, wenn sie gut an die folgenden russischen Transitrouten angeknüpft ist. Dies ist nicht der Fall, da die russischen Transitrouten im fraglichen Bereich grundsätzlich Ost – West verlaufen, während der optimale Track (FreeGrid) eine wesentliche Nordkomponente hat, also gewissermassen quer zu den vorhandenen Strecken verläuft. Hier bietet sich deshalb keine Alternative. Dies wird in der Abbildung 65 weiter unten deutlich. Auch die optimale Strecke im ATS wechselt nach Möglichkeit auf eine parallele, nördlichere Route.

[108] Darstellung in Google Earth.

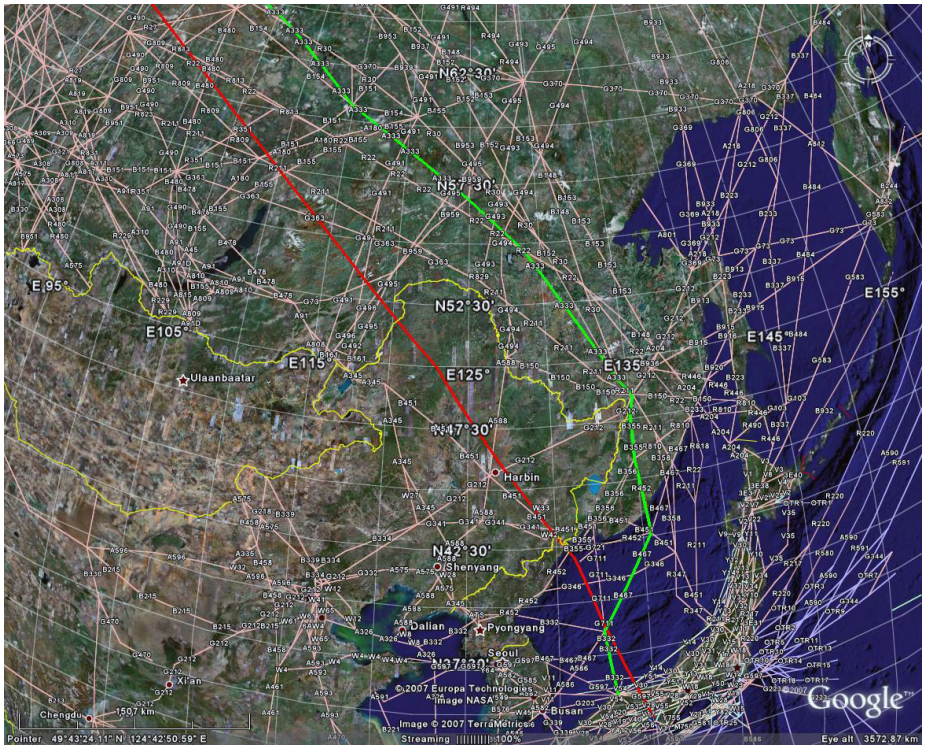


Abbildung 64: Flug Osaka – Frankfurt, grün = Optimum im ATS (AirwOpt), rot = Freier Flug (FreeGrid), rosa = Luftstrassen, gelb = Landesgrenzen.[109]

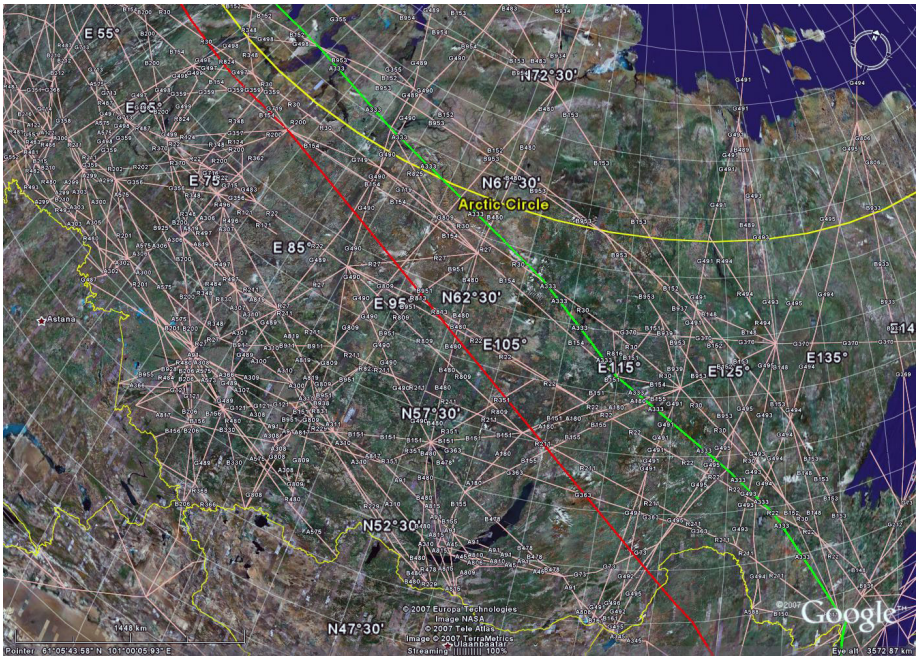


Abbildung 65: Flug Osaka – Frankfurt, dargestellt in Google Earth, grün = Optimum im ATS (AirwOpt), rot = Freier Flug (FreeGrid), rosa = Luftstrassen, gelb = Landesgrenzen.[110]

[109] Darstellung in Google Earth.
[110] Darstellung in Google Earth.

Minimalwerte in der Abbildung 62 sind die Strecken Frankfurt – Caracas, Frankfurt – Teheran, Frankfurt – San Francisco und Frankfurt – Denver, alle mit weniger als zwei Minuten Differenz zwischen dem schnellsten Weg auf den bestehenden ATS Strukturen und einem Freien Flug. Insbesondere die Strecken in den Mittleren Westen (DEN) und an die Westküste (SFO) der USA sind bekannt dafür, dass sie weitgehend frei geplant werden können. Während die Strecken in den Westen der USA nördlich der NAT Tracks verlaufen, führt der Flug Frankfurt – Caracas über eine Route südlich der Tracks, was ebenfalls Planungsfreiheit bedeutet.

4.7.1.3 Gesamter Einfluss auf die Flugzeit

Die folgende Rangliste aller 34 Flüge zeigt in Abbildung 66 auf, welchen Einfluss die Restriktionen und die Gestaltung des ATS zusammen gezählt auf die Flugzeit haben. Die dargestellte Differenz ergibt sich aus dem Wert Aktuelle Routen (CurRoute) minus den Wert eines Freien Fluges (FreeGrid). Im Wesentlichen ist diese Betrachtung die Summe der beiden vorherigen Betrachtungen. Sie zeigt auf, welche Strecken insgesamt das grösste Potenzial für Zeiteinsparungen aufweisen, wenn man Free Flight als Benchmark für die Evaluation heutiger Flüge wählt, und auf welchen Strecken bereits effizient geflogen wird.

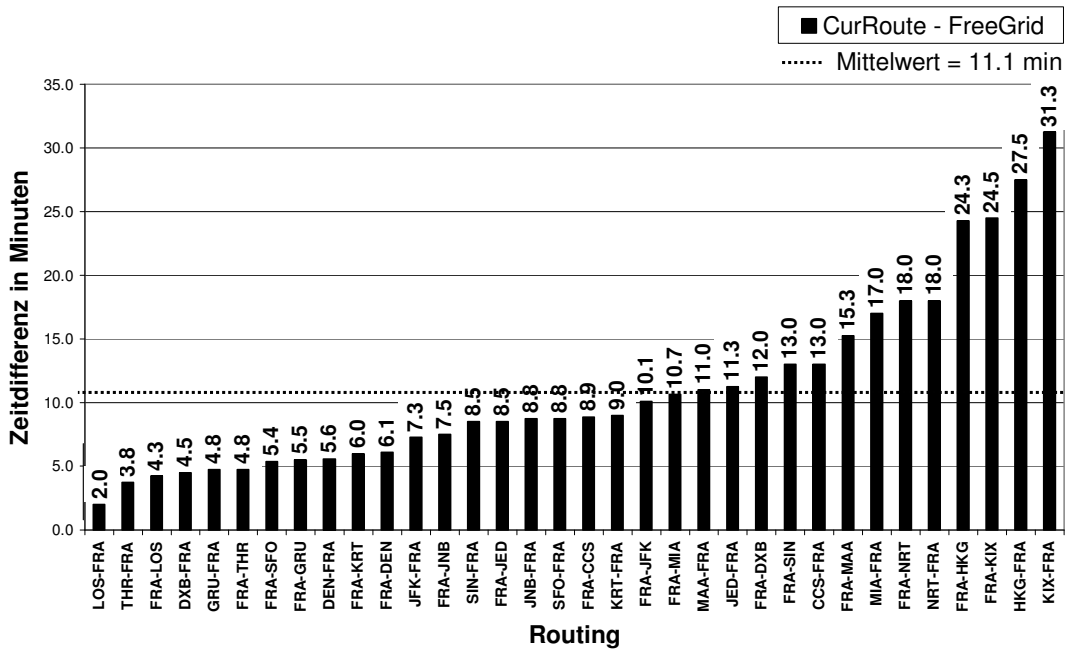


Abbildung 66: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz in Minuten, Aktuelle Routen (CurRoute) gegenüber Freien Flügen (FreeGrid).

Für die *Extremwerte* findet hier gewissermassen eine Wiederholung der Erkenntnisse aus dem vorherigen Kapitel statt: Die Strecken zwischen Frankfurt und Osaka sowie zwischen Frankfurt und Hong Kong weisen mit Abstand die grössten Zeitdifferenzen zwischen heute geflogenen Routen und solchen, die in einer theoretisch freien Welt möglichen wären.

Für die Strecke Lagos - Frankfurt zeigt die Abbildung 66 den *Minimalwert* von gerade mal zwei Minuten, während auch die Strecken Teheran – Frankfurt (3.8 Minuten), Frankfurt – Lagos (4.3 Minuten), Dubai – Frankfurt (4.5 Minuten), Sao Paulo – Frankfurt (4.8 Minuten) und Frankfurt – Teheran (4.8 Minuten) allesamt eine Differenz von weniger als fünf Minuten aufweisen. Während die Ziele Teheran (eastbound 257 Minuten, westbound 281 Minuten), Lagos (southbound 344 Minuten) und Dubai (westbound 358 Minuten) Flugzeiten unter 6 Stunden aufweisen, ist die Strecke Sao Paulo – Frankfurt mit 10 Stunden 56 Minuten (656 Minuten) rund doppelt so lang bei gleichem Potenzial. Dies wirft die Frage der relativen Differenz, bezogen auf die Streckenlänge, auf, welche im folgenden Kapitel behandelt wird.

Vorerst interessant ist aber noch die Darstellung der gesamten Differenz, aufgeteilt in Restriktionen und Routendesign (Abbildung 67).

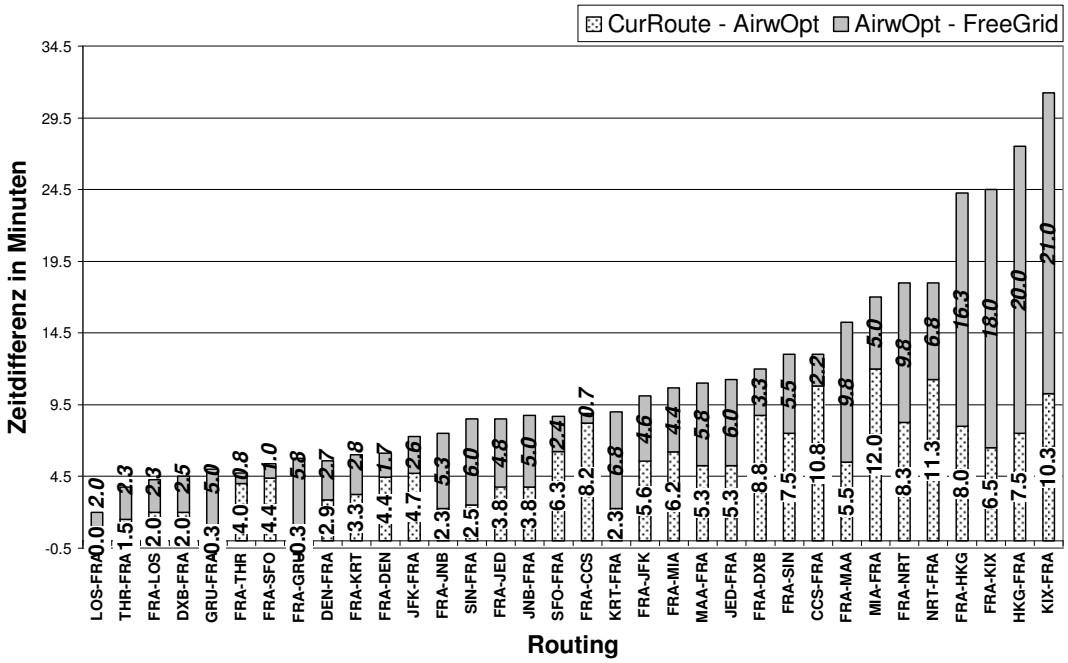


Abbildung 67: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz, Anteile an der Gesamtdifferenz. Restriktionen (CurRoute – AirwOpt) und Fehlende Strukturen (AirwOpt – FreeGrid).

Die vorgängig gemachten Kommentare zu den einzelnen Strecken lassen sich hier bestätigen. Die Abbildung 67 zeigt deutlich, dass jene Strecken mit der grössten Differenz (Osaka, Hong Kong, Tokio) ein prägendes Defizit bei der Struktur und Anordnung der Luftstrassen haben. Die dunkelgrauen Säulenwerte stellen dieses Übergewicht an Differenz AirwOpt minus FreeGrid graphisch eindrücklich dar.

4.7.1.4 Gesamter Einfluss auf die Flugzeit nach Flugregionen

Im Folgenden wird der Fokus auf die einzelnen Flugregionen gerichtet. In der untenstehenden Abbildung 68 wird die ungleiche Verteilung der Differenzen über den Globus deutlich:

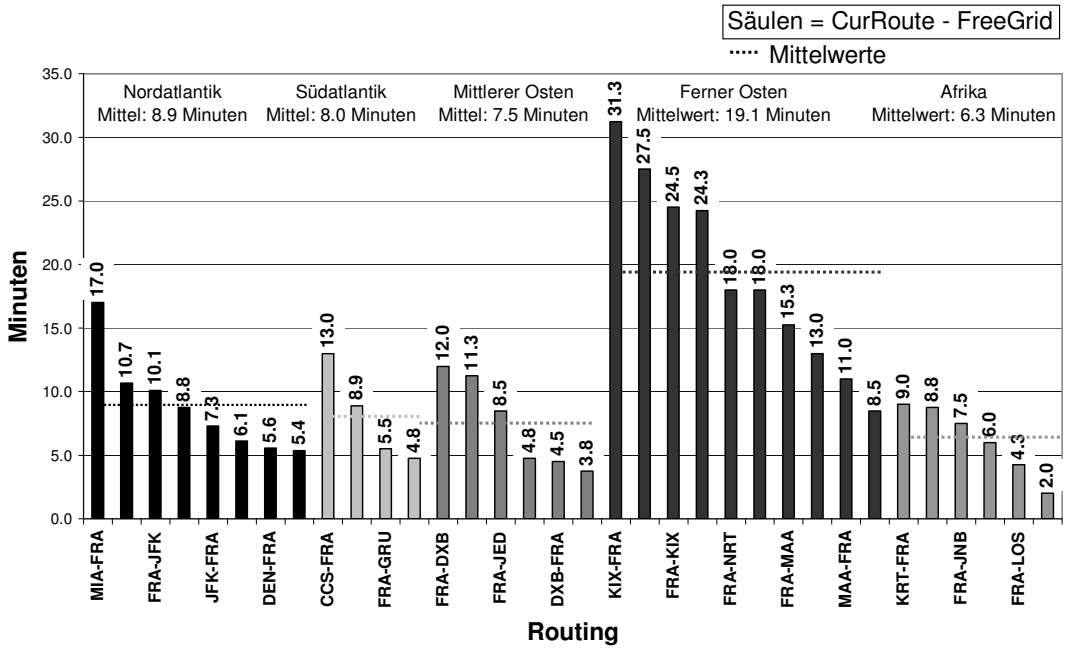


Abbildung 68: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz nach Flugregionen.

Neu sichtbar sind in Abbildung 69 die Mittelwerte pro Flugregion:

Gesamtabweichung nach Flugregionen (in Flugminuten)

	CurRoute-AirwOpt	AirwOpt-FreeGrid	CurRoute-FreeGrid
Afrika	2.3	4.0	6.3
Nordatlantik	5.8	3.0	8.9
Südantantik	4.6	3.4	8.0
Mittlerer Osten	4.2	3.3	7.5
Ferner Osten	7.3	11.9	19.1

Minimum
Maximum

Abbildung 69: Gesamtabweichung (absolute Differenz der Flugzeiten in Flugminuten) nach Flugregionen.

Der Ferne Osten steuert sämtliche Maximalwerte bei, während Afrika insgesamt (CurRoute – FreeGrid) sowie bei den Restriktionen (CurRoute – AirwOpt) die geringsten Differenzen und der Nordatlantik bei der Struktur der Luftstrassen (AirwOpt - FreeGrid) den geringsten Wert aufweist.
Auffallend ist auch hier wieder, dass insbesondere der Ferne Osten mehrere deutlich ineffiziente Flugstrecken aufweist. Bei den Strecken des Nord- und Südatlantik wird der Mittelwert stets durch einen Extremwert (Nordatlantik: Miami – Frankfurt, Südatlantik: Caracas – Frankfurt) nach oben drückt.

4.7.1.5 Gesamter Einfluss auf die Flugzeit ohne Extremwerte

Bei der vorangehenden Betrachtung wurde festgestellt, dass einzelne Regionen einen erhöhten Mittelwert aufweisen, weil Extremwerte das Resultat beeinflussen. Aus diesem Grund findet im Folgenden eine Auswertung der Gesamtflugzeit nach Regionen ohne Berücksichtigung der höchsten und tiefsten Werte statt. Problematisch ist dabei, dass sich dann die Region Südatlantik aus Werten von nur noch zwei verschiedenen Destinationen zusammensetzt.

	CurRoute-AirwOpt	AirwOpt-FreeGrid	CurRoute-FreeGrid
Afrika	2.8	3.8	6.6
Nordatlantik	5.0	3.1	8.1
Südantantik	4.0	3.2	7.2
Mittlerer Osten	3.8	3.5	7.3
Ferner Osten	7.5	11.5	18.9

Minimum
Maximum

Abbildung 70: Gesamtabweichung (absolute Differenz der Flugzeiten in Flugminuten) nach Flugregionen, ohne Extremwerte.

Die Elimination der Extremwerte reduziert bei allen Regionen ausser Afrika den Mittelwert. Daraus lässt sich schliessen, dass die Auswertung der repräsentativeren Teilmengen ein günstigeres Bild für die meisten Regionen ergibt. Extremwerte haben in der vorliegenden Studie naturgemäss ihren Ursprung darin, dass die individuelle Lage einer Destination ungünstig sein kann oder örtliche Verhältnisse zu längeren Flugzeiten führen. Das ist aber eben normalerweise nicht spezifisch für die gesamte Region. Die folgende Abbildung 71 verdeutlicht den Effekt der Maximalwerte auf die Gesamtflugzeit:

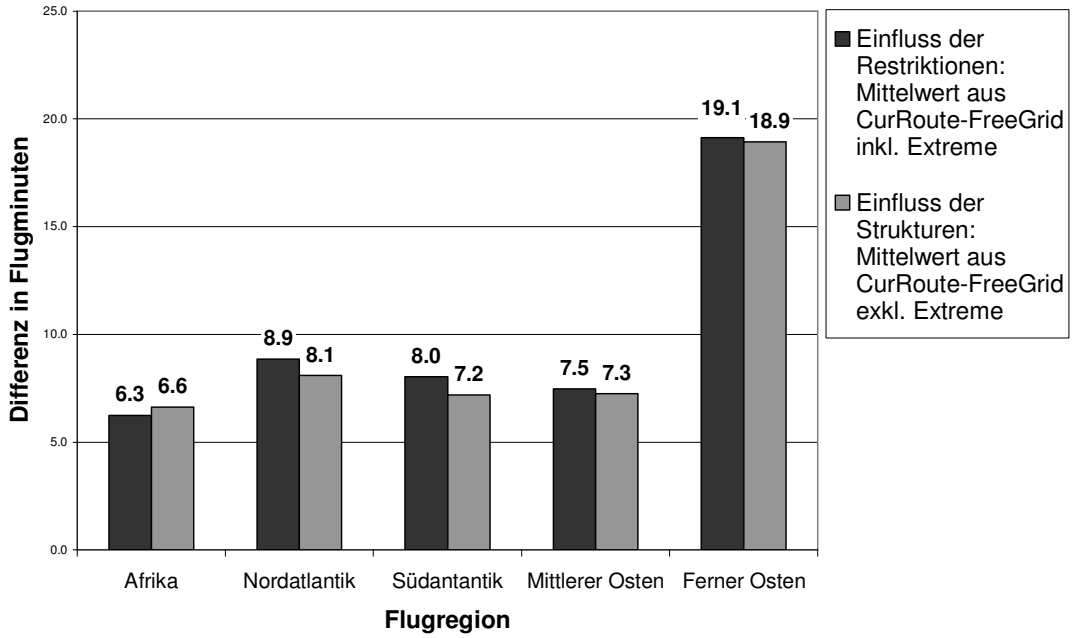


Abbildung 71: Absoluter Vergleich der Flugzeitendifferenz nach Flugregionen mit (dunkelgrau) und ohne (hellgrau) Extremwerte.

Das neue Bild veranschaulicht die Ergebnisse. Sämtliche Mittelwerte mit Ausnahme des Fernen Ostens liegen nun zwischen 6.6 und 8.1 Minuten. Der Ferne Osten mit 18.9 Minuten weist weit mehr als die doppelte Zeitdifferenz auf und ist somit klar jene Region, welche von einer Free Flight Welt am meisten profitieren würde.

4.7.2 Relative Zeitvergleiche

Die bisherige Betrachtung ging von absoluten Werten aus. Dabei interessierte die Frage, wie viele Minuten Differenz zwischen den ermittelten Werten liegt. Die nun folgende Betrachtung legt den Fokus auf Vergleiche, die in Relation zur gesamten

Flugzeit stehen. Diese Betrachtung hat den Vorteil, dass eine Berücksichtigung der zugrunde liegenden Distanz (in Form von Flugzeit) gemacht wird. Es ist nahe liegend, dass eine gleiche Zeitdifferenz bei unterschiedlichen Distanzen nicht den gleichen Schluss zulässt. So wirft eine identische Zeiteinsparung auf einer doppelten Streckenlänge ein wesentlich besseres Licht auf die längere Strecke, da auf derselben Distanz wie die kürzere Strecke proportional betrachtet nur die hälfte der Differenz entstehen würde. Die Öffentlichkeit interessiert sich in der Regel auch eher für relative Zahlen, da sie mit den absoluten Flugzeiten wenig vertraut ist. Eine relative Angabe scheint verständlicher und darunter kann sich die Mehrheit etwas vorstellen. Eine Fluggesellschaft auf der anderen Seite interessiert sich weit mehr für die Einsparung von realen Flugminuten und nicht Prozenten. Das Verhältnis zwischen Gesamtkosten eines Fluges und der einzelnen Minute spielt allerdings auch eine Rolle, denn Mehrkosten aufgrund von Umwegen haben bei kurzen Strecken wegen des geringeren Ertrages unter Umständen eine grössere wirtschaftliche Bedeutung (s. auch 1.6.4). Wichtig ist bei der relativen Betrachtung stets, dass der Bezug zu den dahinter verborgenen, absoluten Werten nicht vergessen wird. Dies wird am Ende dieses Abschnittes erläutert.
Es wird im Weiteren auf einen detaillierten Kommentar zu den einzelnen Strecken verzichtet, da diese Diskussion bereits im Kapitel Absolute Flugzeiten stattfand. Kommentare werden jedoch dort angefügt, wo klare Abweichungen zur absoluten Betrachtung auftreten.
Die durchschnittliche Flugzeit sämtlicher betrachteter Flüge beträgt 9 Stunden und 6 Minuten (546 Minuten). Bei der relativen Betrachtung weisen kurze Flüge tendenziell höhere, lange Flüge aber eher tiefere Werte in der relativen Auswertung auf, wenn die ermittelte Differenz ähnlich ist.

4.7.2.1 Einfluss der Restriktionen auf die Flugzeit

Der relative Vergleich der Werte Aktuelle Routen (*CurRoute*) und Optimum im ATS (*AirwOpt*) geschieht auf der Basis der Aktuellen Routen als 100%. Die Differenz wird dann als Anteil dieser 100% ausgedrückt, der aufgrund von Restriktionen im bestehenden ATS-System entsteht. Die folgende Darstellung (Abbildung 72) listet alle 34 Flugstrecken aufsteigend nach ihrem Anteil an der Zeitdifferenz durch Restriktionen auf.

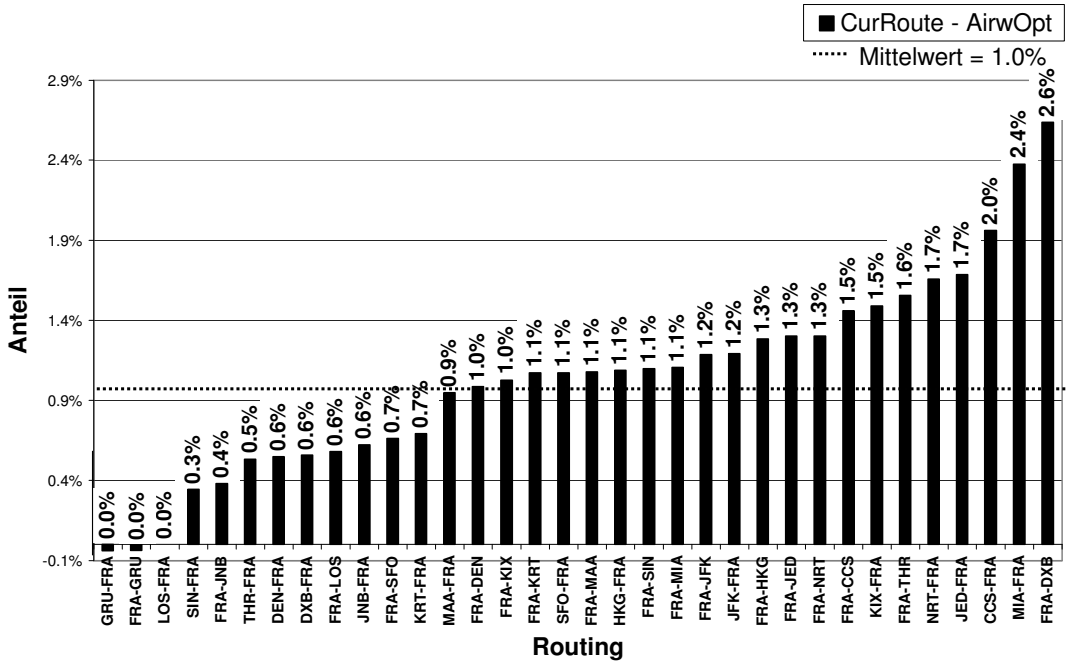


Abbildung 72: Relativer Vergleich der Flugzeitendifferenz, Aktuelle Flugrouten (CurRoute) gegenüber dem Optimum im ATS (AirwOpt).

Der *Extremwert* Frankfurt – Dubai erklärt sich aus der Tatsache, dass zum Zeitpunkt der Datenerfassung der Irak aus Sicherheitsgründen umflogen wurde (was allerdings inzwischen wieder anders bewertet und gehandhabt wird). Strecken zum bzw. aus dem Mittleren Osten sind Strecken, welche aufgrund Ihrer verhältnismässig kurzen Flugzeit bei relativer Betrachtung die grössten Differenzen aufweisen. Caracas – Frankfurt hatte wegen temporärer Restriktionen (militärische Sperrgebiete) im karibischen Lufttraum ungünstige Flugzeiten. Die Strecke Singapur – Frankfurt, ein Vertreter der Fernost Strecken, schneidet bei relativer Betrachtung noch besser ab als bei der bereits guten absoluten Betrachtung, und zählt zu jenen Strecken, welche kaum durch Restriktionen beeinflusst wird. *Minimalwert* bleibt auch hier die Strecke zwischen Sao Paulo und Frankfurt.

4.7.2.2 Einfluss der Struktur des ATS auf die Flugzeit

Die folgende Auflistung der 34 Flugstrecken (Abbildung 73) zeigt die relative Differenz zwischen dem Optimum auf ATS (AirwOpt) und einem Freien Flug (FreeGrid). Als 100% gilt der Wert AirwOpt, die Differenz zwischen den beiden Werten wird dann in Prozent von AirwOpt ausgedrückt. Die Rangliste zeigt auf,

welche Strecken mehr und welche weniger von fehlenden (mangelhaften) Strukturen des ATS betroffen sind.

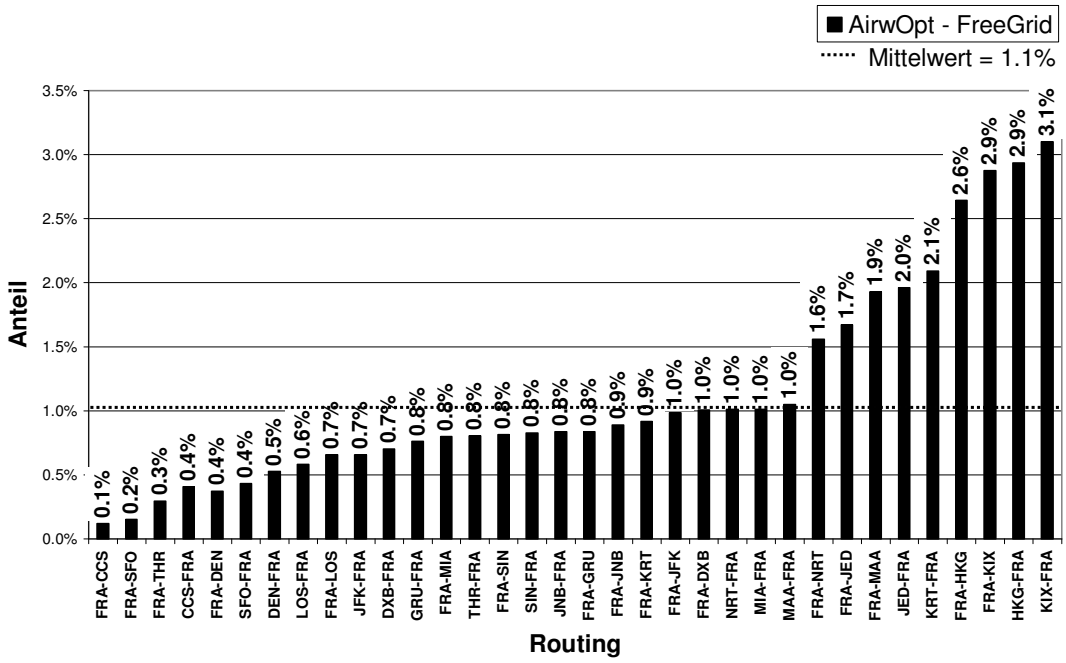


Abbildung 73: Relativer Vergleich der Flugzeitendifferenz, Optimum im ATS (AirwOpt) gegenüber Freien Flügen (FreeGrid).

Der Maximalwert steht abermals für die Strecke Osaka – Frankfurt mit über 3%, gefolgt von Hong Kong – Frankfurt sowie die jeweils umgekehrten Flugrichtungen dieser Städtepaare. Neu figurieren die Strecken Khartoum – Frankfurt, Jeddah – Frankfurt und Frankfurt – Madras unter den höchsten Werten, alles eher kurze bis mittlere Streckenlängen. Bemerkenswert ist, dass unter den *Minimalwerten* die transatlantischen Strecken von und nach San Francisco, Denver und Caracas sechs der geringsten sieben ausmachen. Dies bestätigt das Bild, dass die Strukturen über den Ozeanen sehr effizient ausgelegt sind bzw. die Planungsfreiheit sehr gross ist. Die Strecke Frankfurt – New York fällt jedoch erstaunlich ab und liegt nur gerade im durchschnittlichen Bereich. Bei der Strecke Miami – Frankfurt ist die Differenz nochmals grösser und damit zu erklären, dass die Miami Route eine Strecke in der Mitte des Atlantiks befliegt, welche nicht ideal mit Flugrouten (NAT orientiert sich an den nördlichen Destinationen der Ostküste) ausgestattet ist.

4.7.2.3 Gesamter Einfluss auf die Flugzeit

Eine Gesamtbetrachtung der 34 Destinationen beruht auf dem Vergleich Aktueller Routen (CurRoute) mit Freien Flügen (FreeGrid). Die Differenz wird als Anteil an CurRoute (=100%) ausgedrückt und stellt die Summe der vorgängig dargestellten *Restriktionen* und *Strukturen des ATS* dar (Abbildung 74). Wichtig ist dabei jedoch, dass eine exakte Verrechnung nicht möglich ist, da die Basis der relativen Betrachtung der vorgängigen Werte nicht dieselbe war.

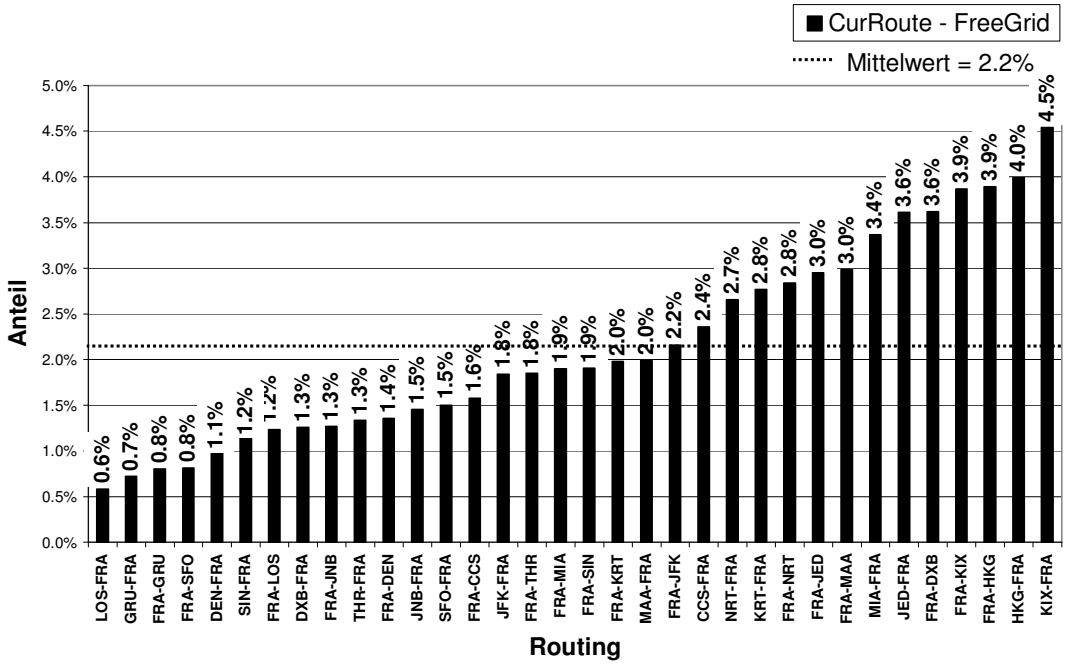


Abbildung 74: Relativer Vergleich der Flugzeitendifferenz, Gesamte Differenz (Aktuelle Routen, *CurRoute,* gegenüber Freien Flügen, *FreeGrid*).

In der Abbildung 74 sieht man keine wesentlichen Veränderungen gegenüber der Abbildung 66. Eine Verschiebung findet in Abhängigkeit von den Flugzeiten statt, die *Maximalwerte* bleiben jedoch bei den bekannten Fernost Destinationen. Sie rücken in der relativen Darstellung jedoch deutlich dichter an die Strecken des Mittleren Ostens (Frankfurt – Dubai und Jeddah – Frankfurt) heran. Der *Minimalwert* gilt auch bei relativer Betrachtung für die Strecke Lagos – Frankfurt. Die Strecken von und nach Sao Paulo, San Francisco, Denver und Johannesburg gehören zu jenen mit den geringsten Differenzen. Ebenfalls weit vorne liegt mit der Strecke Singapur – Frankfurt ein bekannt günstiger Vertreter aus Fernost. Das Beispiel Frankfurt – Dubai im Vergleich mit Dubai – Frankfurt zeigt, dass auf dieser Strecke für Hin- und Rückflug sehr ungleiche Bedingungen gelten, was durchaus nicht ungewöhnlich ist.

Interessant ist auch der Blick auf die Aufteilung der Gesamtdifferenz in die beiden vorgängig einzeln betrachteten Differenzen *Restriktionen* und *Struktur des ATS*:[111]

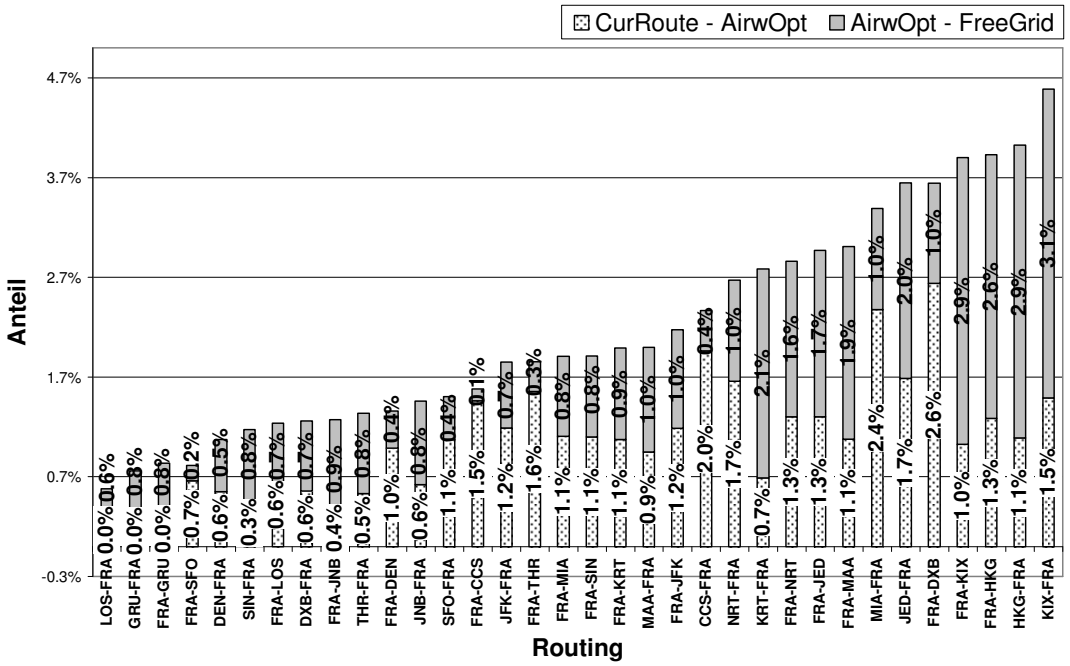


Abbildung 75: Relativer Vergleich der Flugzeitendifferenzen, Aufteilung der Differenz in Restriktionen (CurRoute – AirwOpt) und Strukturen (AirwOpt – FreeGrid).

4.7.2.4 Gesamter Einfluss auf die Flugzeit nach Flugregionen

In der folgenden Abbildung 76 wurden die Strecken nach deren Einteilung in Flugregionen zusammengefasst dargestellt sowie die Mittelwerte für die einzelnen Flugregionen ermittelt. Mit einem Mittelwert von 3.0% sind die Fernost Strecken auch in der relativen Darstellung jene Strecken mit der grössten Differenz zwischen Aktuellen Flügen (CurRoute) und Flügen in einer Freien Welt (FreeGrid). Die zweitgrössten Differenzen fallen im Mittleren Osten mit 2.4% an. Dies ist ein deutlicher Unterschied zur absoluten Betrachtung, was aber nicht überrascht, weil sich der absolute Betrag nun auf dieser relativ kurzen Strecke deutlicher bemerkbar macht. Die geringste Differenz weisen bei der relativen Betrachtung die Strecken des Südatlantiks mit 1.4% auf, dicht gefolgt von Afrika (1.5%) und Nordatlantik (1.7%).

[111] Der bekannte, marginale Unterschied der prozentualen Werte Restriktionen und Strukturen wurde hier vernachlässigt.

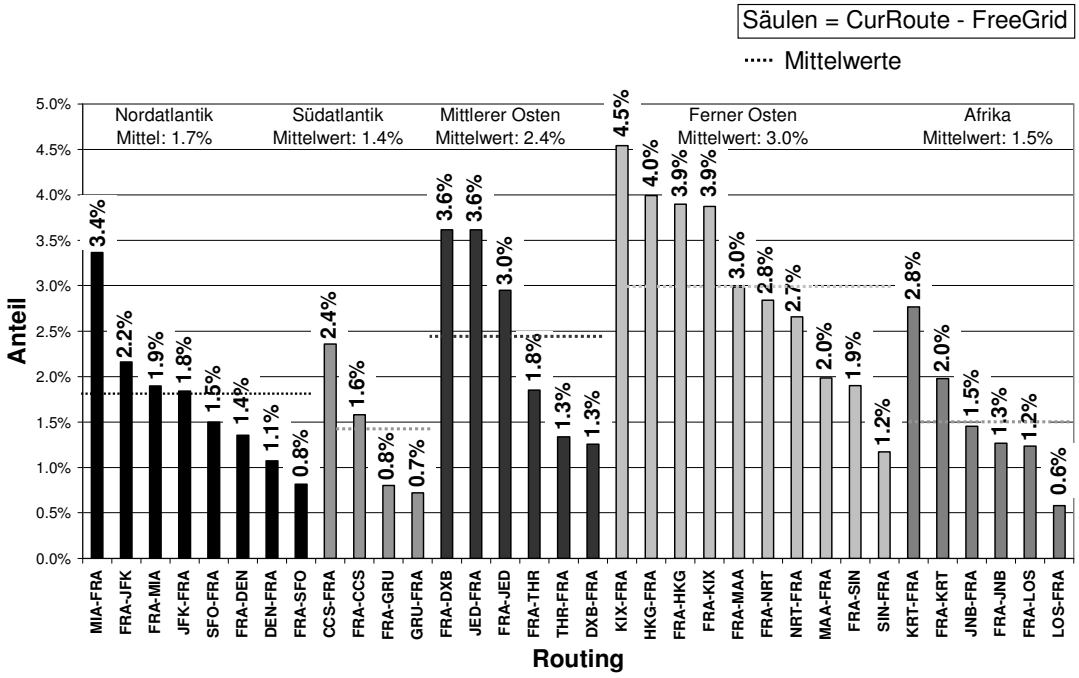


Abbildung 76: Relativer Vergleich der Flugzeitendifferenz, nach Flugregionen.

4.7.3 Zusammenfassung der Resultate

Der Vergleich der relativen mit den absoluten Ergebnissen zeigt eine gewisse Verschiebung der Schwerpunkte zwischen den Betrachtungsweisen. Dennoch haben beide ihre jeweiligen Vorzüge, wie bereits aufgezeigt wurde. Die relativen Resultate zeigen ein abgeschwächtes Bild vor allem bei den langen Fernost Strecken, wobei die vergleichsweise hohen Differenzen nicht ausser Acht gelassen werden sollten.

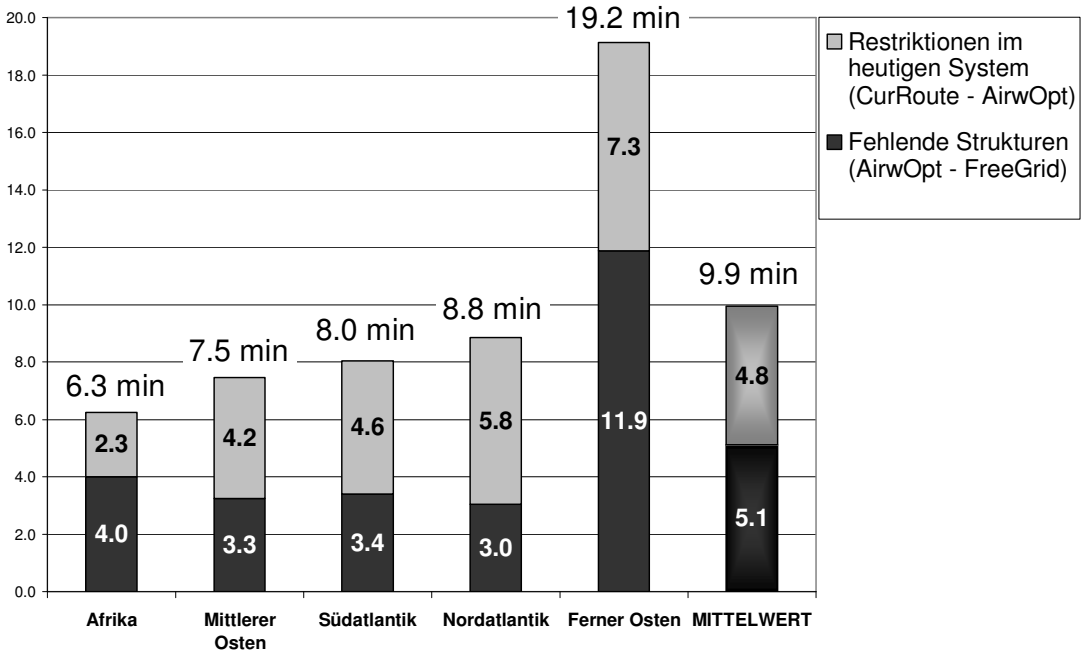


Abbildung 77: Absoluter Vergleich der Aufteilung der Differenz in Flugminuten, geordnet nach Flugregionen (Mittelwerte).

In der Abbildung 77 erkennt man nochmals deutlich die vergleichsweise grossen Differenzen der Flugrouten des Fernen Ostens. Während die Differenz für den Einfluss der Restriktionen im bestehenden ATS (CurRoute minus AirwOpt) vergleichsweise moderat ausfällt, ist die Differenz aufgrund fehlender Strukturen (AirwOpt minus FreeGrid) eher markant. Eine pauschale Aussage dieser Art ist jedoch mit Vorsicht zu geniessen, da beispielsweise die Strecke Singapur – Frankfurt mit einer Gesamtdifferenz von 1.2% (vgl. Abbildung 74) deutlich unter dem Durchschnitt für diese Region liegt. Die Probleme der meisten Fernost Strecken liegt jedoch klar in der mangelhaften Struktur der Luftstrassen, welche über Russland und China sehr ungünstig verlaufen oder gar nicht vorhanden sind. Die Strecken von und nach Singapur, Bangkok, Malaysia und weitere südliche Ziele sind von diesem Problem nicht betroffen, da die entsprechenden Flugrouten südlich des Himalajas und damit ausserhalb der chinesischen und russischen Lufträume verlaufen.

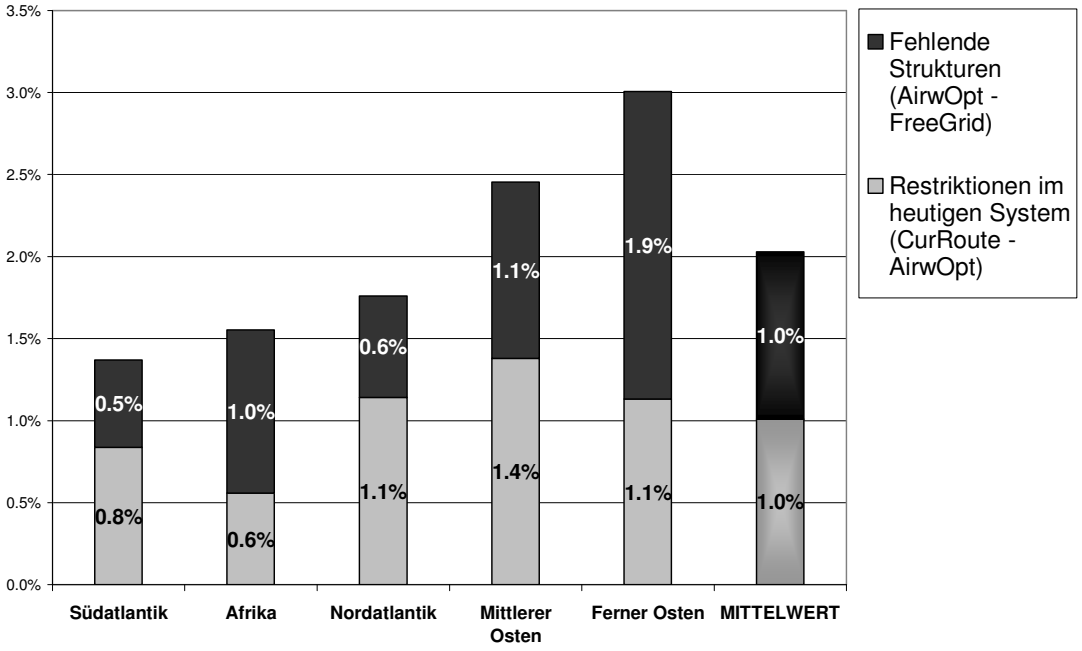


Abbildung 78: Relativer Vergleich der Aufteilung des Totals nach Flugregionen. Die Summe der beiden Prozentwerte ist wegen der abweichenden Berechnungsgrundlage nicht gleich der relativen Gesamtabweichung, was die Unterschiede zu anderen Darstellungen erklärt (marginale Differenz von bis zu 0.1%).

Interessant in Abbildung 78 ist, dass es bei der relativen Betrachtung zwei Gruppen gibt: Afrika, Südatlantik und Nordatlantik einerseits, sowie Mittlerer und Ferner Osten andererseits.

Die ozeanischen Strecken des Nord- und Südatlantik weisen sehr effiziente Strukturen gegenüber einer Free Flight Welt auf. Dies erstaunt nicht besonders, da über den Ozeanen keine störenden nationalen Grenzen oder daraus resultierende politische Störfaktoren bestehen.

Südatlantik weist insgesamt die effizientesten Werte auf, gefolgt von Afrika. Dass eine ozeanische Strecke am besten abschneidet, erstaunt nicht besonders. Die Länge der Strecken fällt bei der relativen Betrachtung zusätzlich ins Gewicht. Afrika an zweiter Stelle erstaunt im ersten Moment, ist jedoch durch die europäisch dominierte Gestaltung der Luftraumstruktur Afrikas erklärbar. So haben die Europäer die Gestaltung des Netzwerks von Luftstrassen in Afrika stark beeinflusst – und dabei darauf geachtet, dass stets optimale Luftstrassen auf dem Weg von und nach Europa eingerichtet wurden. In Afrika spielte der innerafrikanische Luftverkehr lange Zeit eine untergeordnete Rolle, so dass die Strukturen für die interkontinentalen (vorwiegend nach Europa) Routen optimal entwickelt wurden. Ganz anders stellt sich die Situation für eine Fluggesellschaft aus dem Nahen Osten dar (z.B. Emirates), welche nach Westafrika fliegen

möchte. Hier treten grosse Ineffizienzen auf Grund mangelnder Strukturen auf. Aus diesem Grund sind die Aussagen dieser Studie stets im Kontext zu sehen, dass nämlich hier aus der Sicht mitteleuropäischer Fluggesellschaften bewertet wurde.
Der Mittlere Osten bietet ein recht ungünstiges Bild beim Wechsel der Perspektive von der absoluten zur relativen Sichtweise. Während die absoluten Differenzen die zweit tiefsten Werte aufweisen, findet sich der Mittlere Osten bei einer relativen Betrachtung an der Stelle mit den zweit höchsten Werten. Dies erklärt sich dadurch, dass diese Strecken zu den kürzesten in dieser Studie gehören und somit am schlechtesten abschneiden bei einer relativen Betrachtung. Insgesamt kann dieses ambivalente Ergebnis auch als repräsentativ angesehen werden: Die Strecken in den Mittleren Osten sind grundsätzlich effizient angelegt. Politische Restriktionen aufgrund der zahlreichen Konflikte in dieser Region der Welt (Irak, Israel) führen aber immer wieder dazu, dass die Strukturen geändert bzw. mit Restriktionen belegt werden, worunter die Effizienz dann leidet.

Der Mittelwert aus den Mittelwerten aller Flugregionen führt zu einem Resultat von 2.2%[112] Ineffizienz. Dieses Resultat setzt sich 1%[113] Restriktionen und 1.1%[114] fehlenden Strukturen zusammen. Dies entspricht einer Betrachtung über alle Destinationen. Für eine Pauschalaussage zum weltweiten Zustand sollte jedoch nicht der Mittelwert aller 34 Flugstrecken ermittelt werden, da die 34 Werte keine gleiche Gewichtung pro Flugregion aufweisen und dies somit das Bild verzerren würde. In einer allgemeinen Betrachtung wurden die Mittelwerte der 5 Flugregionen-Mittelwerte ermittelt, wobei dann eine Annahme zugrunde liegt, dass sich die Verkehrsvolumen regelmässig auf diese 5 Regionen verteilen. Dies ist nicht der Fall, lässt hier aber eine von Verkehrsvolumen und der Anzahl berechneten Strecke losgelöste Aussage zu. Der Mittelwert beträgt in diesem Fall 2.0%[115]. Anteilsmässig fallen dabei 1.0%[116] Restriktionen und 1%[117] fehlende Strukturen an. Insgesamt resultiert ein Resultat mit einer Ineffizienz von rund einem Fünfzigstel.

[112] gerundet aus 2.154%
[113] gerundet aus 1.042%
[114] gerundet aus 1.124%
[115] gerundet aus 2.017%
[116] gerundet aus 1.009%
[117] gerundet aus 1.018%

4.8 Interpretation

Die erhaltenen Resultate decken sich weitgehend mit den langjährigen Erfahrungen von Lufthansa. Es ist in der Branche bekannt, dass die Fernost Strecken heute nicht optimal beflogen werden können, da fehlende Strukturen insbesondere in den Russischen und Chinesischen Lufträumen eine effiziente Streckenwahl zwischen Europa und Japan sowie zwischen Europa und China nicht erlauben.

Für eine Fluggesellschaft bedeuten die Werte aus dieser Studie eine Hilfe bei der Bewertung ihrer Flugstrecken. Jene Strecken mit grossen Ineffizienzen sollten genauer betrachtet und Verbesserungen angestrebt werden. Dabei sollte eine Fluggesellschaft ihre Ressourcen unter Berücksichtigung ihres Verkehrsaufkommens einsetzen: Die vorhandenen Ineffizienzen müssen mit der Anzahl Flüge auf der betreffenden Strecke multipliziert werden, um zu erkennen, welche Strecken mit Priorität „verbessert“ werden sollten. Das werden primär Strecken mit relativ grossen Ineffizienzen und gleichzeitig relativ hohen Flugfrequenzen sein.
Die Verifikation der Studie gestaltet sich schwierig, da es kaum vergleichbare Studien gibt. EUROCONTROL und die FAA untersuchen von Zeit zu Zeit das Thema Flight Efficiency, wählen dabei jedoch stets nur ihren Zuständigkeitsbereich, also den europäischen oder nordamerikanischen Luftraum dafür aus (vlg. Kapitel 3.7.1.2). So gibt es solche Studien fast nur für kontinentale Flüge in den erwähnten Verkehrsgebieten. Diese Tatsache zeigt auch auf, dass nur eine geringe Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Flugsicherungen weltweit besteht und somit eine Effizienz steigernde Harmonisierung der Standards und Abläufe einen weiten Weg gehen muss.
Ein Vergleich mit anderen Studien zu diesem Thema ist von grossem Interesse, da bei den Resultaten teils unterschiedliche Werte entstehen. Dies sollte eigentlich nicht so sein, da ja alle dieselbe Frage untersuchen. Die Unterschiede sind denn auch meistens durch verschieden getroffene Annahmen erklärbar.

4.8.1 Vergleich mit einer Studie von Swiss

Eine von der Abteilung Flight Dispatch bei Swiss International Air Lines durchgeführte Studie im Auftrag von Peter A. Kronenberg (First Officer bei Swiss International Air Lines) hat ein Potenzial von 6% Treibstoff- und 5% Zeiteinsparung auf der Langstrecke ermittelt.[118] Im Rahmen der Studie wurden

[118] Kronenberg (2005): S. 34.

fünf ausgewählte Destinationen während einer Woche berechnet. Die Auswahl fiel mit Dubai, Hong Kong, Johannesburg und Sao Paulo auf identische Destinationen, wie sie in der Studie mit Lufthansa auch gewählt wurden. Zusätzlich wurde die Strecke Zürich – Chicago O'Hare berechnet, welche in etwa mit der Flugstrecke Frankfurt – New York verglichen werden kann. Bei der Studie von Swiss wurden aktuelle Flüge mit MTTs als Free Flight Routes verglichen. Daraus folgt, dass die ermittelten MTT-Zeiten ein etwas grösseres Zeitpotenzial ermitteln, da bei der Lufthansa Studie mit MFT-Zeiten gerechnet wurde. Diese resultierenden Differenzen sollten jedoch nur geringfügig ausfallen. Viel wichtiger ist der Unterschied, dass bei Swiss sämtliche SID und STAR Verfahren bei der Ermittlung des Free Flight Wertes nicht berücksichtigt wurden, während die Studie von Lufthansa von unveränderten An- und Abflugverfahren ausgeht, weil diese Verfahren nicht das Ergebnis infrastruktureller Mängel sind, sondern nach umweltpolitischen Gesichtspunkten und unter Berücksichtigung der Hindernisfreiheit konstruiert sind. Die Wahrheit dürfte irgendwo in der Mitte liegen: Ein Flugzeug wird (gemäss heutigem Wissensstand) auch in Zukunft auf einer, in eine bestimmte Richtung gebauten Piste starten und landen. Während beim Abflug theoretisch relativ kurz nach dem Start in Richtung Destination geflogen werden kann, stellt sich die Situation bei der Landung schwieriger dar, da ein sicherer und stabilisierter Landeanflug in einer gewissen Distanz zur Pistenschwelle auf der verlängerten Achse der Landepiste (sog. Anfluggrundlinie) beginnen muss. Ein (naturgemäss) gerichteter An- bzw. Abflug führt je nach Position des Flughafens in fast jedem Fall zu Umwegen. Ein Langstreckenflug von Sao Paulo beispielsweise erreicht Zürich von Südwesten[119]. Da die üblicherweise vorgesehenen Piste 14 (ausserhalb der DVO-Zeiten[120]) aber aus Nordwesten angeflogen wird, kann dieser Flug keinen direkten Anflug (straight in) nach Zürich vornehmen. Somit fliegt dieser Flug eine zusätzliche Distanz (und damit Zeit und Treibstoff), um Zürich von Nordwesten her anzufliegen. Nur ein Helikopter in einem verkehrsfreien Raum kann tatsächlich direkt vom Startpunkt aus in Richtung Destination wegfliegen beziehungsweise direkt anfliegen. Weitere Restriktionen haben die Bündelung und sichere Separation der an- und abfliegenden Flugzeuge zur Folge. Diese Verfahren führen zwangsweise zu Umwegen und werden nur sehr schwer zu verbessern sein, da insbesondere die Höhenänderung ein enges aneinander Vorbeiführen von Flugzeugen auch mit neuen Technologien und Navigationsverfahren schwierig gestalten wird. Nach heutiger Ansicht stellen meist die Flughäfen als Nadelöhre das Hauptproblem in der Kapazitätsfrage dar.

[119] via KORED, KONOL; gemäss http://www.vatroute.net
[120] Deutsche Rechtsverordnung über die Anflugsverfahren auf den Flughafen Zürich, Stand Oktober 2007

Aus den genannten Gründen ist der in der Studie von Swiss ermittelte Wert aus heutiger Sicht auch für Free Flight Routings der Zukunft kaum erreichbar. Auf der anderen Seite werden die An- und Abflugverfahren in Zukunft effizienter abgewickelt werden können und somit ist die volle Berücksichtigung der heute bekannten SIDs und STARs vermutlich auch nicht zwingend korrekt. Eine genaue Untersuchung dieser Tatsachen ist Gegenstand von Studien zur Gestaltung und Organisation von TMAs.[121]
Die Resultate aus der Studie von Swiss ergeben die folgenden Zeitdifferenzen in Abbildung 79 zwischen heutigen und Free Routing Flights.

	Airway Routing	MTT Routing	Absolute Zeitdifferenz	relative Zeitdifferenz
Zürich - Chicago (ORD)	561	543	18	3.3%
Zürich - Dubai (DXB)	341	328	13	3.6%
Zürich - Hong Kong (HKG)	699	615	84	11.9%
Zürich - Sao Paulo (GRU)	693	673	20	2.8%
Zürich - Johannesburg (JNB)	604	582	22	3.7%

Abbildung 79: Differenzen aus der Studie von Swiss Flight Dispatch zwischen heutigen Strecken und Free Flight.[122]

Aus diesen Werten berechnet Kronenberg einen Mittelwert von 5% Zeitdifferenz zwischen heutigen Flügen und Flügen in einer Free Flight Welt. Augenfällig ist, dass Hong Kong mit fast 12% einen Extremwert darstellt, während die restlichen Werte im Bereich zwischen 2.8% und 3.7% liegen. Der Mittelwert ohne Hong Kong beträgt 3.4% und liegt damit immer noch deutlich höher als die 2.2% aus der Lufthansa Studie[123]. Diese Abweichung erklärt sich primär durch die Nicht-Berücksichtigung von SID und STAR, welche grob geschätzt zwischen 5 und 15 Minuten zusätzliche Zeit benötigen. Dies stellt denn auch etwa die 1.2% Differenz dar, welche zwischen den beiden Studien (unter Ausschluss von Zürich – Hong Kong) liegt.
Die Erklärung für den Ausschluss der Strecke Zürich – Hong Kong aus der Swiss Studie, nicht aber der Lufthansa Studie, findet sich im Anhang C.IX.

4.8.2 Einschränkungen der Studie

Die vorliegende Studie ermittelte im Rahmen der gegebenen Parameter die Flugzeiten. Diese Flugzeiten stellen Momentaufnahmen dar und sind unbedingt auch als solche zu verstehen. Die Strukturen sind ein dynamisches System,

[121] diverse Projekte bei EUROCONTROL.
[122] Kronenberg (2005): S. XVIII f.
[123] Hier Mittelwert aller berechneten Flüge.

welches permanent Anpassungen und Änderungen erfährt. Gerade in jenen Regionen, wo die Probleme am grössten sind, ist aber nicht mit schnellen Änderungen, sondern eher mittelfristig mit Modifikationen zu rechnen. Die hier ermittelten Resultate können bereits in wenigen Jahren überholt sein, während auf bestimmten Strecken bereits früher Änderungen zu von diesen Studien abweichenden Resultaten führen werden.
Weiter ist zu betonen, dass die Studie aus der Perspektive von Lufthansa erarbeitet wurde und sich auf deren Interkontinentalnetzwerk beschränkt. Somit wurde die Situation aus Europa heraus analysiert und Regionen abseits von den Lufthansa Destinationen konnten nicht berücksichtigt werden, was nur eingeschränkt eine allgemeine Aussage über den „weltweiten“ oder „interkontinentalen“ Zustand erlaubt. Es fehlen Daten und Berechnungen unter anderem zu Strecken im australisch-pazifischen Raum, wo insbesondere auf den nordpazifischen Strecken ein beachtliches Volumen an Flugverkehr anfällt. Für ein umfassendes Bild wären Aussagen dazu wünschenswert. Es fehlen ebenso Betrachtungen für die polaren Strecken, deren Rolle im Weltluftverkehr aber eher marginal ist, sowie eine ganze Reihe weiterer Flugverbindungen.
In der Studie wurden für die Destinationen auf dem Nordatlantik-Flugnetz inklusive Caracas mindestens an sieben Tagen Flüge gerechnet, welche im Sommer 2007 stattgefunden haben. Das sich stets ändernde Tracksystem in dieser Region der Welt wurde somit in einer Auswahl von sieben Tagen abgebildet. Nach Aussage von Experten bei Lufthansa entsprechen die hier gewonnenen Erkenntnisse trotz des kleinen Samples recht genau den Erfahrungen, die bei gelegentlichen Vergleichsberechnungen in der täglichen Praxis gewonnen wurden. Die übrigen Strecken wurden mit statistischen Winden berechnet, womit eine marginale Ungenauigkeit einfliesst, welche jedoch als verschwindend klein betrachtet werden darf im Vergleich zum Gewinn durch statistische Mittlung der Rahmenbedingungen. Weiter stellt die Auflösung des Rasters der Berechnungen einen limitierenden Faktor dar. Ein Raster von 35km bis 55km Abstand stellt auch auf einer Langstrecke mit über 10’000km noch eine gewisse Ungenauigkeit dar. Insgesamt sind dies jedoch vertretbare Ungenauigkeiten.

Bei der Berechnung der Werte für die einzelnen Strecken wurden sämtliche Daten derselben Strecke für die Bildung eines Mittelwertes benutzt. Bei diesem Verfahren kann ein einzelner Extremwert unter Umständen den Mittelwert deutlich beeinflussen. Es wurde versucht, solche Einflüsse auszuschliessen, um ein möglichst der Realität entsprechendes Resultat zu erhalten. Sämtliche Werte, welche überraschend ausfielen, wurden genau überprüft, um Fehler in der Berechnung möglichst auszuschliessen.

4.8.3 Beispiel einer Streckenanalyse: Osaka

In weiten Bereichen von Asien sind immer wieder Anpassungen an das Streckennetz vorgenommen worden, um Distanzen zu verkürzen und somit die Effizienz einer Strecke zu erhöhen. Dies ist ein Prozess, der grundsätzlich stets weitergeführt wird. Ein wichtiges Instrument dabei ist die Kommunikation zwischen Fluggesellschaften, Flugsicherungen und den verantwortlichen Behörden der einzelnen Länder. Eine Schlüsselrolle nehmen dabei IATA und ICAO als leitende und vermittelnde Instanzen ein. Ein Beispiel für substanzielle Einsparungen auf einer Flugroute war die Einführung von Polarstrecken für den Extrem-Langstreckenflug Singapur – New York erreicht, bei dem sich mit 209 Flugminuten über drei Stunden Flugzeit einsparen liessen.[124] Die Möglichkeiten zur Optimierung des Netzwerks von Luftstrassen und deren Beschränkungen in den Regionen Russland, China und Korea sind weniger spektakulär, dafür aber sehr komplex, und das Einsparpotenzial verglichen mit anderen Regionen immer noch erheblich. Die IATA führt regelmässig Treffen zur Diskussion von Vorschlägen zur optimierten Luftraumgestaltung durch (Special ATS Coordination Meeting – China, Mongolia, the Russian Federation and IATA[125]).

Die Strecke von Frankfurt nach Osaka und umgekehrt weist gemäss den durchgeführten Untersuchungen am meisten Potenzial für Optimierung auf. In der bestehenden ATS Struktur gibt es keine Verbindungen zwischen Nordkorea und China beziehungsweise zwischen Nordkorea und Japan, sodass Nordkorea ein undurchdringbares Hindernis darstellt. Dieses Gebiet ohne ATS Verbindungen liegt gemäss den Untersuchungen genau auf der optimalen Strecke von Frankfurt nach Osaka (FreeGrid für alle Jahreszeiten), woraus sich der deutliche Unterschied bei den Flugzeiten in der folgenden Abbildung 80 ergibt.

	Frankfurt - Osaka			**Osaka - Frankfurt**		
	CurRoute-AirwOpt	**CurRoute-FreeGrid**	**AirwOpt-FreeGrid**	**CurRoute-AirwOpt**	**CurRoute-FreeGrid**	**AirwOpt-FreeGrid**
Jan-Mar	7	24	17	9	28	19
Apr-Jun	8	26	18	9	32	23
Jul-Sep	4	24	20	12	36	24
Oct-Dec	7	24	17	11	29	18
Mittelwerte	**6.5**	**24.5**	**18.0**	**10.3**	**31.3**	**21.0**
Min	4	24	17	9	28	18
Max	8	26	20	12	36	24
(Max-Min)	4	2	3	3	8	6
Median	7	24	17.5	10	30.5	21

Abbildung 80: Flüge zwischen Frankfurt und Osaka, Mittelwerte der Flugzeiten in Minuten.

[124] http://www.icao.int/.
[125] http://www.icao.or.th/.

4.8.3.1 Untersuchung der Strecke Frankfurt - Osaka

Sämtliche FreeGrid Tracks verlaufen etwa auf derselben Linie. Alle führen über Nordkorea, wo es keine Transit-Luftstrassen gibt (siehe Abbildung 81 und Abbildung 82). Momentan werden Gespräche mit der russischen Flugsicherung geführt mit dem Ziel, die bestehenden ATS Strecken von Westen her mit einer Verlängerung direkt an den chinesischen Luftraum anzubinden. Diese neue Strecke wird ungefähr das Routing von FO nach SOVIT haben, welches unweit der russisch-chinesischen FIR Grenze verläuft und sehr nahe dem optimalen Routing liegt. Die untenstehende Karte (Abbildung 83) zeigt den theoretisch optimalen Verlauf der weiteren Strecke über chinesisches und nordkoreanisches Gebiet über das offene Meer nach KANSU im Japanischen Meer. Diese optimierte Strecke wird in der Praxis vermutlich nicht genau so realisiert aus den folgenden zwei Gründen: Erstens verläuft die Strecke unweit des Punktes Harbin (HRB), sodass dieser entweder verlegt würde oder eine neue Strecke vielleicht auch direkt über HRB führen müsste, was einen, jedoch geringen, Umweg bedeuten würde. Denkbar ist auch, dass ein zusätzlicher Navigationspunkt nahe von HRB geschaffen würde. Das zweite Argument gegen die optimierte Strecke ist die Grenzregion der drei Länder Russland, China und Nordkorea in der Gegend von Hunchun. Eine Streckenführung entlang der Grenze ist aus hoheitspolitischen und organisatorischen Gründen problematisch und würde von den beteiligten Ländern kaum so akzeptiert werden. Aus diesem Grund wird eine neue Strecke vermutlich leicht südlich der optimierten Strecke liegen, was sich mit einer Streckenführung über Harbin kombinieren liesse.

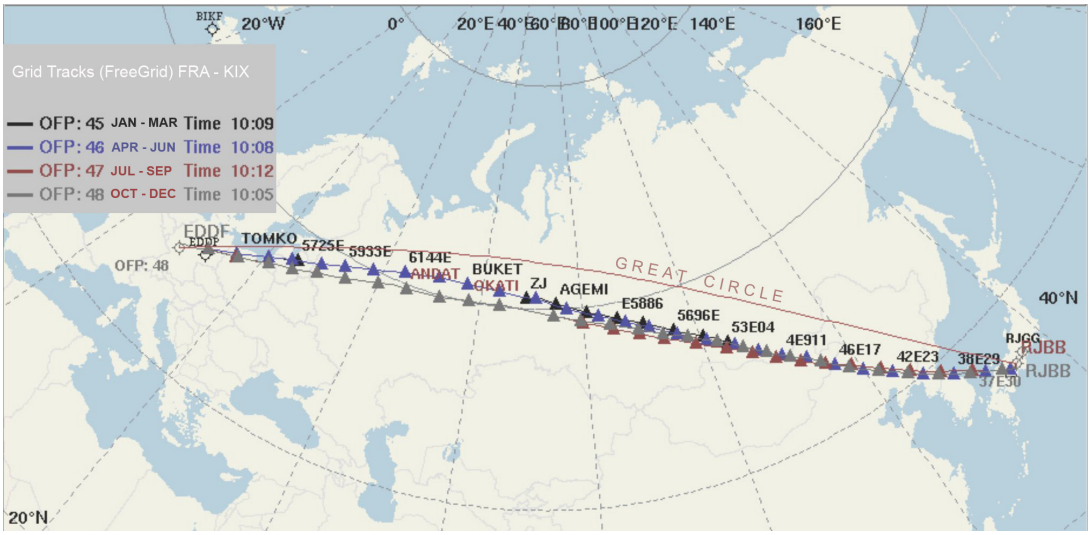


Abbildung 81: Flugrouten *FreeGrid* von Frankfurt nach Osaka für alle Quartale.[126]

[126] Lufthansa.

Der Vergleich von Abbildung 82 und Abbildung 83 zeigt, dass die geplante Route nicht exakt auf dem optimalen FreeGrid Track nach Frankfurt liegt. Dies kommt daher, dass auch nach Einführung des neu geplanten Abschnittes ein Anschluss an die bestehende Struktur geschaffen werden muss. Aus diesem Grund wurde für die Evaluation der optimalen Flugstrecke, wie sie in Abbildung 83 gezeigt wird, eine Optimierung zwischen FO beziehungsweise SOVIT in Russland einerseits und KANSU im japanischen Luftraum andererseits durchgeführt, was einer moderaten Anpassung entspräche.

Des Weiteren ist vorgesehen, nach der Implementierung, oder zumindest definitiven Vereinbarung der Routen auf russischem Territorium (Anschluss SOVIT) die chinesische Flugsicherung mit einem konkreten Routenvorschlag zu kontaktieren. Dies würde im Idealfalle gleichzeitig die Gesprächsaufnahme über die Grenzübergänge zwischen Russland und China und im weiteren Verlauf zwischen China und Nordkorea initiieren. Die Gespräche werden meist im Rahmen einer kleinen IATA Delegation organisiert und finden in der Regel in demjenigen Land statt, wo die Neugestaltung geplant ist. In der Vergangenheit war es schwierig, die betroffenen Länder bzw. deren Flugsicherungen zu motivieren, gewünschte Änderungen vorzunehmen.

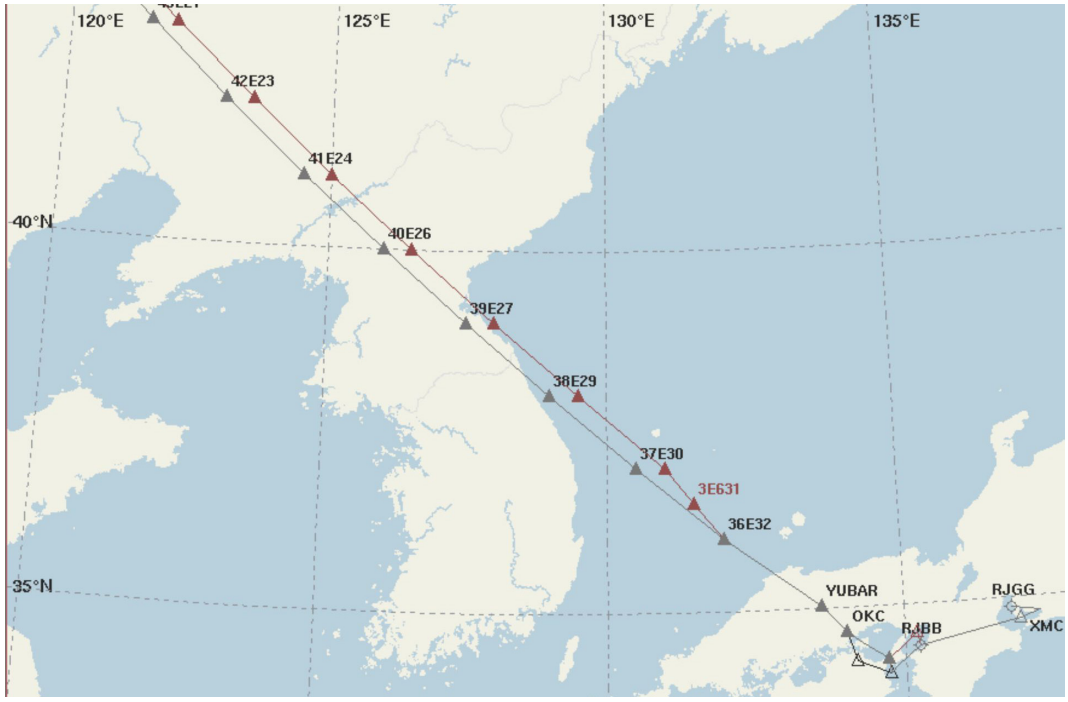


Abbildung 82: Detailkarte von FreeGrid Flügen von Frankfurt nach Osaka.[127]

[127] Lufthansa.

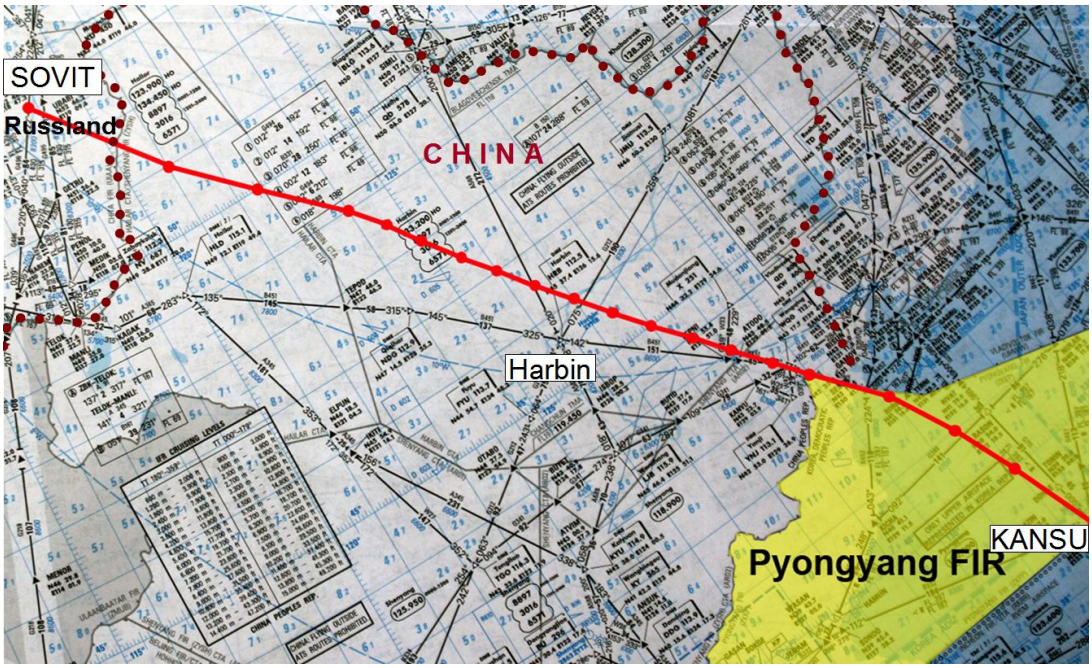


Abbildung 83: Neu geplante Strecke durch Chinesischen und Nordkoreanischen Luftraum (Pyongyang FIR, gelb).[128]

In den letzten Jahren hat sich die Situation gerade im von diesem Beispiel betroffenen Raum deutlich verbessert und die verantwortlichen Stellen sind an Optimierungen interessiert. Dabei spielen wirtschaftliche Faktoren immer mehr eine Rolle als es in den kommunistischen Strukturen früherer Zeiten der Fall war. Die Argumentation zielt darauf ab klarzumachen, dass diese neuen Strecken den betroffenen Ländern zusätzlichen Flugverkehr und damit zusätzliche Einnahmen in Form von Flugsicherungsgebühren bringen würden. Monetäre Kriterien sind jedoch nicht immer ausschlaggebend, und einige Verbesserungen wie beispielsweise eine Verkürzung einer Flugroute innerhalb eines Landes, lassen sich nicht monetär begründen. In solchen Fällen kann in der Argumentation die Umweltproblematik von zu langen Strecken und überflüssigen Flugzeiten aufgezeigt werden. Das Ausweisen von reduzierten CO^2 Emissionen dank Zeitersparnissen kann nicht nur für das betroffene Land, sondern auch für dessen Reputation in der Weltgemeinschaft von Vorteil sein. Im Falle von Nordkorea zielt die Argumentation zugunsten neuen Strecken tendenziell in Richtung Anerkennung in der Völkergemeinschaft. Nordkorea als politisch eher isoliertes Land misst der Bedeutung von Besuchen ausländischer Delegationen und auch der Zusammenarbeit mit ausländischen Fluggesellschaften eine wesentlich

[128] Flugkarte von Lufthansa, Details eingezeichnet.

grössere Bedeutung bei als dies bei anderen Ländern der Fall ist. Dabei spielen in diesem eher konservativen Land persönliche Kontakte sowie gute Kontakte zur Regierung oder diplomatischen Vertretungen im Ausland eine wesentliche Rolle für die Kontaktaufnahme und erfolgreiche Verhandlung eines Anliegens.[129]

4.8.3.2 Untersuchung der Strecke Osaka – Frankfurt

Die Strecke von Osaka nach Frankfurt weist mit 31.3 Minuten Differenz zwischen heutigen Flügen (*CurRoute*) und einer Free Flight Planung (*FreeGrid*) eine noch grössere Differenz auf als der Hinflug nach Osaka. Auf dem Rückflug weicht die optimale Flugroute den kontinentalen Jetstreams aus und verläuft aus diesem Grund nördlich von Nordkorea. Die optimale Route würde über Nordchina führen (vgl. Abbildung 64), wo ebenfalls keine Transit-Routen existieren. Die Begründung für die enorme Abweichung liegt grundsätzlich in der Nicht-Verfügbarkeit von optimalen Luftstrassen. Dies wurde in Kapitel 4.7.1.2 bereits detailliert erklärt. Zur Lösung dieses Problems sind keine laufenden Projekte bekannt.

[129] Mündliche Auskunft durch Lufthansa Experten.

5 Diskussion

Die Resultate der beiden Studien ergeben im Vergleich mit weiteren Studien zum Thema[130] ähnliche Werte. Die geringen Abweichungen zwischen den Studien sind meist durch die Untersuchungsmethode erklärbar. Die abschliessende Aussage aus den beiden Studien geht von einer Ineffizienz auf kontinentalen Flügen von rund 5.8% aus, während auf interkontinentalen Flügen eine durchschnittliche Ineffizienz von 2.0% ermittelt wurde. Dabei wurde ein Zusammenhang zwischen der Länge eines Fluges und der resultierenden Ineffizienz festgestellt. Grundsätzlich gilt, je länger ein Flug, desto geringer ist die relative Ineffizienz der betreffenden Flugstrecke. Dies resultiert zu einem Teil aus der aus der Tatsache, dass ein grosser Anteil der Langstreckenflüge in Lufträumen über Ozeanen operiert, wo meist günstiger geplant werden kann als in dicht beflogenen Lufträumen. Für Afrika wurden ähnlich günstige Voraussetzungen identifiziert. Eine weitere Begründung liegt in der relativen Betrachtung selbst, welche eine identische laterale Flugwegabweichung vom Optimum anhand der Streckenlänge zwangsläufig so gewichtet, dass kürzere Strecken bei gleicher absoluter Abweichung schlechter abschneiden. Die kontinentalen Flugrouten sind durch die hohe Verkehrsdichte stärkeren Restriktionen ausgesetzt, was meist einen negativen Einfluss auf die Effizienz hat. Die ermittelten 5.8% im europäischen Verkehr sind zudem auf Swiss bezogen, welche mit ihren Schweizer Flughäfen im Zentrum von Europa stärker von Ineffizienzen betroffen ist als dies im europäischen Durchschnitt der Fall ist. Der gesamteuropäische Wert liegt bei knapp 5% und stellt damit einen Zwanzigstel der gesamten geflogenen Flugstrecke dar.

Die ermittelten Werte müssen für eine ausführliche Interpretation in Relation zu weiteren Faktoren betrachtet werden: Warteschleifen am Zielflughafen und wetterbedingte Abweichungen auf der Strecke, aber auch wechselnde An- und Abflugverfahren führen häufig zu Verlängerungen der Gesamtflugzeit, die das Einsparpotenzial auf der Strecke übertreffen. Ein aktuelles Beispiel für einen Effekt, der grösser als das Sparpotenzial von Free Flight ist, stellt die Situation am Flughafen Zürich am frühen Morgen wie folgt dar. Die Nachtflugsperre dauert bis 06:00 Uhr Lokalzeit, und zwischen 06.00 und 06.15 Uhr landen planmässig bis zu 7 Langstreckenflüge. Wenn diese pünktlich am Startflughafen abfliegen, erreichen sie unter anderem Dank unterwegs erhaltenen, nicht einkalkulierbaren Abkürzungen sowie eventuell günstigerer Winde und weiteren

[130] Studien von Swiss, EUROCONTROL und FAA.

Flugplanabweichungen Zürich bereits vor Ende der Nachtflugsperre. In diesem Fall werden die Flugzeuge in Holdings geschickt, teilweise bis zu 20 Minuten. Im Anhang D.I ist dieses Phänomen graphisch dokumentiert sowie genauer erklärt. Dieses spezielle Problem ist auch Ausdruck der nach wie vor nicht auf die Minute genauen Planung. Die Lösung eines Problems wie jenes der Frühankünfte in Zürich könnte auf relativ einfache Weise geschehen und würde für die betroffenen Flüge oftmals mehr Zeitersparnis bringen, als ein aufwändiger Wechsel zu einem Free Flight Zustand. Dies relativiert die Bedeutung von Free Flight. Dabei darf jedoch nicht vergessen werden, dass Free Flight für jeden einzelnen Flug diese Einsparungen bringen würde, während nur eine bestimmte Anzahl von Flügen von den erwähnten, negativen Phänomenen betroffen ist. Dabei ist nicht zu übersehen, dass zwar infolge solcher flugverlängernder Ereignisse der Charme einer optimalen Flugwegplanung verblassen würde, der Zeitgewinn aber erhalten bliebe. Free Flight könnte zudem auch einen reduzierenden Effekt auf die genannten, negativen Einflüsse haben, denn die Technologien, die Free Flight ermöglichen sollen, würden wohl auch das ATM in den TMAs erleichtern und verbessern, sowie im Rahmen leistungsfähigerer Trajektorien-Rechner eine stark verbesserte Planung ermöglichen.

Auf den Langstreckenflügen wurde ein Einsparungspotenzial zwischen 2 und 31.3 Minuten, bei einem Mittelwert von 9.9 Minuten, ermittelt. Diese Werte stammen aus der Flugplanberechnung und enthalten daher keine ausserordentlichen Einflüsse wie Verspätungen und Holdings. In einer Auswertung von 6'348 Interkontinental Flügen von Lufthansa wurde eine durchschnittliche Holding Zeit von 2.3 Minuten pro Flug ermittelt.[131] Diese Warteschleifen müssen in eine umfassende Beurteilung der Ineffizienz einfliessen, waren aber für beide Studien nicht verfügbar. Da Holding-Zeiten auch bei Free Flight nicht auszuschliessen, aber heute nicht annähernd quantifizierbar sind (Flughäfen als Nadelöhre), ist die Berücksichtigung für einen Effizienzvergleich fraglich. In einer idealen Welt, welche durch Free Flight abgebildet werden sollte, treten jedoch theoretisch keine Holdings auf.

Die ermittelten Ineffizienzen lassen sich auch in einer Free Flight Welt nicht komplett verhindern. Militärische Zonen, Politische Differenzen, meteorologische Hindernisse und weitere Gründe werden auch in diesem idealen Planungsumfeld noch existieren und zu Umwegen führen. Im Fall von militärischen Sperrgebieten lässt sich möglicherweise eine wesentliche Optimierung gegenüber dem heutigen Zustand durch zeitliche und geographische Verlegung dieser Zonen erreichen.

[131] Auswertung im Obelisk (Datenbank DLH) zwischen 18.04. und 08.08.2007 (Intercontinental, To Frankfurt), wobei Holding Werte vermutlich nicht konsequent eingetragen wurden und der tatsächliche Wert mit grosser Wahrscheinlichkeit höher liegt.

Free Flight ist damit nicht ein absolut optimaler Zustand, nutzt aber den Luftraum optimal aus. Die Elimination der Luftstrassen lässt eine freie Nutzung des Raumes zu, sodass im Idealfall jedes Flugzeug seiner optimalen Flugroute folgen kann. Flugzeuge werden sich in jedem Fall auch in einem freien Luftraum kreuzen, wobei im Falle von gefährlichen Annäherungen vom optimalen Flugweg abgewichen werden muss, um die Abstände und damit die Sicherheit zu gewährleisten. Welcher Anteil der Zeitersparnis zwischen heutigen Flügen und einem idealen Free Flight Flug schlussendlich noch als Gewinn gegenüber heute verbleibt, lässt sich nicht abschliessend beurteilen.

Die vorliegenden Untersuchungen haben stets den Effekt der TMA ausgeklammert. Die TMA steuert einen zusätzlichen Beitrag zur Ineffizienz bei, da fest definierte An- und Abflugverfahren heute zusätzliche Flugwege im Rahmen von einigen wenigen bis zu 15 Minuten bedingen. Der Zeitaufwand infolge dieser Verfahren steht in einem bedeutenden Verhältnis zu den ermittelten Potenzialen von Free Flight, da der Effekt der TMA vermutlich nochmals ähnliche Prozentwerte zur bestehenden Ineffizienz beisteuert und somit die Gesamtineffizienz je nach Betrachtung verändert. Die zentrale Frage ist dabei, inwieweit eine Optimierung der TMA unterstellt werden kann. Eine genaue Untersuchung dazu ist jedoch auf Grund der Komplexität des Zusammenspiels von sicheren Start- und Landeverfahren und der hypothetischen Natur der zu treffenden Annahmen schwierig und müsste in einer weiteren Studie ermittelt werden.

5.1 Eine Hochrechnung des Free Flight Potenzials

Eine Hochrechnung birgt stets das Risiko, Fehler in den Eingangsdaten multiplikativ zu verwerten. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, die Eingangsparameter sowie das verwendete Verfahren genau zu erläutern. Nur so kann der fachkundige Leser das ermittelte Resultat beurteilen. Eine gewisse Skepsis ist bei Hochrechnungen stets angebracht, und nur eine kritische Würdigung der Resultate hat die Chance, ein faires Abbild zu vermitteln. Trotz dieser Vorbehalte Hochrechnungen gegenüber werden hier solche einbezogen, da sie eine wichtige Brücke zwischen den ermittelten Werten der Studien und den möglichen Gesamteinfluss dieser Resultate auf die Praxis aufzeigen. Die verwendeten Parameter und Annahmen der folgenden Hochrechnungen befinden sich im Anhang Kapitel D.II.

Eine Umrechnung der gesamten Menge an Treibstoff, welche auf Interkontinentalverbindungen von und nach Europa unter Free Flight Bedingungen jährlich eingespart werden könnte, entspricht der Menge von 5.8 Ladungen eines

Öltankers.[132] Die dabei eingesparte Zeit beträgt über 12'320'000 Minuten oder knapp 23.5 Jahre Flugzeit pro Kalenderjahr. Die Abbildung 84 zeigt die Menge an Treibstoff, welche auf ausgewählten Routen bei Free Flight gegenüber dem heutigen Zustand jährlich eingespart werden könnte.

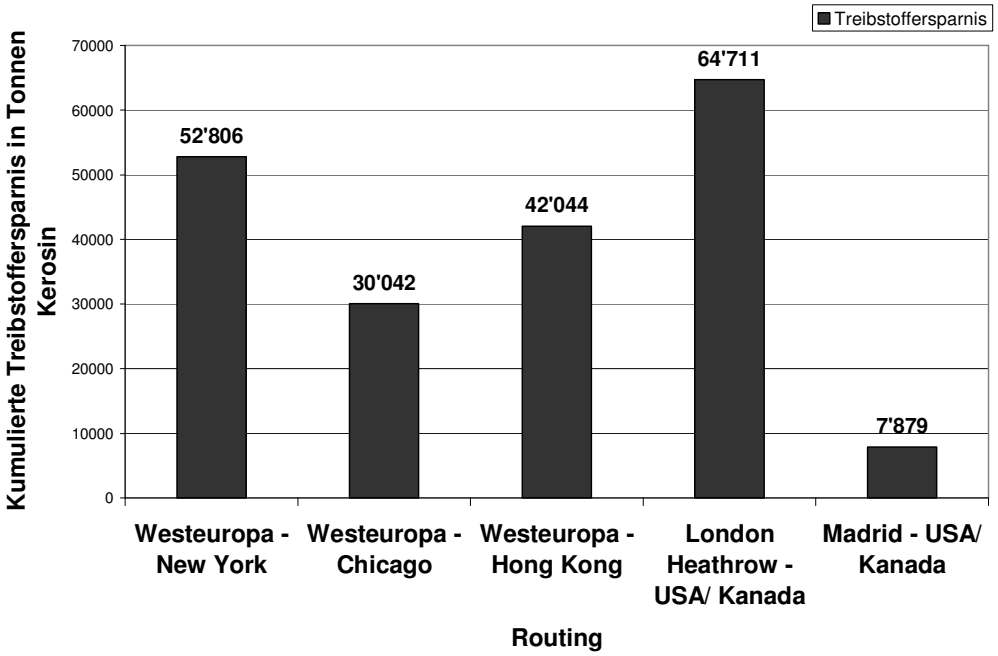


Abbildung 84: Kumulierte jährliche Treibstoffersparnis in Tonnen Kerosin für Free Flight verglichen mit dem heutigen Zustand.

Die resultierenden jährlichen Kosten, welche den Unterschied zwischen Free Flight und dem heutigen Zustand ausmachen, werden in der folgenden Abbildung 85 als Kostenersparnis in Schweizer Franken dargestellt. Während die Nordatlantik Flüge eine wesentlich höhere Frequenz aufweisen, ist das Potenzial pro Flug auf den Asien/ Pazifik Strecken höher, was die Werte annähert. Gerade bei dieser Abbildung wird aber auch deutlich, wie sehr es sich um eine Momentaufnahme handelt. Die Frequenzen auf den einzelnen Strecken verschieben sich relativ deutlich innert kurzer Zeit. So weist Afrika ein Wachstum des interkontinentalen Verkehrs von 11%, Nordamerika von lediglich 3% zwischen 2006 und 2007 auf. Die stark schwankenden Treibstoffpreise sowie die ständig verbesserten Effizienzen auf den Routen verändern diese Werte genau so schnell wie das Auf- und Abbauen von Frequenzen der einzelnen Fluggesellschaften.[133]

[132] Annahme: Öltanker der Kategorie Very Large Crude Carrier (VLCC) mit 250'000 Tonnen Zuladung, gemäss http://www.wikipedia.de.
[133] http://www.oag.com/.

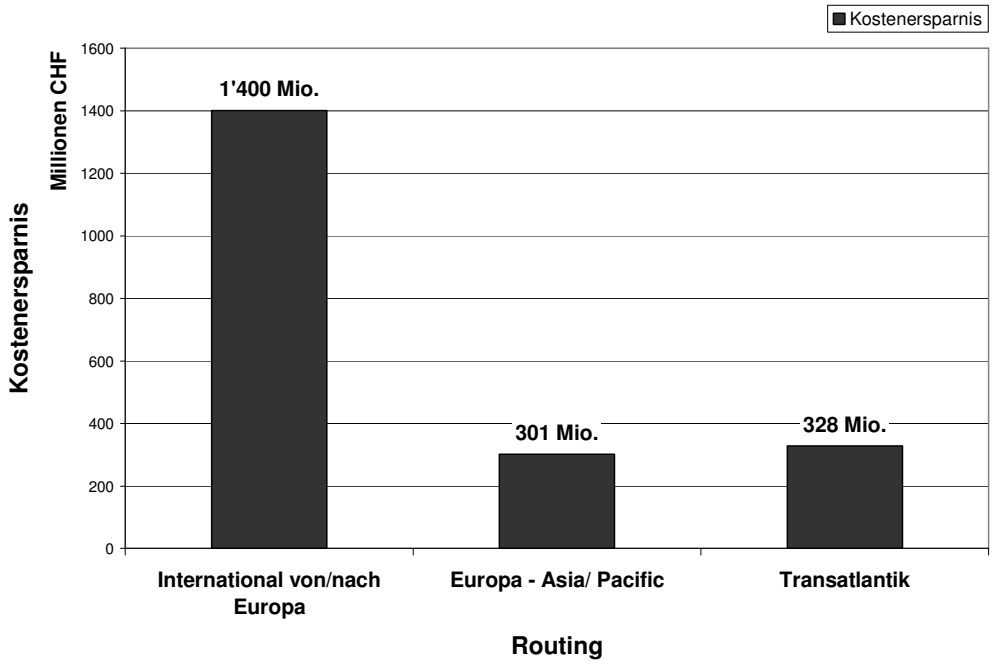


Abbildung 85: Jährliche Kostendifferenz zwischen dem heutigen Zustand und Free Flight.

Der Wert von etwa 1.4 Milliarden Schweizer Franken Ersparnis auf sämtlichen Interkontinentalflügen von und nach Europa berücksichtigt dabei nur den Wert der eingesetzten Ressourcen und enthält keine Opportunitätskosten für Passagiere, Besatzungen und Flugzeuge. Diese zu ermitteln, würde weitere hohe Kosten ergeben, ist jedoch enorm schwierig, weshalb hier darauf verzichtet wird.
Die Strecke mit den weltweit meisten Verbindungen pro Woche ist Barcelona – Madrid mit 971 wöchentlichen Verbindungen, was etwas mehr als 50'000 Flügen pro Jahr entspricht.[134] Eine konservative Hochrechnung, ohne detaillierte Kenntnisse der Strecke aber mit den Werten aus der Kontinentalstudie, ergibt eine jährliche Ineffizienz von etwa 1'400'000 zusätzlichen Kilometern, was ca. 35 Erdumrundungen entspricht. Bei vorsichtiger Rechnung resultieren daraus jährliche Zusatzkosten von etwa 10 Millionen Schweizer Franken.[135]
Zu bedenken ist dabei, dass sämtlichen genannte Werte für ein Jahr ermittelt wurde, die Vorteile von Free Flight aber bis „in alle Ewigkeit“ existieren würden. Eine umfassende Betrachtung müsste dieses Potenzial also über die Jahre der Zukunft summieren, was ein Vielfaches dieser Werte ergeben würde. Darauf wird hier jedoch verzichtet.

[134] http://www.oag.com/.
[135] Berechnung im Anhang Kapitel D.II.

5.2 Aktuelle Trends zur Verbesserung der Effizienz

Die Anstrengungen zur Verbesserung der Effizienz sind heute stärker denn je, verursacht durch die Höchststände der Kerosinpreise und einem stärker werdenden ökologischen Bewusstsein. Ökonomische Interessen stehen aber seit jeher im Vordergrund, was heute durch den verstärkten Kostendruck noch akzentuiert wird.
AO versuchen mittels ökonomischer Optimierung ihrer Flugzeuge (Anzahl Sitzplätze, operationelle Verfahren, Wahl der Triebwerke und Flugzeugmuster, etc.) die Kosten zu reduzieren. Gleichzeitig wird versucht, die Flugrouten weiter zu optimieren, wie das Beispiel von Osaka gezeigt hat. Die IATA und ICAO spielen dabei wichtige Rollen. Die Einführung von RVSM, neuen Routen und RNAV-Verfahren, Verschärfung der RNP-Anforderungen und weiteren Verbesserungen führten und führen ständig weiter zu einer effizienteren Routenstruktur und deren optimalen Nutzung (Kapazität).[136]
In Europa führt EUROCONTROL diverse Projekte zur Verbesserung der Effizienz von Flugrouten durch. Dazu zählen: Einrichtung neuer Airways, Bemühen um die erweiterte Verfügbarkeit von Conditional Routes (Strecken, welche nur unter bestimmten Bedingungen fliegbar sind) und die Harmonisierung des Europäischen Luftraumes im Rahmen der SES Initiative. EUROCONTROL strebt eine Reduktion der Ineffizienz um 15 – 20% in den nächsten 5 Jahren innerhalb Europas an und bezeichnet dies als realistisches Ziel.[137]

Während all diese Verbesserungen des heutigen Zustandes mehr oder weniger von der Annahme ausgehen, dass diese Ziele mit den derzeit verfügbaren Verfahren und Hilfsmitteln umzusetzen sind, ist der Ruf nach Free Flight als dem neuen System der Flugsicherung unüberhörbar. Als kleinen Schritt in Richtung Free Flight kann gesehen werden, dass auf der Basis von RNAV-Verfahren bereits heute bestimmte Strecken unabhängig der bestehenden Luftstrassen beflogen werden. Mehrere Free Flight Projekte zeugen vom Bestreben, die Flugsicherung in eine neue Phase über zu leiten. In den USA wurde anstelle von Free Flight der Begriff *Next Generation Air Transportation System* (*NGATS*) gewählt. NGATS basiert auf acht wesentlichen Voraussetzungen und soll eine Verbesserung von Sicherheit, Effizienz und Umweltverträglichkeit bringen. Die Einführung ist ab 2025 geplant und entspricht weitgehend einem Free Flight.
NGATS bringt eine Verschiebung des ATM von der alleinigen Zuständigkeit des klassischen Lotsen hin zu den Flugzeugbetreibern (Besatzung an Bord von

[136] IATA Annual Report (2004): S. 24f.
[137] CFMU Network Operation Plan Summer 2007, Kapitel 16.

Flugzeugen und für die Flugplanung zuständige Einheit am Boden). Free Flight Bedingungen sind für weite Bereiche des Luftraumes vorgesehen, jedoch werden weiterhin klassische Lufträume in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen und insbesondere in den TMAs existieren. Voraussetzung für den Free Flight sind über ihrer Genauigkeit definierte technische Neuerungen verschiedenster Art. Wichtigstes Thema ist dabei die Separation, welche heute nahezu allein von der Flugsicherung organisiert wird. Die Einführung eines Systems, welches ein eigenständiges Einhalten von Abständen zu anderen Flugzeugen garantiert, ist eine wesentliche Neuerung, welche als Voraussetzung für Free Flight betrachtet wird. Das heutige TCAS[138] erfüllt diese Funktion entgegen weit verbreiteter Meinung nicht. Ein neues System muss auf der konstanten Berechnung von 4D Trajektorien basieren (TBO – Trajectory Based Operations) und erkennt so potenzielle Konflikte frühzeitig. Kern der Idee für solche Systeme ist die Definition einer Warn-Zone (Alert Zone) und einer Schutz-Zone (Protected Zone). Diese Zonen definieren den Bereich, den das Flugzeug auf Grund seiner Navigationsgenauigkeit (3D sowie zeitlich) beansprucht und der damit nicht gleichzeitig von weiteren Flugzeugen benutzt werden kann. Dies ist in Abbildung 86 graphisch dargestellt.

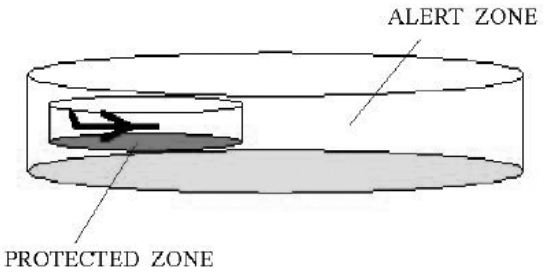


Abbildung 86: *Alert* und *Protected Zone* als methodische Ansätze eines Systems zur eigenständigen Separation.[139]

Die Information über die 4D Trajektorien sämtlicher Flugzeuge müssen dabei automatisch ausgestrahlt werden, sodass andere Flugzeuge diese empfangen und auswerten können. Treffen sich zwei Warn-Zonen, so ist die Situation als potenziell gefährlich einzustufen. Spätestens bei Aufeinandertreffen von Schutz-Zonen muss eines der Flugzeuge (oder beide) den Flugvektor ändern, um die Gefahr einer Annäherung (oder Zusammenstoss) zu verhindern und damit die Separation zu gewährleisten. Die Berechnung und Verhandlung der 4D Trajektorien wird ein wichtiges Thema für Free Flight werden. Dabei nimmt die

[138] Traffic Alert and Collision Avoidance System
[139] Free Flight Conflict Resolution Simulation (2007): S. 8

Genauigkeit von Navigation und Berechnung der Trajektorien einen zentralen Stellenwert für ein funktionierendes System ein. Der Nachweis vollständiger Sicherheit wird dabei vorerst erbracht werden müssen.
Die automatische Ausstrahlung von 4D Trajektorien steht dabei nur für ein Element des Informationsaustausches, welcher fortschreitend automatisch abgewickelt werden wird. Die Reduktion von mündlicher Kommunikation und der Fokus auf automatisierten Datenaustausch und –darstellung setzt Kapazitäten sowohl im Cockpit als auch bei der Flugsicherung frei. Diese freie Kapazität kann für Aufgaben der Flugsicherung sowie eine ständig optimierte Flugwegplanung verwendet werden. Heutige Cockpits haben in der Regel keine Möglichkeit, den umliegenden Verkehr vollständig zu erfassen und darzustellen. ADS-B ist eine erste Form von automatischer Datenübermittlung, wobei diese ohne Abfrage erfolgt. Zukünftige Systeme werden aber auch spezifische Anfragen und Bewilligungen automatisiert austauschen können.[140]
Die Resultate der beiden Studien werfen insgesamt ein positives Licht auf die Effizienz von Flugrouten. Gängige Meinungen zu diesem Thema gehen von wesentlich grösseren Ineffizienzen aus. Die Reduktion von Verspätungen und mögliche Verbesserungen im Bereich der TMA stellen weitere wesentliche Parameter für die Optimierung der Effizienz von Flügen dar, wurden aber in dieser Studie nicht berücksichtigt. Die Hochrechnungen für einen kleinen Teil des weltweiten Flugverkehrs haben ein eindrückliches Potenzial an Einsparungen aufgezeigt und favorisieren somit in jedem Fall eine baldige Einführung von Free Flight Bedingungen. Die Einsparungen aus Free Flight ähnlichen Zuständen werden gemäss diesen Hochrechnungen die Kosten der Implementierung von Free Flight vermutlich bereits nach wenigen Jahren übertreffen. Die technischen Voraussetzungen müssen, wie bereits erwähnt, dafür erst noch geschaffen werden. Weitere Probleme und Einschränkungen werden die Einführung von Free Flight als globale Verfahrensweise erst in einer Zeit ermöglichen, die noch nicht absehbar ist. Eine schrittweise Einführung beispielsweise auf ozeanischen Strecken ist jedoch mittelfristig denkbar. Dabei ist die Sicherheit nach wie vor und unbestritten wichtigstes Kriterium. Einzelne Probleme wie militärische Lufträume, wetterbedingte Phänomene oder politische Konflikte werden nie komplett auszuschliessen sein und stets zu Abweichungen vom idealen Free Flight Flugweg führen. Ein stark verbesserter Informationsaustausch wird aber die Auswirkungen dieser Hindernisse in Zukunft verringern, da eine frühzeitige Berücksichtigung in der Phase der Flugplanung ein hohes Mass an Optimierung dennoch zulassen wird.

[140] Concept of Operations for the Next Generation Air Transportation System (2007)

Nachwort

Die vorliegende Diplomarbeit hatte zum Ziel, qualitative und quantitative Aussagen zum Thema *Effiziente Flugrouten* zu gewinnen. Diese Aussagen sollten die Argumentation für oder gegen Free Flight bereichern und empirische Informationen in Form von Datenauswertungen zum Thema Verbesserung der Effizienz auf den Flugrouten liefern. Die dabei ermittelten Ineffizienzen von 2% auf interkontinentalen und 5% auf kontinentalen Strecken gegenüber Free Flight fielen geringer aus als erwartet und zeigen ein erfreuliches Bild der Effizienzsituation, wenn auch der nicht genau bekannte Effekt der TMA in einer allumfassenden Betrachtung diese Werte deutlich nach oben korrigieren würde. Dabei bleibt die Frage offen, ob die TMA jedoch als Ineffizienz gewertet werden darf, und wenn ja, zu welchem Anteil.

Der Leser darf nicht vergessen, dass die zugrunde liegenden Daten eine Momentaufnahme darstellen und einem steten Wandel unterliegen. Dieser Wandel zielt primär in eine effizientere Richtung, kann aber auch zu einer Verschlechterung der Effizienz beitragen. Die Daten stammen alle aus dem Sommer 2007, in welchem die Aviatik, gemessen an Flugbewegungen, neue Höchststände erreichte. Im Verlauf der Arbeit haben sich wiederholt interessante Veränderungen auf den Flugrouten ergeben: Restriktionen verschwanden, zusätzliches, exaktes Wissen zu bestehenden Routen bewirkte plötzlich weitere Einsparungen, neue, effizientere Flugzeuge wurden in den Linienverkehr aufgenommen (Airbus A380) und gleichzeitig wurden kurzerhand Lufträume gesperrt (Russischer Luftraum, Lufthansa Cargo). Die Sperrung des Luftraumes für Lufthansa Cargo führte für deren Flüge von und nach Ostasien zu 3 Stunden längeren Flugzeiten hin und zurück. Dies würde eine interessante, ergänzende Studie ergeben.[141]

Die vorliegende Arbeit war für mich eine grosse Bereicherung an Wissen und hat mir stets Freude bereitet. Das Interesse liess mich hartnäckig nachforschen, was meine Kontaktpersonen mir hoffentlich nicht übel nahmen. Besonders gefreut hat mich der freundliche, unkomplizierte Umgang und die Bereitwilligkeit, mit welcher ich von verschiedenen Seiten Unterstützung in Form von Informationen und Ratschlägen erhielt.

[141] http://www.nzz.ch/.

Danksagung

An dieser Stelle gebührt allen in diese Diplomarbeit involvierten Personen mein herzlichster Dank. Matthias Schmitt von DLH hat mit zahlreichen Informationen, Treffen und im Austausch per Email und Telefon ausserordentlich geholfen, das vorliegende Thema zu verstehen. In beispielloser Art und Weise war er als Betreuer der Arbeit stets für Auskünfte und Erklärungen zu erreichen. Seine zeitaufwändigen Berechnungen auf dem Langstreckennetz von Lufthansa hat die Studie erst ermöglicht. An dieser Stelle gebührt der Dank auch Lufthansa, welche die verwendeten Daten zugänglich machte und in jeder Hinsicht behilflich war.
Stefan Gerris von EUROCONTROL hat sich bereit erklärt, die Kontinentalstudie als Input für diese Arbeit zu betreuen und hat damit einen wesentlichen Beitrag geleistet. Sowohl EUROCONTROL wie auch Swiss haben freundlicherweise die Erlaubnis zur Verwendung der Daten gegeben.
Der weitere Dank gebührt allen im Anhang F genannten Personen, welche mit ihrer Unterstützung für ein Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein spezieller Dank geht auch an Professor Dr. Hans Elsasser der Universität Zürich, welcher mir erlaubte, dieses fachspezifische Thema für meine Diplomarbeit zu wählen und mir somit ein Thema gewährte, welches einem speziellen persönlichen Interesse entspricht.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Balasubramanian, Sathya et al. (2005): Global Aviation Emissions Inventories for 2000 through 2004, FAA (Dokument: FAA-EE-2005-02), Cambridge MA/ Washington D.C.
http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/aep/models/sage/media/FAA-EE-2005-02__SAGE-Inventory_Report-Text.pdf.

Bernreuther, M. (2000/2001): Kürzester-Weg-Suche mit dem Dijkstra-Algorithmus, Universität Stuttgart, Stuttgart (D).
http://www.uni-stuttgart.de/iv-kib/generic/download/lehre/einfuehrung/ws00_01/vorlesung/mb_dijkstra.pdf (Zugriff: 03.10.2007).

Bianco, Luciano, **Dell'Olmo**, Paolo, **Odoni**, Amedeo R. (1996), New Concepts and Methods in Air Traffic Management, Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York.

Bonn, James et al. (2005): Flight Efficiency Studies in Europe and the United States, EUROCONTROL (Dokument: EEC-SEE-report), Paris (F)/ Bretigny (F)/ Washington D.C. (USA).
http://www.EUROCONTROL.int/eec/gallery/content/public/documents/EEC_SEE_reports/2005_conf_Baltimore_1.pdf.

Borrmann, Stephan (2007): Mainzer Wolken Bilder Galerie: Flugzeug-Kondensstreifen. http://wolkengalerie.mpch-mainz.mpg.de/index.html (Zugriff: 12.09.2007)

Center-Tracon Automation System: Direct To-Tool.
http://www.ctas.arc.nasa.gov/project_description/direct-to.html.
(Zugriff: 02.10.2007).

Civil Aviation Safety Authority (2007): Standard Economic Values – Guidelines. Version 1.0, 12.Oktober 2007, Canberra (AUS).

Dietz, Michael (2005): Streckenoptimierungen und deren wirtschaftliche Auswirkungen, Teil 1: Zwischen 1995 und 2002 neu eingeführte Routen im asiatischen Raum, Lufthansa, Frankfurt (D).

Duchene, Alain (2007): Functional Airspace Blocks, ATS Route Network Structure Definition, FAB Workshop, EUROCONTROL.
http://www.EUROCONTROL.int/ses/gallery/content/public/events/fab/10_Session3_Airspace%20Design.pdf (Zugriff: 28.10.2007).

EUROCONTROL, ANT (2007): Flight Efficiency, EUROCONTROL (Dokument: ANT/42, WP 8, 27/02/07), Brüssel (B).

EUROCONTROL, CFMU (2007): Network Summer Plan 2007.

EUROCONTROL (2007): Airspace Design Using SAAM. http://www.EUROCONTROL.int/saam/public/subsite_homepage/homepage.html (Zugriff 18.10.2007).

Europäische Kommission (2007): Schwarze Liste der Airlines. http://ec.europa.eu/transport/air-ban/pdf/list_de.pdf (Zugriff: 23.10.2007).

Fuller, Ian, Hustache, Jean-Claude, Kettunen, Tarja (2004), Enhanced Flight Efficiency Indicators, EUROCONTROL Experimental Centre (Dokument: EEC/SEE/2004/011), Bretigny (F)/ Paris (F). http://www.EUROCONTROL.int/eec/gallery/content/public/documents/EEC_SEE_reports/EEC_SEE_2004_011.pdf.

Gutt, Ekkehardt (o.J.): ATM-Operational Aspects in the MEDA-Area, …from an Airline's Point of View, Emirates, Dubai (V.A.E.).

Hack, Karl Heinz (2003): Flugwetterkunde, Bösch AG, o.O.

Hauf, Thomas, **Leykauf**, Herbert, **Schumann**, Ulrich (2004): Luftverkehr und Wetter, Arbeitskreis Luftverkehr und Wetter, Hannover/ Offenbach/ Wessling (D). http://www.pa.op.dlr.de/Luftverkehr_und_Wetter/Statuspapier/Statuspapier_Juni2004.pdf (Zugriff: 23.10.2007).

Institut für Physik der Atmosphäre (2007): Contrails. http://wolkengalerie.mpch-mainz.mpg.de/Contrails/contrails.htm . (Zugriff: 27.08.2007).

International Civil Aviation Organization (2007): Fifth Special ATS Coordination Meeting – China, Mongolia, the Russian Federation and IATA. Dokument: CMRI/5–IP/2, 15/06/07, Bangkok (T). http://www.icao.or.th/meetings/2007/cmri5/ip02.pdf (Zugriff 27.09.2007).

International Civil Aviation Organization (2005): The Special ATS Coordination Meeting Cross Polar and Russian Trans-East ATS Routes (SCM POLAR & RTE). Dokument: SCM POLAR & RTE, WP/9 15/11/05, Bangkok (T). http://www.icao.int/icao/en/ro/apac/2005/SCM_POLAR_RFE/wp09.pdf (Zugriff: 10.06.2007).

IATA (2007): Fuel Conservation. http://www.iata.org/whatwedo/aircraft_operations/fuel/fuelaction/fuel_conservation.htm (Zugriff: 21.10.2007).

IATA (2004): Annual Report.

ICAO o.J.: Regional Supplementary Procedures, Kapitel Africa-Indian Ocean. (AFI), (Dokument 7030).

ICIS Pricing (2007): Jet Kerosene Weekly Price Report.

http://www.icispricing.com/il_shared/Samples/SubPage253.asp.
(Zugriff 04.10.2007).

Japan Air Lines (2007): Environmental Report 2004.
http://www.jal.com/en/environment/report/2004/activity/activity1.html. (Zugriff: 21.10.2007).

Kronenberg, Peter A. (2005), Free Flight – The future of Aviation?, Horizon Flight Academy, Bülach (CH).
http://www.kronenberg.aero/aviation/downloads/FreeFlight.pdf. (Zugriff: 01.06.07).

Krozel, Jimmy (2000): Free Flight Research Issues and Literature Search, Nasa by Seagull Technology. http://www.asc.nasa.gov/aatt/rto/RTOFinal43.pdf (Zugriff: 01.07.2007).

Lexikon der Flugzeuge (2007): Boeing 747 Jumbo Jet, Technische Daten.
http://www.bredow-web.de/ILA_2002/Transportflugzeuge/Boeing_747_Jumbo_Jet/boeing_747_jumbo_jet.html (Zugriff 04.10.2007).

Lufthansa (2007): diverse.
http://www.lufthansa-financials.de/servlet/BP/menu/1017305_12/index.html (Zugriff: 22.01.2007).
http://konzern.lufthansa.com/en/html/ueber_uns/flotte/index.html (Zugriff: 30.06.2007).
Flugplan 01 Jul 07 – 27 Oct 07

Martens, Bernard (2007): FAB Europe Central Feasibility Study, EUROCONTROL, o.O.
http://www.EUROCONTROL.int/ses/gallery/content/public/events/fab/4_Session2_Central%20FAB.pdf (Zugriff: 28.10.2007).

Mensen, Heinrich (2004): Moderne Flugsicherung, Organisation, Verfahren, Technik, Springer Verlag, Berlin.

Meyers Lexikon online (2007): Kondensstreifen.
http://lexikon.meyers.de/meyers/Kondensstreifen (Zugriff: 27.08.2007).

NASA (2007): Contrail Education.
http://asd-www.larc.nasa.gov/GLOBE (Zugriff: 27.08.2007).

Next Gen Joint Planning and Development Office (2007): Concept of Operations for the Next Generation Air Transportation System, Draft 5, Version 1.2, Feb 28, 2007.

North Atlantic Systems Planning Group, (1999), North Atlantic (NAT) Region Air Traffic Management (ATM) Concept of Operations (V0.34), Cedex (F).

NZZ online (2007): Deutsch-Russischer Luftfahrtkrieg entbrannt.

http://www.nzz.ch/nachrichten/wirtschaft/aktuell/deutsch-russischer_luftfahrtkrieg_entbrannt__1.577573.html (Zugriff: 18.11.2007).

OAG (2007): Travel Information, Airline and Airport Database. http://www.oag.com/oag/website/com/OAG+Cargo/Press+oagcargo/Press+Releases+2007/Aviation+growth+hits+all-time+high+08050701 (Zugriff: 25.09.2007).

Oanda (2007): Currency Converter, Kurs vom 1.November 2007. http://www.oanda.com/convert/classic?Convert.x=32&date=11%2F01%2F07&value=1&expr=CHF&exch=AUD&Convert.y=5. (Zugriff: 1.November 2007)

Schlobach, Sven (2007): Gridworkstation, Powerpoint Präsentation von Lido Systems, Frankfurt (D).

Skyguide (2007): Nachrichten für Luftfahrer des DFS, 220. Durchführungsverordnung zur Luftverkehrs-Ordnung (Dokument Nfl I 78-05). http://www.skyguide.ch/de/Dossiers/Dossier_DVO3/220_DVO_NfL_I_78-05.pdf (Zugriff 23.10.2007).

Stony Brook University (2007): Computer Science Department, Dijkstra-Algorithmus. http://www.cs.sunysb.edu/~skiena/combinatorica/animations/dijkstra.html (Zugriff 03.10.2007).

Sustainable Transport Coalition of WA (2007): Artikel: No relief for airlines yet from fuel prices. http://www.stcwa.org.au/index.php?option=com_content&task=view&id=364 (Zugriff: 21.10.2007)

Swartz, Karl (2007): Great Circle Mapper. http://gc.kls2.com/ (Zugriff: 10.10.2007).

Tell.ch (2007): Die Schweizer Kantone. http://www.tell.ch/schweiz/wappen.htm (Zugriff 03.10.2007).

TripBlab.com (2007): Airports and Airlines online database. http://www.tripblab.com/Airports.aspx (Zugriff: 14.11.2007).

Tröndle, Georg (2001): Berechnung flexibler 4D-Flight Management System Trajektorien für die ökonomische und zeitgenaue Flugführung im zukünftigen Luftverkehr, Verlag Dr. Köster, Berlin (D).

Unique (2007): Webpage Ankünfte. http://www.flughafen-zuerich.ch/ZRH/?ID_site=1&le=2&d=flgII_cache/arrivals.aspx&ID=2&coo=1&sp=de&u=24&ID_level1=1&ID_level2=2&ID_level3=327&t=n%E4chster%20Tag&a3=327 (Zugriff: 17.11.2007).

Universität Karlsruhe (2006): Algorithmus der Woche – Kürzeste Wege, Institut für Informatik, Algorithmik II. http://algo2.iti.uni-karlsruhe.de/adw.php (Zugriff: 07.08.2007).

VATRoute (2007): Free Worldwide Flightplan Database. http://www.vatroute.net/web_showfp.php?dep=SBGR&dest=LSZH&routing=10759 (Zugriff: 11.10.2007).

Verschwörungen.Info (2007): Chemtrails. http://www.verschwoerungen.info/wiki/Chemtrails (Zugriff: 27.08.2007).

Volare Flight Crew Operating Manual, (2000) "In Flight Performance", Long Range Cruise, 3.05.15 P13, SEQ200, REV 30: V4L MSN 1125 1259.

Wikipedia (2007): Online Enzyklopädie, folgende Begriffe:
Abweitung (Zugriff 03.10.2007).
Dijkstra-Algorithmus (Zugriff: 03.10.2007).
Effizienz (Zugriff: 02.09.2007)
Fuss (Zugriff: 08.10.2007)
Hochland von Tibet (Zugriff: 10.10.2007).
Kerosin (Zugriff: 04.10.2007).
Luftfahrt-Drehkreuz: (Zugriff: 05.10.2007).
NAT (Zugriff: 16.05.2007)
Optimierung (Zugriff: 02.09.2007)
Trajektorie (Zugriff: 18.08.2007)

Wolper, James S. (2001): Understanding Mathematics for Aircraft Navigation, McGraw-Hill, New York (USA).

Anhang

A Kondensstreifen

Kondensstreifen werden definiert als „weiße, streifenförmige Gebilde aus Wassertröpfchen oder Eiskristallen, die sich durch Kondensation von Wasserdampf in den Flugzeugabgasen bilden, wenn die Luft in Flughöhe genügend feucht und kalt ist.“[142] Kondensstreifen werden häufig auch als durch den Menschen verursachte Cirrus Wolken bezeichnet. Die ersten Beobachtungen von Kondensstreifen gehen auf die 1920er Jahre zurück. An Bedeutung gewannen die Kondensstreifen im 2. Weltkrieg, als hoch fliegende Bombergeschwader durch Kondensstreifen ihre Position und Richtung verraten haben sowie Probleme durch Sichtbehinderungen für die weiter hinten fliegenden Piloten auftraten. Die US Air Force hat darauf hin zahlreiche Studien zum Auftreten von Kondensstreifen durchgeführt. 1953 hat H. Appleman eine Methode zur Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Kondensstreifen durchgeführt. Diese Methode wurde seither nur geringfügig angepasst. In den letzten Jahren hat die verstärkte Diskussion über den Effekt von Kondensstreifen auf den Strahlungshaushalt der Erde das Interesse an Kondensstreifen aus einer anderen Perspektive geweckt. Weiter existieren Theorien unter dem Begriff Chemtrails[143] darüber, dass Kondensstreifen bewusstes Versprühen von Chemikalien mit Angabe unterschiedlichster Ziele darstellen[144], welche jedoch wissenschaftlich unhaltbar sind und daher als Verschwörungstheorie bezeichnet werden.

A.I Entstehung von Kondensstreifen

Bei der Verbrennung von Kerosin durch Flugzeugtriebwerke entstehen hauptsächlich Kohlendioxid, Wasserdampf, Stickoxide und Russ. Bei der Durchmischung der heissen Abgase mit der kalten Umgebungsluft kondensiert der freigesetzte Schwefelsäuredampf auf den Russpartikeln und bildet so durch Nukleationsprozesse kleine Tröpfchen. Diese Tröpfchen wachsen bei genügend kalter und feuchter Umgebungsluft durch die Aufnahme von weiteren

[142] http://lexikon.meyers.de/.
[143] zusammengesetztes Wort aus den englischen Wörtern chemical und contrail.
[144] http://www.verschwoerungen.info/.

Wasserdampfmolekülen an und gefrieren zu Eiskristallen. Die Eiskristalle sorgen dafür, dass ein Kondensstreifen sichtbar ist, indem das Sonnenlicht in den Wasserdampfmolekülen gebrochen wird. In der Regel erscheint ein Kondensstreifen weiss, kann jedoch unter bestimmten Einfallwinkeln des Sonnenlichts auch andere, zum Beispiel regenbogenähnliche Farben annehmen.[145]

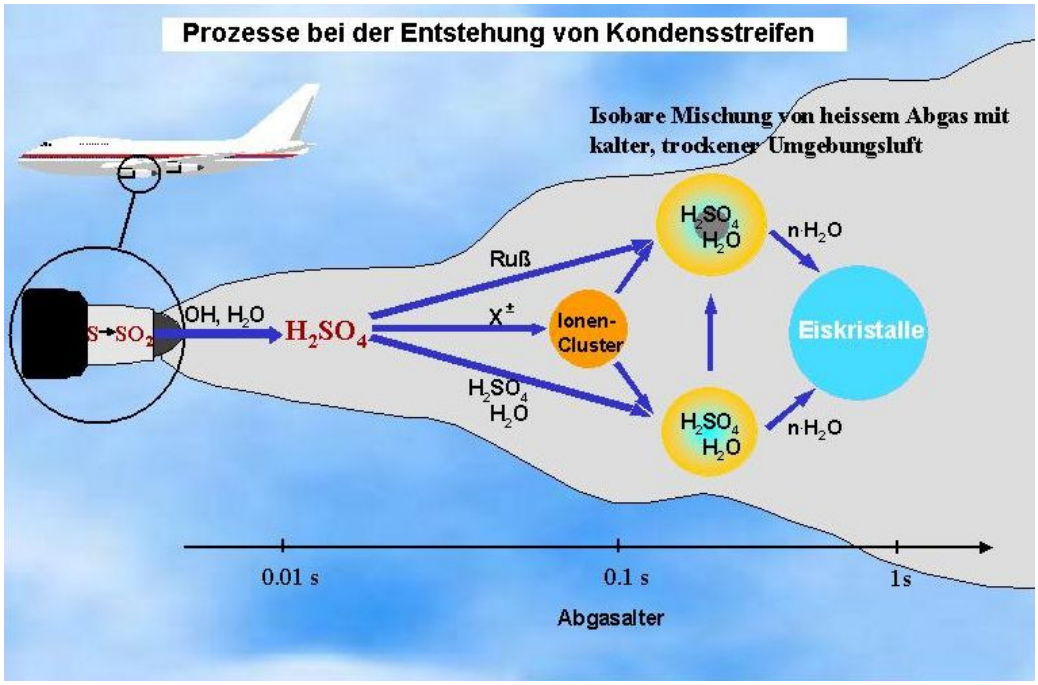


Abbildung 87: Prozesse bei der Entstehung von Kondensstreifen[146]

Die wesentlichen Einflussparameter auf die Entstehung von Kondensstreifen sind Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Dieser Zusammenhang wurde von H. Appleman in der folgenden Abbildung 88 festgehalten:

[145] http://wolkengalerie.mpch-mainz.mpg.de/.
[146] http://wolkengalerie.mpch-mainz.mpg.de/.

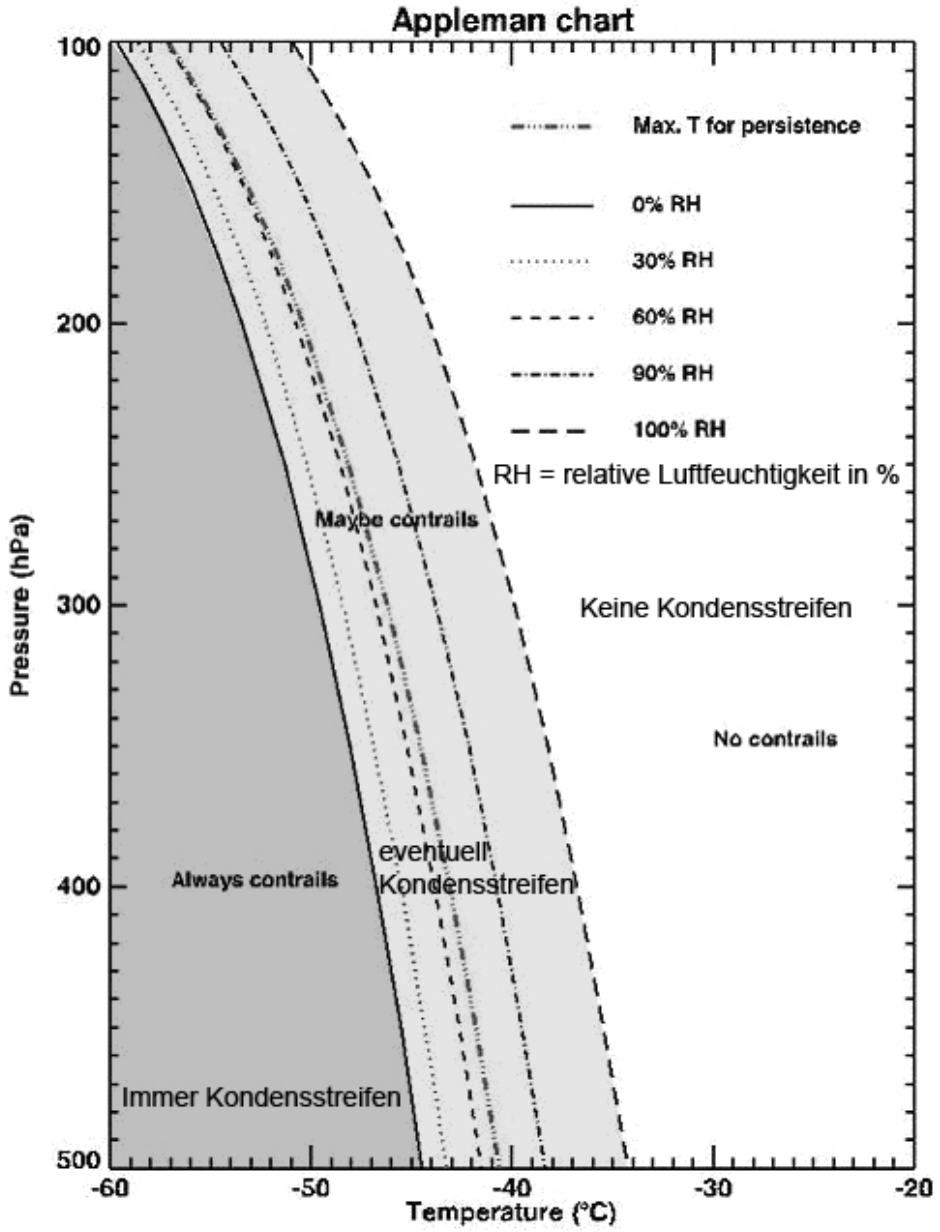


Abbildung 88: Appleman-Chart, zeigt Abhängigkeit der Kondensstreifen-Bildung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit.[147]

[147] NASA.

B EUROCONTROL

B.I Liste aller berücksichtiger Destinationen:

- Ägypten: Hurghada, Kairo, Sharm-el-Sheik
- Belgien: Brüssel
- Dänemark: Copenhagen
- Deutschland: Berlin, Düsseldorf, Frankfurt, Hamburg, Hannover, Köln, München, Nürnberg, Stuttgart
- England: Birmingham, Jersey, London City, London Heathrow, London Stansted, Manchester, St. Mawgan
- Holland: Amsterdam
- Italien: Mailand, Olbia, Rom, Venedig
- Frankreich: Nizza, Paris
- Griechenland: Araxos, Athen, Heraklion, Kos, Korfu, Rhodos, Santorini, Thessaloniki, Zakynthos
- Irland: Nock, Shannon
- Island: Keflavik
- Israel: Tel Aviv
- Kosovo: Pristina
- Libyen: Tripolis
- Luxemburg: Luxemburg
- Österreich: Wien
- Polen: Warschau
- Portugal: Faro, Lissabon, Porto
- Rumänien: Bucharest
- Russland: Moskau
- Tschechien: Prag
- Schweden: Stockholm
- Schweiz: Basel, Genf, Lugano, Zürich
- Schottland: Inverness
- Serbien: Belgrad
- Spanien: Barcelona, Fuerteventura, Ibiza, Las Palmas, Mahon, Malaga, Madrid, Palma de Mallorca, Reus, Valencia

- Tunesien: Djerba, Monastir
- Türkei: Antalya, Bodrum, Istanbul,
- Ungarn: Budapest

B.II Liste aller Strecken und der Flugfrequenz 04.-10.07.2007

DEP	DES	Routing	Frequenz
LSZH	LSGG	ZRH-GVA	64
LSGG	LSZH	GVA-ZRH	63
LSZH	EGLC	ZRH-LCY	46
EGLC	LSZH	LCY-ZRH	45
LSZH	EGLL	ZRH-LHR	42
LSZH	LFPG	ZRH-CDG	42
EGLL	LSZH	LHR-ZRH	42
LFPG	LSZH	CDG-ZRH	42
LSZH	EBBR	ZRH-BRU	41
LSZH	EDDS	ZRH-STR	41
EBBR	LSZH	BRU-ZRH	41
EDDS	LSZH	STR-ZRH	41
LIMC	LSZH	MXP-ZRH	40
LSZH	LIMC	ZRH-MXP	40
LSZH	EDDF	ZRH-FRA	35
EDDF	LSZH	FRA-ZRH	35
LSGG	EGLC	GVA-LCY	32
EGLC	LSGG	LCY-GVA	31
LSZH	EHAM	ZRH-AMS	28
LSZH	EDDV	ZRH-HAJ	28
LIRF	LSZH	FCO-ZRH	28
EHAM	LSZH	AMS-ZRH	28
LFMN	LSZH	NCE-ZRH	28
LSZH	LFMN	ZRH-NCE	28
LSZH	LIRF	ZRH-FCO	28
LSZH	LOWW	ZRH-VIE	28
LSZH	LSZA	ZRH-LUG	28
LOWW	LSZH	VIE-ZRH	28
EDDV	LSZH	HAJ-ZRH	28
LSZA	LSZH	LUG-ZRH	28
LSZH	EDDL	ZRH-LUX	27
LSZH	EDDN	ZRH-NUE	27
EDDL	LSZH	DUS-ZRH	27
EDDN	LSZH	NUE-ZRH	27
LSZH	EDDM	ZRH-MUC	26
EDDM	LSZH	MUC-ZRH	26
LSZH	EDDT	ZRH-TXL	22

DEP	DES	Routing	Frequenz
LROP	LSZH	OTP-ZRH	7
LSZH	LGTS	ZRH-SKG	7
LSZH	LPPT	ZRH-LIS	7
LSZH	LROP	ZRH-OTP	7
LSZH	LYBE	ZRH-BEG	7
LPPT	LSZH	LIS-ZRH	7
LSGG	LKPR	GVA-PRG	7
LSGG	LEVC	GVA-VCE	6
LEVC	LSGG	VLC-GVA	5
LEBL	LFSB	BCN-BSL	5
LFSB	LEBL	BSL-BCN	5
LFSB	LFMN	BSL-NCE	4
LTAI	LSZH	AYT-ZRH	4
LKPR	LFSB	PRG-BSL	4
LFSB	LHBP	BSL-BUD	4
LFMN	LFSB	NCE-BSL	4
LSZH	LTAI	ZRH-AYT	4
LFSB	LKPR	BSL-PRG	4
LHBP	LFSB	BUD-BSL	4
LFSB	EGCC	BSL-MAN	3
EGCC	LFSB	MAN-BSL	3
EPWA	LFSB	WAW-BSL	3
LSZH	HLLT	ZRH-TIP	3
HLLT	LSZH	TIP-ZRH	3
LFSB	EPWA	BSL-WAW	3
LEIB	LSZH	IBZ-ZRH	2
LGKO	LSZH	KGS-ZRH	2
LSZH	LEIB	ZRH-IBZ	2
LSZH	LGKO	ZRH-KGS	2
LSGG	LEMG	GVA-AGP	2
LSZH	DTMB	ZRH-MIR	2
DTMB	LSZH	MIR-ZRH	2
LEVC	LSZH	VLC-ZRH	2
LEMG	LSGG	AGP-GVA	2
EGSS	LSGG	STN-GVA	1
LEPA	LSGG	PMI-GVA	1
LFSB	LGIR	BSL-HER	1

EDDH	LSZH	HAM-ZRH	22
LGAV	LSZH	ATH-ZRH	21
LSZH	EDDH	ZRH-HAM	21
LSZH	EKCH	ZRH-CPH	21
LSZH	LIPZ	ZRH-VCE	21
LSZH	EGCC	ZRH-MAN	21
LEBL	LSZH	BCN-ZRH	21
EPWA	LSZH	WAW-ZRH	21
EDDT	LSZH	TXL-ZRH	21
EGCC	LSZH	MAN-ZRH	21
LIPZ	LSZH	VCE-ZRH	21
LSZH	EPWA	ZRH-WAW	21
LSZH	LEMD	ZRH-MAD	21
LSZH	LGAV	ZRH-ATH	21
LSZH	LEBL	ZRH-BCN	21
EKCH	LSZH	CPH-ZRH	21
LSZH	LHBP	ZRH-BUD	21
LHBP	LSZH	BUD-ZRH	21
LEMD	LSZH	MAD-ZRH	21
LKPR	LSZH	PRG-ZRH	20
LSZH	EGBB	ZRH-BHX	20
EGBB	LSZH	BHX-ZRH	20
LSZH	LKPR	ZRH-PRG	20
LEBL	LSGG	BCN-GVA	14
LSZH	ESSA	ZRH-ARN	14
LSZH	ELLX	ZRH-LUX	14
LSZH	UUDD	ZRH-DME	14
UUDD	LSZH	DME-ZRH	14
LLBG	LSZH	TLV-ZRH	14
ELLX	LSZH	LUX-ZRH	14
LSZH	LLBG	ZRH-TLV	14
ESSA	LSZH	ARN-ZRH	14
LSGG	LEBL	GVA-BCN	14
LTBA	LSZH	IST-ZRH	13
LSZH	LTBA	ZRH-IST	13
LFSB	EGLC	BSL-LCY	12
EGLC	LFSB	LCY-BSL	12
LSZH	BKPR	ZRH-PRN	11
BKPR	LSZH	PRN-ZRH	11
LSZH	LEPA	ZRH-PMI	10
EBBR	LFSB	BRU-BSL	10
LFSB	EBBR	BSL-BRU	10
LEPA	LSZH	PMI-ZRH	10
LSZH	LEMG	ZRH-AGP	9
LEMG	LSZH	AGP-ZRH	9
LFSB	EHAM	BSL-AMS	7
LGTS	LSZH	SKG-ZRH	7

LSGG	EDDK	GVA-CGN	1
LSZH	EGPE	ZRH-INV	1
LSZH	LGIR	ZRH-HER	1
LGRP	LSZH	RHO-ZRH	1
DTTJ	LFSB	DJE-BSL	1
LFSB	LGKR	BSL-CFU	1
LFSB	HEGN	BSL-HRG	1
LGZA	LSZH	ZTH-ZRH	1
LGIR	LSZH	HER-ZRH	1
LFSB	LGKO	BSL-KGS	1
LFSB	LGRP	BSL-RHO	1
LGKO	LFSB	KGS-BSL	1
EGPE	LSZH	INV-ZRH	1
HEGN	LSZH	HRG-ZRH	1
LGSR	LSZH	JTR-ZRH	1
LSZH	LEMH	ZRH-MAH	1
HESH	LSZH	SSH-ZRH	1
LSGG	LEPA	GVA-PMI	1
LTFE	LSZH	BJV-ZRH	1
LSZH	EIKN	ZRH-NOC	1
LSZH	LGRX	ZRH-GPA	1
LSZH	LPFR	ZRH-FAO	1
DTTJ	LSZH	DJE-ZRH	1
GCFV	LSZH	FUE-ZRH	1
HEGN	LFSB	HRG-BSL	1
EGSS	LSZH	STN-ZRH	1
LSZH	HEGN	ZRH-HRG	1
LFSB	LSGG	BSL-GVA	1
LSZH	LGZA	ZRH-ZTH	1
LGRP	LFSB	RHO-BSL	1
LSZH	LGRP	ZRH-RHO	1
LSZH	GCLP	ZRH-LPA	1
LSZH	HESH	ZRH-SSH	1
LSZH	LGSR	ZRH-JTR	1
LSZH	EGJJ	ZRH-JER	1
LGKR	LSZH	CFU-ZRH	1
LFSB	LIEO	BSL-OLB	1
LSZH	LTFE	ZRH-BJV	1
LIEO	LFSB	OLB-BSL	1
LPFR	LSZH	FAO-ZRH	1
LEMH	LSZH	MAH-ZRH	1
LPPR	LSZH	OPO-ZRH	1
LSZH	LIEO	ZRH-OLB	1
LIEO	LSZH	OLB-ZRH	1
EGDG	LSZH	NQY-ZRH	1
LSZH	LERS	ZRH-REU	1
DTMB	LSGG	MIR-GVA	1

EHAM	LFSB	AMS-BSL	7
EIDW	LSZH	DUB-ZRH	7
HECA	LSZH	CAI-ZRH	7
LSGG	UUDD	GVA-DME	7
LSZH	EIDW	ZRH-DUB	7
LGAV	LSGG	ATH-ZRH	7
LYBE	LSZH	BEG-ZRH	7
LSZH	HECA	ZRH-CAI	7
LKPR	LSGG	PRG-GVA	7
LSGG	LGAV	GVA-ATH	7
UUDD	LSGG	DME-GVA	7
LROP	LSZH	OTP-ZRH	7

LSZH	LEVC	ZRH-VLC	1
LGIR	LFSB	HER-BSL	1
EINN	LSZH	SNN-ZRH	1
LSZH	LPPR	ZRH-OPO	1
LFSB	DTTJ	BSL-DJE	1
GCLP	LSZH	LPA-ZRH	1
LSZH	GCFV	ZRH-FUE	1
LERS	LSZH	REU-ZRH	1
BIKF	LSGG	KEF-GVA	1
LSGG	BIKF	GVA-KEF	1
LGKR	LFSB	CFU-BSL	1
LSZH	DTTJ	ZRH-DJE	1
LSGG	DTMB	GVA-MIR	1

B.III Liste der ECAC Länder

Albanien, Armenien, Azerbaijan, Belgien, Bosnien und Herzegowina, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Georgien, Griechenland, Grossbritannien, Holland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Litauen, Luxembourg, Malta, Mazedonien (ehemalige Republik von Jugoslawien), Moldawien, Monaco, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slovenien, Spanien, Tschechien, Türkei, Ukraine, Ungarn, Zypern

B.IV Zuteilung der Destinationen nach Regionen

Strecken und dazugehörige Himmelsrichtungen gemäss ihrer Symbolik.

BSL-BUD	E
GVA-VCE	E
BEG-ZRH	E
ZRH-BEG	E
ZRH-IST	E
ZRH-BUD	E
IST-ZRH	E
BUD-ZRH	E
ZRH-OTP	E
ZRH-VIE	E
BUD-BSL	E
VIE-ZRH	E
OTP-ZRH	E
ZRH-STR	N
ZRH-FRA	N
GVA-CGN	N

VLC-GVA	SW
REU-ZRH	SW
BSL-BCN	SW
VLC-ZRH	SW
BCN-GVA	SW
BCN-BSL	SW
ZRH-PMI	SW
BCN-ZRH	SW
GVA-BCN	SW
ZRH-BCN	SW
IBZ-ZRH	SW
PMI-ZRH	SW
FAO-ZRH	SW
ZRH-REU	SW
AGP-GVA	SW
ZRH-AGP	SW

ZRH-LUX	NW
ZRH-LUX	NW
LCY-GVA	NW
LCY-BSL	NW
STN-GVA	NW
BRU-BSL	NW
ZRH-AMS	NW
LCY-ZRH	NW
BRU-ZRH	NW
LHR-ZRH	NW
STN-ZRH	NW
LUX-ZRH	NW
ZRH-BRU	NW
AMS-ZRH	NW
ZRH-CDG	NW
MAN-ZRH	NW

BSL-NCE	S
NCE-ZRH	S
MXP-ZRH	S
ZRH-NCE	S
BSL-DJE	S
NCE-BSL	S
OLB-BSL	S
BSL-OLB	S
ZRH-OLB	S
DJE-BSL	S
OLB-ZRH	S
DJE-ZRH	S
ZRH-MXP	S
PMI-GVA	S
ZRH-DJE	S
ZRH-MIR	S

ZRH-PRN	SE
PRN-ZRH	SE
ZRH-VCE	SE
VCE-ZRH	SE
SKG-ZRH	SE
ZTH-ZRH	SE
HRG-ZRH	SE
GVA-ATH	SE
AYT-ZRH	SE
FCO-ZRH	SE
ATH-ZRH	SE
BJV-ZRH	SE
ZRH-FCO	SE
ZRH-ATH	SE
HRG-BSL	SE
KGS-ZRH	SE

BSL-AMS	N
STR-ZRH	N
ZRH-HAJ	N
DUS-ZRH	N
ZRH-HAM	N
AMS-BSL	N
HAJ-ZRH	N
ZRH-ARN	N
ARN-ZRH	N
CPH-ZRH	N
ZRH-CPH	N
FRA-ZRH	N
HAM-ZRH	N

ZRH-JER	W
OPO-ZRH	W
ZRH-OPO	W

ZRH-IBZ	SW
GVA-AGP	SW
ZRH-MAH	SW
ZRH-VLC	SW
AGP-ZRH	SW
ZRH-FAO	SW
ZRH-MAD	SW
MAD-ZRH	SW
LIS-ZRH	SW
ZRH-LIS	SW
FUE-ZRH	SW
ZRH-LPA	SW
MAH-ZRH	SW
ZRH-FUE	SW
LPA-ZRH	SW

NQY-ZRH	NW
BHX-ZRH	NW
ZRH-BHX	NW
MAN-BSL	NW
ZRH-INV	NW
DUB-ZRH	NW
ZRH-DUB	NW
ZRH-NOC	NW
INV-ZRH	NW
ZRH-LCY	NW
ZRH-MAN	NW
ZRH-LHR	NW
SNN-ZRH	NW
GVA-LCY	NW
BSL-LCY	NW
BSL-MAN	NW
KEF-GVA	NW
CDG-ZRH	NW
GVA-KEF	NW
BSL-BRU	NW

GVA-PMI	S
GVA-MIR	S
MIR-ZRH	S
TIP-ZRH	S
MIR-GVA	S
ZRH-TIP	S

ZRH-NUE	NE
ZRH-TXL	NE
ZRH-PRG	NE
BSL-WAW	NE
TXL-ZRH	NE
GVA-PRG	NE
BSL-PRG	NE
ZRH-MUC	NE
PRG-BSL	NE
PRG-ZRH	NE
ZRH-WAW	NE
PRG-GVA	NE
ZRH-DME	NE
GVA-DME	NE
MUC-ZRH	NE
WAW-BSL	NE
WAW-ZRH	NE
NUE-ZRH	NE
DME-GVA	NE
DME-ZRH	NE

ZRH-SKG	SE
ZRH-BJV	SE
BSL-HRG	SE
TLV-ZRH	SE
CFU-ZRH	SE
JTR-ZRH	SE
ZRH-HRG	SE
ZRH-ZTH	SE
BSL-RHO	SE
ZRH-TLV	SE
BSL-KGS	SE
ZRH-RHO	SE
ZRH-GPA	SE
HER-ZRH	SE
ZRH-KGS	SE
BSL-CFU	SE
RHO-ZRH	SE
RHO-BSL	SE
ZRH-SSH	SE
ATH-ZRH	SE
CAI-ZRH	SE
ZRH-CAI	SE
KGS-BSL	SE
BSL-HER	SE
ZRH-HER	SE
CFU-BSL	SE
ZRH-JTR	SE
ZRH-AYT	SE
HER-BSL	SE
SSH-ZRH	SE

Abbildung 89: Einteilung der Strecken in Regionen: N, NO, O, SO, S, SW, W, NW

B.V Weitere Resultate

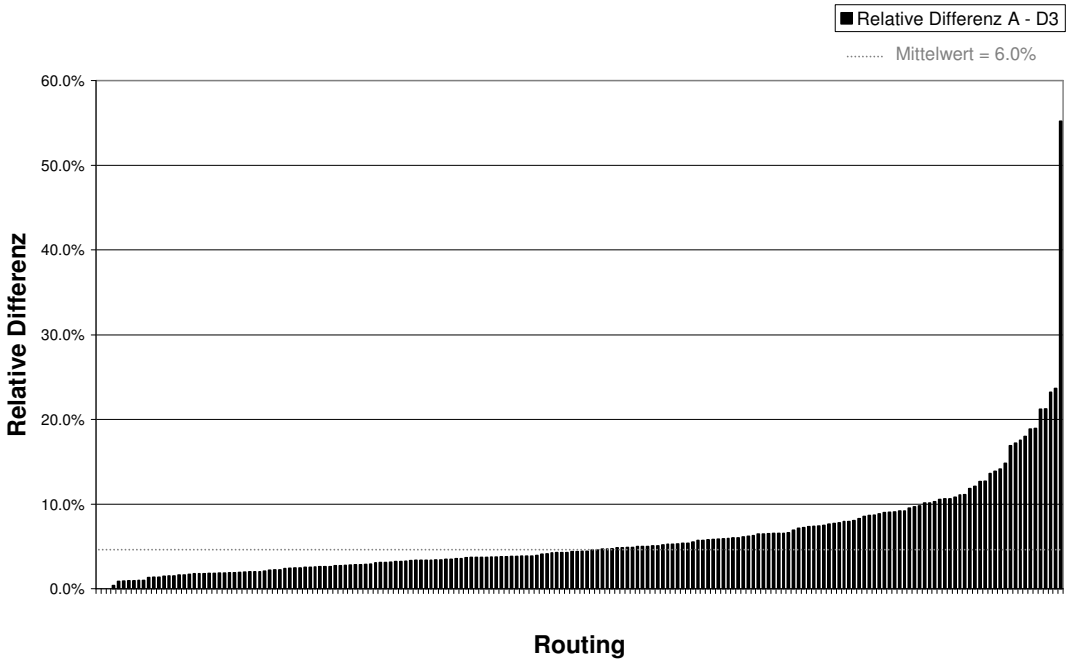


Abbildung 90: True Enroute Inefficiency, relativer Vergleich Actual (A) – Direct (D3), 192 Flüge.

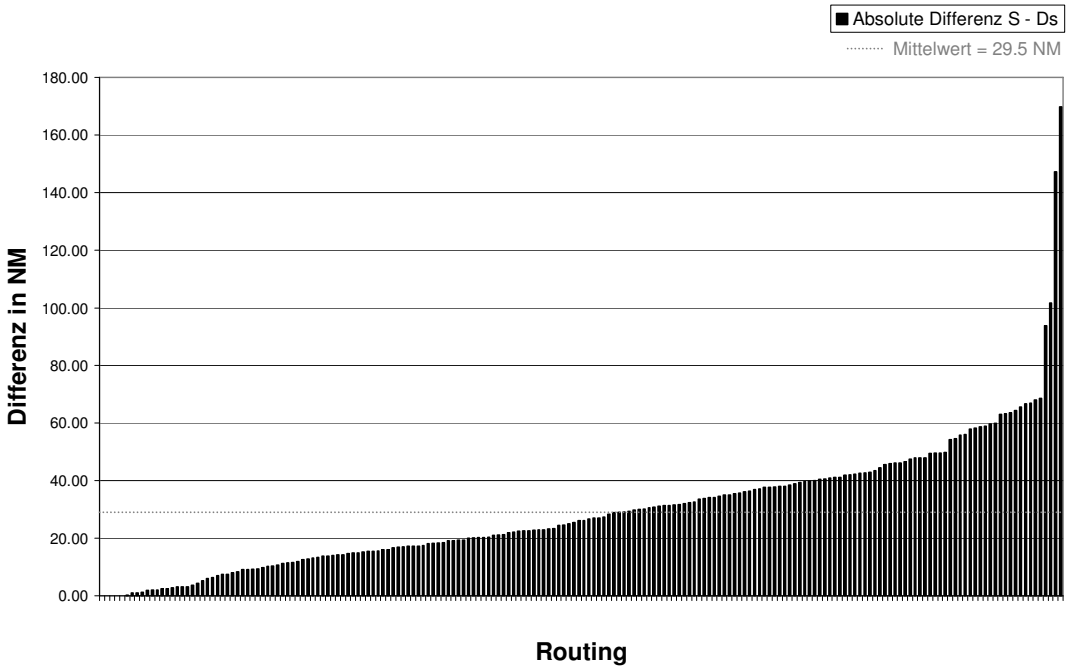


Abbildung 91: Route Design Inefficiency, absoluter Vergleich Shortest (S) – Direct (Ds), 192 Flüge.

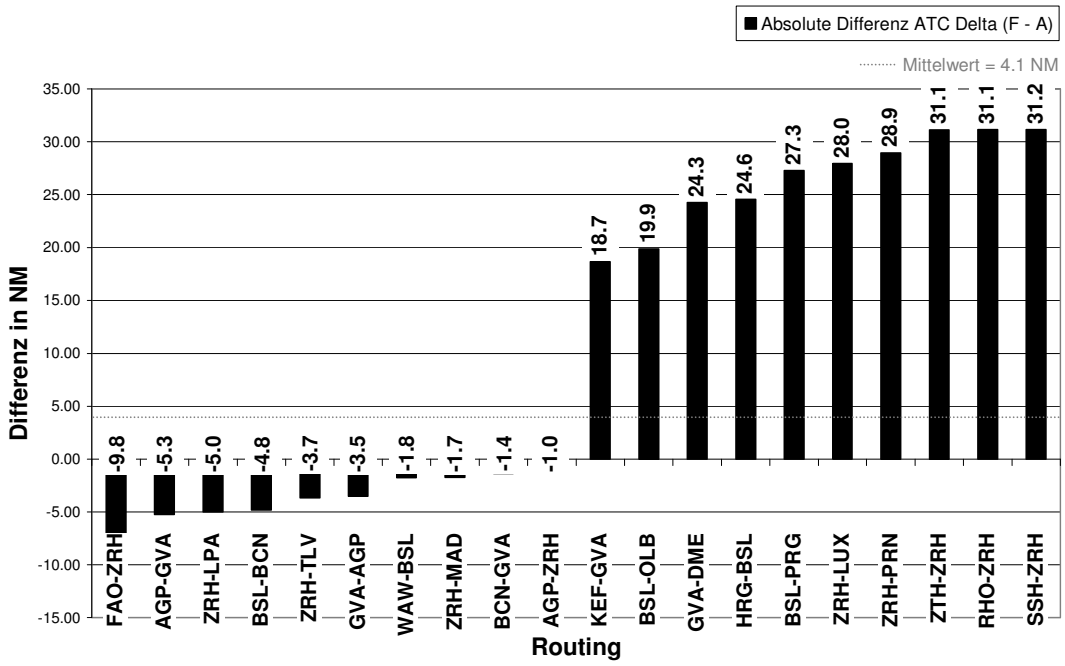


Abbildung 92: ATC Delta, absoluter Vergleich Filed (F) – Actual (A), geringste und grösste 10 Werte.

B.VI Resultate von EUROCONTROL zu den Swiss Daten

```
SAAM - 20/08/07
Route Length Extension Analysis (V2.0)

For detailed route length information, see file D:\SAAM_St

File: D:\SAAM_Studies\Swiss\070704_070710_m1_SWR.so6
Airport-circle radix (nm): 30.00

Distance        Number     Route       Direct      Extension
ranges(nm)      of Flt     Distance    Distance      (%)
[   0 -  150[      504     33612.97    32347.31       3.91%
[ 150 -  300[      569    130608.89   120238.59       8.62%
[ 300 -  500[      720    281892.21   262091.02       7.56%
[ 500 -  800[      285    179648.23   168305.55       6.74%
[ 800 - 1200[      166    156750.16   151438.73       3.51%
[1200 - more[       82    117809.85   113575.76       3.73%

Total:            2326    900322.32   847996.96       6.17%

============================================================
File: D:\SAAM_Studies\Swiss\070704_070710_m3_SWR.so6
Airport-circle radix (nm): 30.00

Distance        Number     Route       Direct      Extension
ranges(nm)      of Flt     Distance    Distance      (%)
[   0 -  150[      516     35185.97    33832.64       4.00%
[ 150 -  300[      567    129978.41   121273.69       7.18%
[ 300 -  500[      712    277799.62   259981.03       6.85%
[ 500 -  800[      284    178297.61   167972.06       6.15%
[ 800 - 1200[      176    168473.94   163137.15       3.27%
[1200 - more[       71    104270.22   100956.29       3.28%

Total:            2326    894005.77   847152.87       5.53%
```

Abbildung 93: Auswertung von EUROCONTROL mit Swiss Daten vom 04.-10.07.2007.[148]

[148] EUROCONTROL.

B.VII Resultate von EUROCONTROL zu den Euro Daten

```
SAAM - 20/08/07
Route Length Extension Analysis (V2.0)

For detailed route length information, see file D:\SAAM_Studies

File: D:\SAAM_Studies\Swiss\070704_070710_m1.so6
Airport-circle radix (nm): 30.00

Distance        Number     Route        Direct      Extension
ranges(nm)      of Flt     Distance     Distance       (%)
[   0 -  150[    36193   3114121.65   2982403.20        4.42%
[ 150 -  300[    46430  10224419.67   9645335.49        6.00%
[ 300 -  500[    33931  13305131.64  12510795.63        6.35%
[ 500 -  800[    31388  20178179.36  19115401.98        5.56%
[ 800 - 1200[    25137  24367933.09  23300825.06        4.58%
[1200 - more[    14499  21980594.93  21052629.17        4.41%

Total:          187578  93170380.33  88607390.52        5.15%

================================================================
File: D:\SAAM_Studies\Swiss\070704_070710_m3.so6
Airport-circle radix (nm): 30.00

Distance        Number     Route        Direct      Extension
ranges(nm)      of Flt     Distance     Distance       (%)
[   0 -  150[    36853   3169994.56   3052583.32        3.85%
[ 150 -  300[    46828  10293161.77   9805408.59        4.97%
[ 300 -  500[    33477  13115445.86  12463410.46        5.23%
[ 500 -  800[    31408  20177374.78  19274905.91        4.68%
[ 800 - 1200[    24718  23941946.82  23048322.11        3.88%
[1200 - more[    14292  21629444.43  20806552.40        3.95%

Total:          187576  92327368.23  88451182.79        4.38%
```

Abbildung 94: Auswertung von EUROCONTROL mit europaweiten Daten vom 04.-10.07.2007.[149]

[149] EUROCONTROL.

C LUFTHANSA

C.I ECON-fuel Lufthansa Boeing 747-400

ECONOMIC CRUISE

FL / SAT-C	GROSS WEIGHT – ton									
	380	370	360	350	340	330	320	310	300	290
390 −56	IAS/MACH N1 – % max. TAT – deg C FF/Eng. – kg/h SR – NAM/ton							267/.854 100.5/−12 2847 43.0	267/.855 98.5/ −6 2686 45.6	267/.855 96.7/ −2 2543 48.2
370 −56					279/.854 100.0/−11 3079 39.8	280/.854 98.2/ −7 2920 42.0	280/.855 96.6/ −2 2776 44.2	280/.855 95.3/ 2 2657 46.2	280/.856 94.2/ 5 2556 48.0	280/.856 93.2/ 9 2467 49.8
350 −54	292/.853 101.4/−14 3474 35.4	292/.853 99.6/ −6 3304 37.2	292/.854 98.0/ −3 3152 39.0	293/.854 96.7/ 2 3014 40.8	293/.854 95.5/ 5 2899 42.5	293/.855 94.5/ 7 2799 44.0	293/.855 93.6/ 10 2708 45.5	293/.856 92.8 2625 47.0	293/.856 92.0 2547 48.4	293/.856 91.3 2475 49.8
330 −50	306/.853 96.9/ 6 3276 37.9	306/.854 95.9/ 8 3160 39.3	306/.854 95.0/ 12 3055 40.6	306/.854 94.2/ 14 2962 41.9	306/.854 93.4 2878 43.2	306/.855 92.7 2800 44.4	306/.854 92.1 2728 45.6	306/.853 91.4 2654 46.7	305/.851 90.8 2581 47.9	303/.848 90.1 2506 49.2
310 −46	319/.853 94.6/ 17 3214 38.9	319/.853 93.9/ 20 3131 40.0	319/.853 93.3 3054 41.0	319/.852 92.7 2979 42.0	318/.851 92.1 2906 43.0	317/.848 91:5 2829 44.0	316/.845 90.8 2752 45.0	314/.841 90.2 2676 46.1	313/.838 89.6 2603 47.2	311/.834 89.0 2532 48.3
290 −42	332/.850 93.1 3232 38.9	331/.848 92.5 3155 39.8	330/.845 92.0 3077 40.6	329/.842 91.4 3000 41.5	327/.839 90.8 2923 42.4	326/.835 90.3 2849 43.4	324/.832 89.7 2778 44.3	323/.828 89.2 2709 45.2	321/.825 88.6 2644 46.2	319/.821 88.1 2580 47.1
270 −38	341/.839 91.9 3250 38.5	340/.836 91.3 3173 39.3	338/.832 90.8 3100 40.1	337/.829 90.3 3028 40.8	335/.825 89.8 2957 41.7	334/.822 89.3 2889 42.5	332/.818 88.8 2824 43.3	331/.815 88.3 2759 44.1	329/.811 87.8 2696 44.9	327/.807 87.2 2634 45.7
250 −35	349/.825 90.8 3280 37.9	348/.822 90.3 3207 38.6	346/.819 89.8 3137 39.3	345/.815 89.3 3069 40.0	343/.812 88.9 3003 40.7	341/.808 88.4 2939 41.4	340/.804 87.9 2875 42.1	338/.801 87.3 2813 42.8	336/.797 86.8 2752 43.6	335/.793 86.3 2691 44.4
230 −31	357/.811 89.8 3317 37.1	355/.808 89.3 3251 37.7	354/.804 88.8 3185 38.3	352/.801 88.4 3121 38.9	350/.797 87.9 3057 39.6	349/.794 87.4 2994 40.2	347/.790 86.9 2931 40.9	345/.786 86.3 2868 41.6	343/.782 85.8 2806 42.3	341/.778 85.3 2744 43.1
200 −25	360/.774 87.6 3304 36.0	360/.774 87.3 3258 36.5	360/.774 86.9 3213 37.0	360/.774 86.6 3168 37.5	360/.774 86.2 3126 38.0	359/.771 85.8 3071 38.6	357/.767 85.3 3006 39.2	355/.763 84.8 2942 39.8	352/.758 84.2 2878 40.5	350/.753 83.7 2813 41.1
150 −15	360/.707 83.8 3285 33.7	360/.707 83.4 3239 34.2	360/.707 83.0 3194 34.7	360/.707 82.7 3151 35.1	360/.707 82.4 3109 35.6	360/.707 82.1 3070 36.0	360/.707 81.8 3032 36.5	360/.707 81.5 2997 36.9	360/.707 81.2 2964 37.3	357/.702 80.7 2900 37.9
100 −5	360/.647 80.1 3257 31.7	360/.647 79.7 3213 32.1	360/.647 79.3 3169 32.6	360/.647 79.0 3128 33.0	360/.647 78.7 3088 33.4	360/.647 78.4 3051 33.8	360/.647 78.1 3016 34.2	360/.647 77.8 2984 34.6	360/.647 77.5 2954 34.9	360/.647 77.3 2926 35.3

Shaded area indicates Optimum Altitude

Max. TAT not shown where Max. Cruise N1 can be set in ISA+30 C conditions
Increase/decrease % N1 required by 2 % per 10 C above/below Standard TAT
Increase/decrease Fuelflow by 2 % per 10 C above/below Standard TAT

Table is based on 3 PACKS – NORM FLOW
If operating 3 PACKS at HI FLOW increase Fuelflow by 1 %

Abbildung 95: Economic Cruise, Boeing 747-400.[150]

[150] Lufthansa.

C.II ATC Gebühren als Grund für Kostendifferenz MFT/ MTT

Die Differenz der ATC Gebühren (Abbildung 96 und Abbildung 97 beträgt 1487.22$, oder anders ausgedrückt betragen die ATC Gebühren beim MTT Flug knapp 73% derjeniger des MFT Fluges. Werden die Gesamtkosten um diese Differenz der Flugsicherungsgebühren bereinigt, so kostet der MFT Flug bei einer nahezu identischen Flugzeit weniger. Die Differenz fällt mit (66762$ - 5440$ =) 61322$ für den MFT gegenüber (65430$ - 3953$ =) 61477$ für den MTT mit nur 155$ jedoch sehr gering aus. Dies entspricht auch den vorgängig gemachten Erklärungen. Anzumerken ist hier noch, dass die Berechnung der Kosten nicht zu 100% den tatsächlichen Kosten entspricht und ein Vergleich aus dieser Überlegung wenig aussagefähig ist. Wesentlich ist jedoch die Feststellung, dass die Flugsicherungsgebühren stark variieren können (Beispiel: United Kingdom).

ATC Charges

ATC Charges Region	From *	To *	Charge Type	Local Charge	Local Currency	USD Charge
GERMANY INTL A/P	EDDF	EDDF	TNC	399.45	EUR	506.51
EUROCONTROL/GERMANY	EDDF	NUDRI	ERC	252.54	EUR	320.23
EUROCONTROL/BELGIUM	NUDRI	RAPOR	ERC	173.89	EUR	220.50
EUROCONTROL/FRANCE	RAPOR	KOKOS	ERC	1357.20	EUR	1720.93
EUROCONTROL/FRANCE	BETUV	MOSIS	ERC	0.00	DMY	0.00
EUROCONTROL/UNITED KINGDOM	MOSIS	TAKAS	ERC	130.37	EUR	165.31
EUROCONTROL/IRELAND	TAKAS	LASNO	ERC	67.56	EUR	85.68
SHANWICK	LASNO	N4600W020	ERC	56.01	GBP	105.64
SHANWICK IRELAND COMM	LASNO	N4600W020	COM	39.75	EUR	50.40
BI/BG/EK EAST	N4700W015	N4600W020	ERC	17.39	GBP	32.80
EUROCONTROL/SANTA MARIA	N4600W020	N4000W040	ERC	587.76	EUR	745.29
BAHAMAS	GRATX	KMIA	ERC	0.00	USD	0.00

Time Costs 0.00 USD Total ATC Charge 3953.29 USD

Abbildung 96: ATC Gebühren auf dem MTT Flug Frankfurt – Miami vom 21. August 2007.[151]

[151] Lufthansa

ATC Charges

ATC Charges Region	From *	To *	Charge Type	Local Charge	Local Currency	USD Charge
GERMANY INTL A/P	EDDF	EDDF	TNC	399.45	EUR	506.51
EUROCONTROL/GERMANY	EDDF	TINIK	ERC	340.85	EUR	432.20
EUROCONTROL/NETHERLANDS	TINIK	EVOSA	ERC	37.19	EUR	47.17
EUROCONTROL/BELGIUM	EVOSA	LUMEN	ERC	560.34	EUR	710.51
EUROCONTROL/NETHERLANDS	LUMEN	LUMEN	ERC	0.00	DMY	0.00
EUROCONTROL/BELGIUM	LUMEN	RAPIX	ERC	0.00	DMY	0.00
EUROCONTROL/UNITED KINGDOM	RAPIX	LESLU	ERC	1596.49	EUR	2024.36
EUROCONTROL/IRELAND	LESLU	BEDRA	ERC	430.54	EUR	545.93
BI/BG/EK EAST	BEDRA	BEDRA	ERC	17.39	GBP	32.80
SHANWICK	BEDRA	N4500W030	ERC	56.01	GBP	105.64
SHANWICK IRELAND COMM	BEDRA	N4500W030	COM	39.75	EUR	50.40
BI/BG/EK EAST	N4500W030	N4500W030	ERC	0.00	DMY	0.00
BI/BG/EK 30WEST	N4500W030	N4500W030	ERC	17.39	GBP	32.80
EUROCONTROL/SANTA MARIA	N4500W030	N4100W040	ERC	378.63	EUR	480.11
USA CONTINENTAL	N4100W040	LAZEY	ERC	472.08	USD	472.08
USA CONTINENTAL	N3100W068	KMIA	ERC	0.00	DMY	0.00

Time Costs 0.00 USD Total ATC Charge 5440.51 USD

Abbildung 97: ATC Gebühren auf dem MFT Flug Frankfurt – Miami vom 21. August 2007.[152]

Für die vorliegende Studie wurde aus den gemachten Überlegungen zu MFT und MTT der Wert *AirwOpt* als MFT berechnet, da dies auch der in der Praxis verwendete Wert ist.

C.III Berechnung der Rasterauflösung für die Werte Grid

Berechnungsgrössen:

Breitengrad: Eine Breitenminute entspricht 1 NM.

Längengrad: (Erdumfang/360) * cos (Breitengrad) = Distanz für 1 Längengrad[153]

1 Grad = 60 Minuten

Erdumfang = 21598 NM

Rasterauflösung auf dem *Äquator*:

Breitengrad: 30 Breitenminuten = 30 x 1 NM = 30 NM

Längengrad: 30 Längenminuten = [(21600/360)*cos 0º]/2 = 30 NM

Rasterauflösung bei *50º Nord*:

[152] Lufthansa.
[153] http://de.wikipedia.org.

Breitengrad: 30 Breitenminuten = 30 x 1 NM = 30 NM

Längengrad: 30 Längenminuten = [(21600/360)*cos 50º]/2 = 19.28 NM

Rasterauflösung bei *70º Nord*:

Breitengrad: 30 Breitenminuten = 30 x 1 NM = 30 NM

Längengrad: 60 Längenminuten = [(21600/360)*cos 70º] = 20.52 NM

C.IV Dijkstra Algorithmus: Beispiel

Berechnung des kürzesten Weges auf den Hauptverkehrsachsen zwischen Frankfurt und München in neun Schritten:

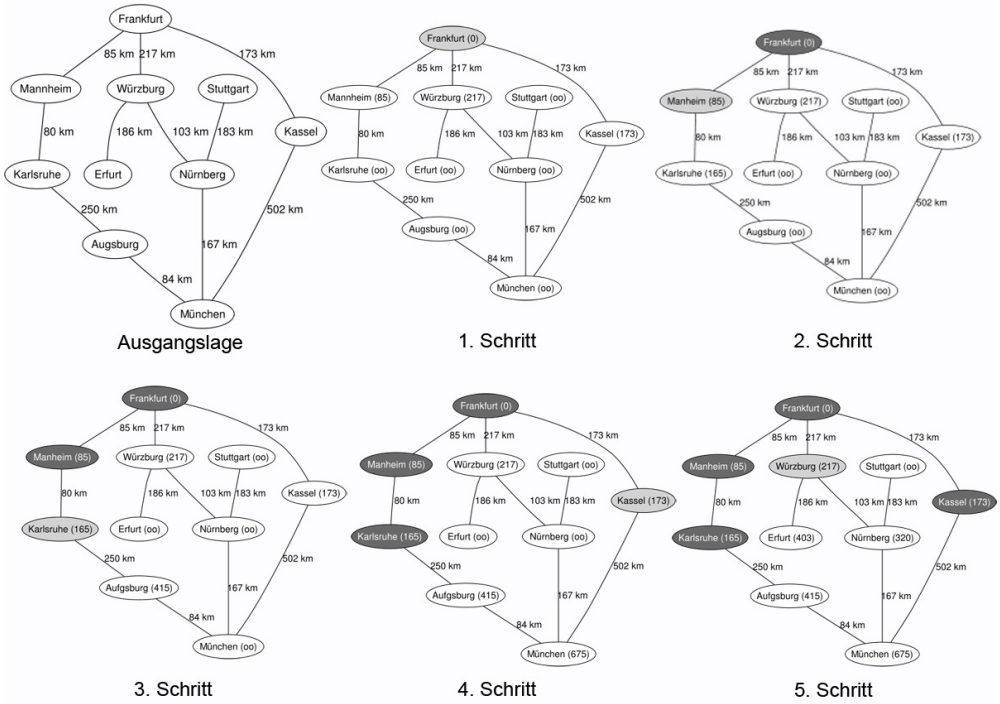


Abbildung 98: Beispiel für Dijkstra-Algorithmus, Schritte 1 bis 5.[154]

[154] http://www.wikipedia.de.

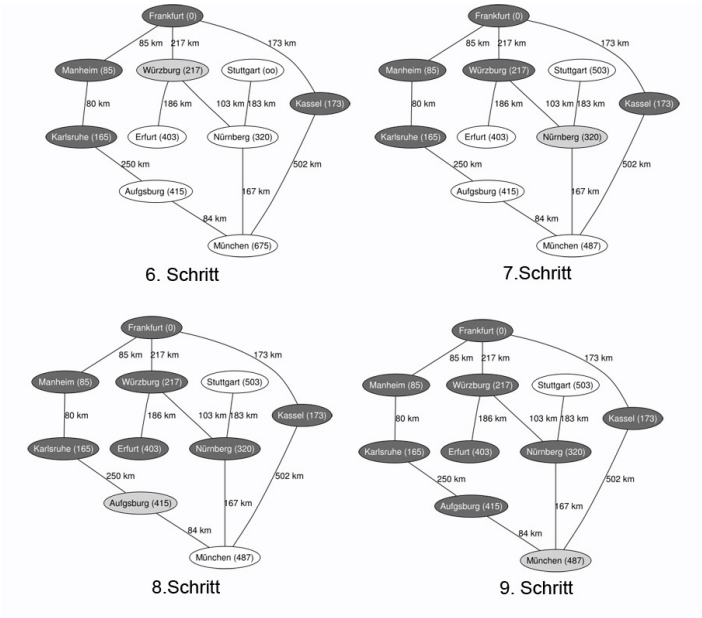


Abbildung 99: Beispiel für Dijkstra-Algorithmus, Schritte 6 bis 9.[155]

Wichtig ist bei der Betrachtung der Fokus auf das jeweilige Total der Distanz der Verbindungen. Nach dem zweiten Schritt ist der Weg nach Karlsruhe mit Total 165km kürzer als die Alternativen nach Kassel (173km) und Würzburg (217km), weshalb im 3.Schritt die Verbindung nach Karlsruhe angegeben wird. Für den 4.Schritt ist dann jedoch Kassel mit Total 173km kürzer als die Alternativen Würzburg (217km) und Augsburg (415km). So wird jeweils stets die kürzeste Verbindung weiter verfolgt, bis der Weg über Würzburg und Nürnberg als kürzeste Verbindung feststeht.

C.V Treibstoffverbrauch Boeing 747-400

12'790 Liter Kerosin pro Stunde[156]

Dichte von Kerosin je nach Temperatur etwa 0,747 - 0,84 g/cm^3, für die Berechnung 800g/ Liter Kerosin[157]

Berechnung: 12'790 * 0.8kg = 10'232 kg/ h = gerundet 10 Tonnen (t) =
10t/ 60min = 1/6 t pro min = 1t pro 6 min

[155] http://www.wikipedia.de
[156] http://www.bredow-web.de/.
[157] http://de.wikipedia.org.

C.VI Extra Fuel Boeing 747-400

TRIP 117601 11.05 ....

CONT 20M 3536 00.20 ....

ALTN 3648 00.22 EDDK ....

FINAL RES 3895 00.30 ....

PLNTOF 128680 12.17 .... ONE TWO EIGHT

DIFF ....

PLNTOF .... (CORRECTED)

EXTRA .... POSS 24783T ....

TOF ....

TAXI .... 675/00.15 .....

BLOCK ..... TCAP 162750 ..... REM FUEL ..... AT ....

ZFW CORR PS 1000 PLNTOF PS 509 / MS 1000 PLNTOF MS 511
2000 FT BELOW TRIP PS 495 / TIME 11.10
4000 FT BELOW TRIP PS 1919 / TIME 11.19
--- --- --- --- --- --- ---
ANALYSED EXTRA FUEL SUMMARY
NO EXTRA FUEL DATA FOR THIS FLIGHT AVAILABLE
--- --- --- --- --- --- ---

NO TANKERING RECOMMENDED (P)

LOSS FOR EXTRA FUEL: 233 US$/TO

TRIP 40796 04.17 ....

CONT 5% 2040 00.13 ....

ALTN 5673 00.33 OIFM ....

FINAL RES 3811 00.30 ....

PLNTOF 52320 05.33 .... FIVE TWO THREE

DIFF ....

PLNTOF .... (CORRECTED)

EXTRA .... POSS 42149L ....

TOF ....

TAXI .... 720/00.16 .....

BLOCK ..... TCAP 162750 ..... REM FUEL ..... AT ....

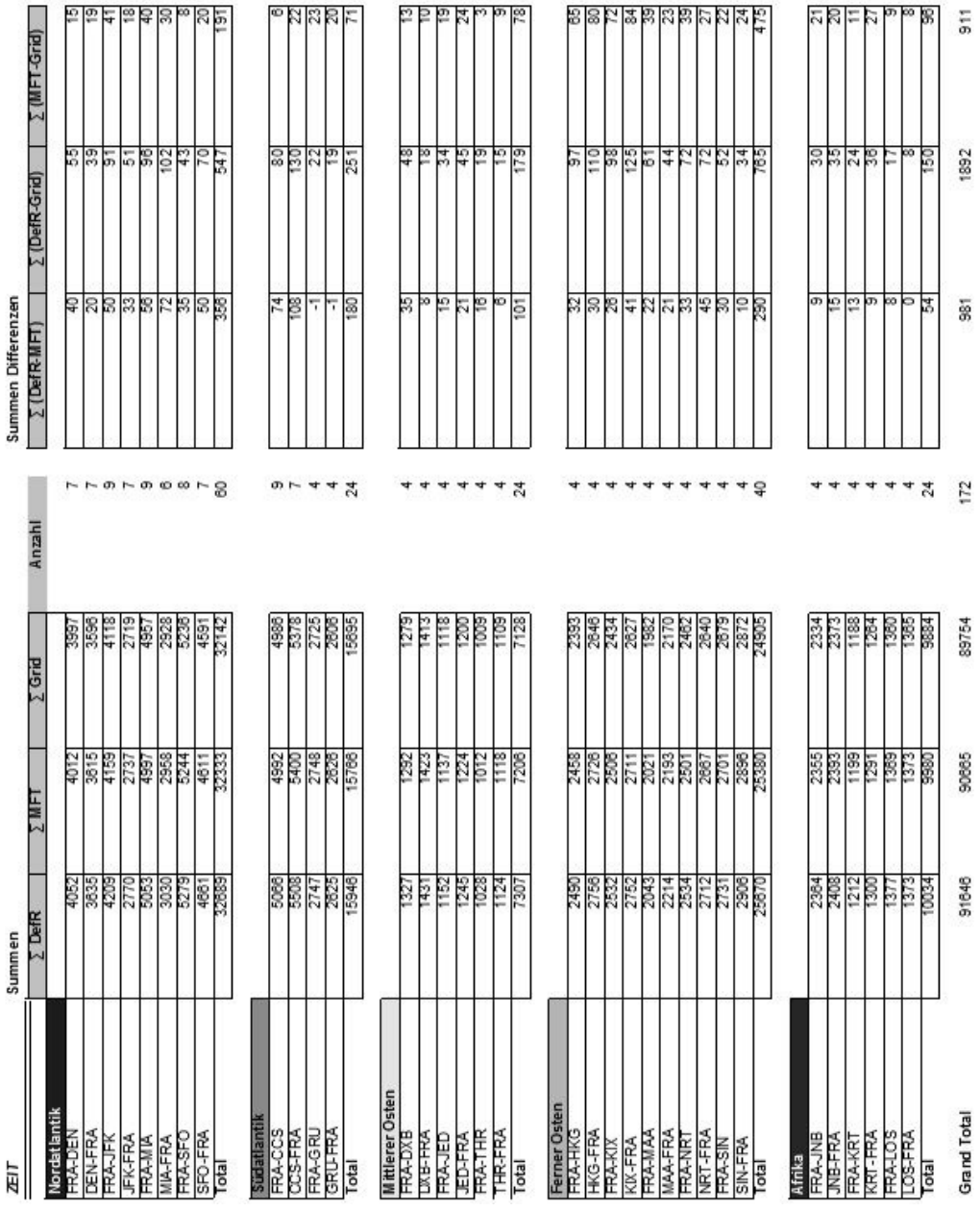
ZFW CORR PS 1000 PLNTOF PS 202 / MS 1000 PLNTOF MS 195
2000 FT BELOW TRIP PS 99 / TIME 04.20
4000 FT BELOW TRIP PS 535 / TIME 04.24
--- --- --- --- --- --- ---
ANALYSED EXTRA FUEL SUMMARY
NO EXTRA FUEL DATA FOR THIS FLIGHT AVAILABLE
--- --- --- --- --- --- ---

NO TANKERING RECOMMENDED (P)

Abbildung 100: Flug Osaka – Frankfurt (links) und Flug Frankfurt - Teheran, Briefing Packages. Die Intransparenz der Treibstoffpreise reduziert die Aussagekraft, weshalb dies lediglich als anschauliches Beispiel gewertet werden darf.[158]

[158] Lufthansa.

C.VII Excel Tabelle Lufthansa Studie



ZEIT	Summen				Summen Differenzen		
	∑ DefR	∑ MFT	∑ Grid	Anzahl	∑ (DefR-MFT)	∑ (DefR-Grid)	∑ (MFT-Grid)
Nordatlantik							
FRA-DEN	4052	4012	3997	7	40	55	15
DEN-FRA	3835	3815	3596	7	20	39	19
FRA-JFK	4209	4159	4118	9	50	91	41
JFK-FRA	2770	2737	2719	7	33	51	18
FRA-MIA	5053	4997	4957	9	56	96	40
MIA-FRA	3030	2958	2928	6	72	102	30
FRA-SFO	5279	5244	5236	8	35	43	8
SFO-FRA	4661	4611	4591	7	50	70	20
Total	32889	32333	32142	60	356	547	191
Südatlantik							
FRA-CCS	5066	4992	4986	9	74	80	6
CCS-FRA	5508	5400	5378	7	108	130	22
FRA-GRU	2747	2748	2725	4	-1	22	23
GRU-FRA	2825	2826	2806	4	-1	19	20
Total	15946	15766	15895	24	180	251	71
Mittlerer Osten							
FRA-DXB	1327	1292	1279	4	35	48	13
DXB-FRA	1431	1423	1413	4	8	18	10
FRA-JED	1152	1137	1118	4	15	34	19
JED-FRA	1245	1224	1200	4	21	45	24
FRA-THR	1028	1012	1009	4	16	19	3
THR-FRA	1124	1118	1109	4	6	15	9
Total	7307	7206	7128	24	101	179	78
Ferner Osten							
FRA-HKG	2490	2458	2393	4	32	97	65
HKG-FRA	2756	2726	2646	4	30	110	80
FRA-KIX	2532	2506	2434	4	26	98	72
KIX-FRA	2752	2711	2627	4	41	125	84
FRA-MAA	2043	2021	1982	4	22	61	39
MAA-FRA	2214	2193	2170	4	21	44	23
FRA-NRT	2534	2501	2482	4	33	72	39
NRT-FRA	2712	2667	2640	4	45	72	27
FRA-SIN	2731	2701	2679	4	30	52	22
SIN-FRA	2906	2896	2872	4	10	34	24
Total	25670	25380	24905	40	290	765	475
Afrika							
FRA-JNB	2364	2355	2334	4	9	30	21
JNB-FRA	2408	2393	2373	4	15	35	20
FRA-KRT	1212	1199	1188	4	13	24	11
KRT-FRA	1300	1291	1264	4	9	36	27
FRA-LOS	1377	1369	1360	4	8	17	9
LOS-FRA	1373	1373	1365	4	0	8	8
Total	10034	9980	9884	24	54	150	96
Grand Total	91646	90665	89754	172	981	1892	911

C.VIII Beispiel Ausgangsdaten in Papierformat

Page 1

06-sep-2007 10:56:59 UTC

ANALYSIS

User: u094695

AL	Flt-No.	OS	Date
LH	246	B	31AUG07

DEP	STD	STA	DEST
EDDF	310745	311855	KSFO
25R	310745	311855	28R

Actualization Time
311224

OFP NO	1	2	3
ROUTE	DEFRTE	MFT/R	MFT/R
OPS Case	Standard ST	Standard ST	Standard ST
Prognosis	actual	actual	actual
Climb Procedure	Speed	Speed	Speed
Climb MN	0.850	0.850	0.850
Climb IAS	330	330	330
FIX MACH	Optimum MN	Optimum MN	Optimum MN
VSOPS	OFF	OFF	OFF
CRUISE	VRBL	VRBL	VRBL
Descent Procedure	Speed	Speed	Speed
Descent MN	0.850	0.850	0.850
Descent IAS	330	330	330
REM Fuel	0	0	0
Fuel Gravity	0.800	0.800	0.800
REG	DABTK	DABTK	DABTK
TRIP	117149	116207	115144
TTIME	1108	1105	1102
ETA	1909	1906	1903
COSTS	83996	83585	77681
CONT	3506	3497	3480
CONTPOL	CONT20M	CONT20M	CONT20M
ALTN	KOAK	KOAK	KOAK
AFUEL	2788	2788	2103
ATIME	0017	0017	0012
HOLDING	3901	3901	3901
PLNTOF	127344	126393	124628
P EXTRA	26119T	27070T	28835T
DIST	5124	5023	5081
AVG WC	M021	M027	M019
MAXZFW	242671	242671	242671
ESTZFW	232090	232090	232090
PLNZFW	232090	232090	232090
MALTOW	385553	385553	385553
PLNTOW	359434	358483	356718
MALLW	285763	285763	285763
PLNLW	242285	242276	241574
ADDFU	0	0	0
TCAP	162750	162750	162750
SAVINGS	0	0	0
MAX FL	0	0	0

Abbildung 101: Beispiel einer Fluganalyse mit Berechnung von CurRoute (OFP 1), AirwOpt (OFP 2) und FreeGrid (OFP 3), Flug FRA-SFO am 31.08.2007.[159]

[159] Lufthansa

C.IX Erklärung für die Nicht-Berücksichtigung von Zürich – Hong Kong

Hong Kong ist eine Destination, auf welcher vergleichsweise grosse Differenzen entstehen (Lufthansa Studie: Frankfurt – Hongkong Gesamtdifferenz 3.9%). Darüber hinaus ist jedoch die Tatsache, dass der optimale Flugweg nach Hong Kong über das Tibetanische Hochplateau führt, von besonderer Bedeutung. Dieses darf nur eingeschränkt überflogen werden, da im Falle einer Decompression ein Sinkflug auf höchstens 10.000 Fuss nach dem Aufbrauchen der bordeigenen Sauerstoffreserven möglich sein muss. Für die Versorgung mit Sauerstoff kann eine Fluggesellschaft wählen, ob sie ihre Flugzeuge mit Sauerstoffflaschen oder einem chemischen, Sauerstoff produzierenden Notsystem ausrüsten möchte. Letztere liefern nur Sauerstoff während einer kurzen feststehenden Zeit, nach der die vorgeschriebene Höhe von 10.000 Fuss erreicht sein muss. Bei Ausrüstung mit Sauerstoffflaschen kann über die Anzahl der Flaschen die Zeit variiert werden, innert derer der Sinkflug auf die vorgeschriebene Höhe stattfinden muss.[160] Da sich in unmittelbarer Nähe des Himalaja Gebirge ausgedehnte Hochlandebenen befinden (Hochland von Tibet, dazu gehören im wesentlichen Tibet, die chinesischen Provinzen Qinghai, Gansu und Xinjiang, Teile von Bhutan und Nepal sowie Nordindien; zu den wichtigsten Gebirgen gehören: Himalaja, Kunlun Shan, Qilian Shan – alle mit Bergspitzen bis mindestens 5800 m.ü.M.[161]) bestimmt Art der Notversorgung sowie die Anzahl Sauerstoffflaschen an Bord darüber, wie nahe am Zentrum des Tibetischen Hochlands geflogen werden darf bzw. wie weit der Flugweg zu einem Gebiet entfernt sein kann, wo diese 10.000 Fuss geflogen werden können (Höhenrestriktionen über hochgelegenen Gebieten). Es gibt im Wesentlichen eine Route, welche in einer geraden Linie über das Hochland führt (Airway L888), und eine andere, welche über einen lateralen Umweg in Zickzack-Form nördliche davon verläuft (Airway B215/ B330). Die Flugzeuge von Lufthansa verfügen über eine Sauerstoff Notversorgung, welche eine längere Flugzeit vom Moment des Druckabfalls bis zum Erreichen der tieferen Flughöhe zulässt, als es bei Swiss der Fall ist, weil Swiss Flugzeuge mit chemischen Sauerstoffgeneratoren ausgerüstet sind. Weiter verhalten sich die chinesischen Behörden bei der Vergabe von Flugbewilligungen restriktiv und wenig flexibel, sodass die mögliche Flugstrecke über das Hochland von Tibet (Airway L888, nur unter FANS Bedingungen) nicht für alle Fluggesellschaften frei gegeben und auch nicht flexibel wählbar ist.

[160] ICAO_Annex6_4.4.3.8, JAR_25_1.1441ff, JAR_OPS_1.385, JAR_OPS_1.760_1.770, JAR_OPS_1.770_App_1
[161] http://de.wikipedia.org.

Für Swiss ist die Ausrüstungsfrage dafür entscheidend, dass die Flugzeuge die Routen über das Hochland von Tibet nicht benützen können und die klassische Route B215/ B330 über Urumqi nehmen müssen. Auf dieser Strecke gibt es mehrere wesentliche Kursänderungen besonders in der Gegend von YBL, wodurch sich zusätzliche Umwege ergeben.

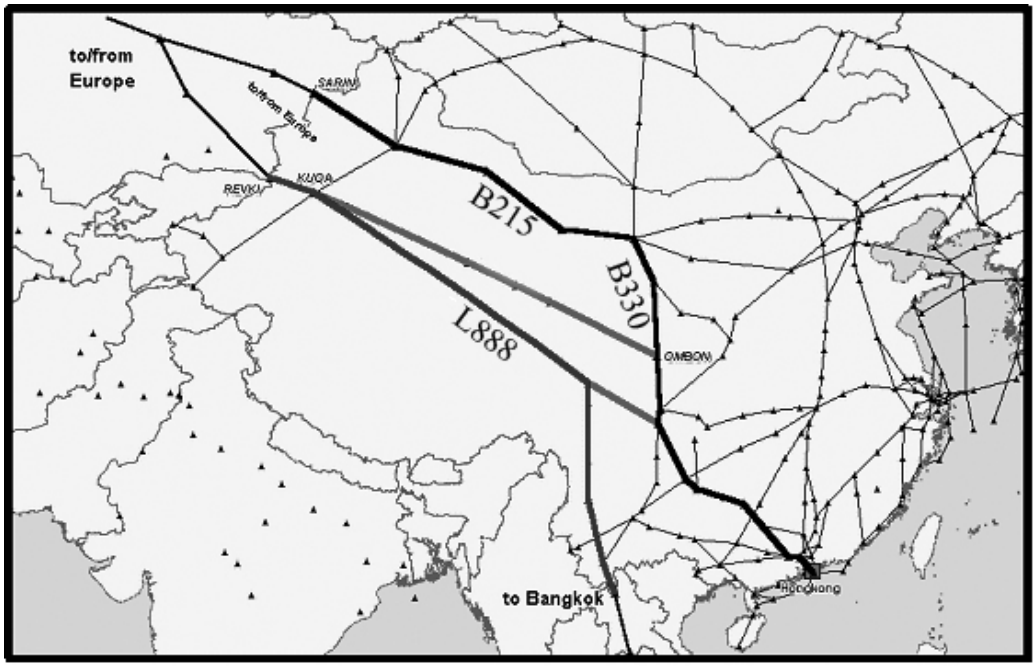


Abbildung 102: Klassische Strecke über Urumqi (B215/ B330) und L888 (FANS) Route über das Hochland von Tibet.[162]

Der Einbau einer Sauerstoff Notversorgung wie Lufthansa sie hat bedeutet zusätzliches Gewicht und zusätzlichen Wartungsaufwand. Diese beiden Faktoren sprechen dagegen, Flugzeuge damit auszurüsten, während die verkürzten Flugstrecken dafür sprechen. Das Abwägen dafür oder dagegen führte bei den beiden Fluggesellschaften auch aufgrund des geplanten Flotteneinsatzes zu unterschiedlichen Entscheiden mit der Konsequenz, dass Swiss auf der Hong Kong Strecke einen Umweg fliegt. Somit ergibt sich bei der Berechnung von Swiss (Free Flight Routing wurde ohne Restriktionen über das Hochland von Tibet gerechnet) ein deutlich grösserer Unterschied zwischen Free Flight und aktueller Route als bei Lufthansa. Diese Situation über dem Hochland von Tibet stellt neben Grönland (grossflächige Eislandschaften über 10'000 Fuss) eine weltweit einzigartige Gegebenheit mit Höhenrestriktionen bei Notfällen dar und lässt aus diesem Grund in einer Berechnung einen Extremwert erwarten.

[162] Streckenoptimierungen und deren wirtschaftliche Auswirkungen (Folie 20), Lufthansa.

Die folgenden beiden Kartenausschnitte Abbildung 103 und Abbildung 104 zeigen optisch den Unterschied der Flugwege der Lufthansa und Swiss Maschinen:

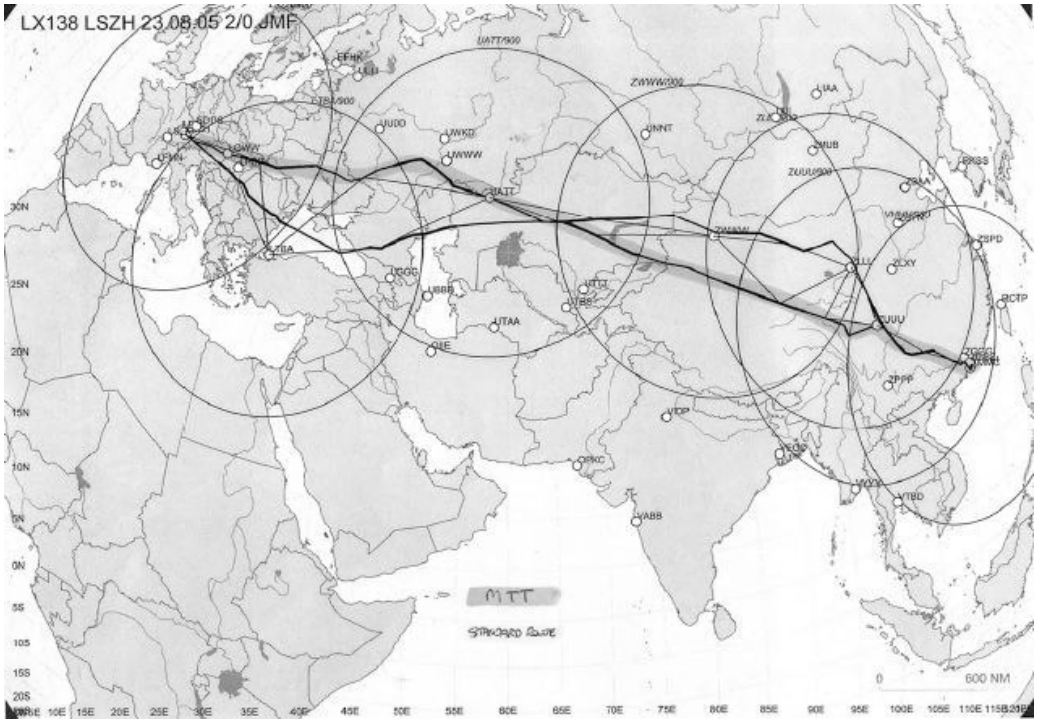
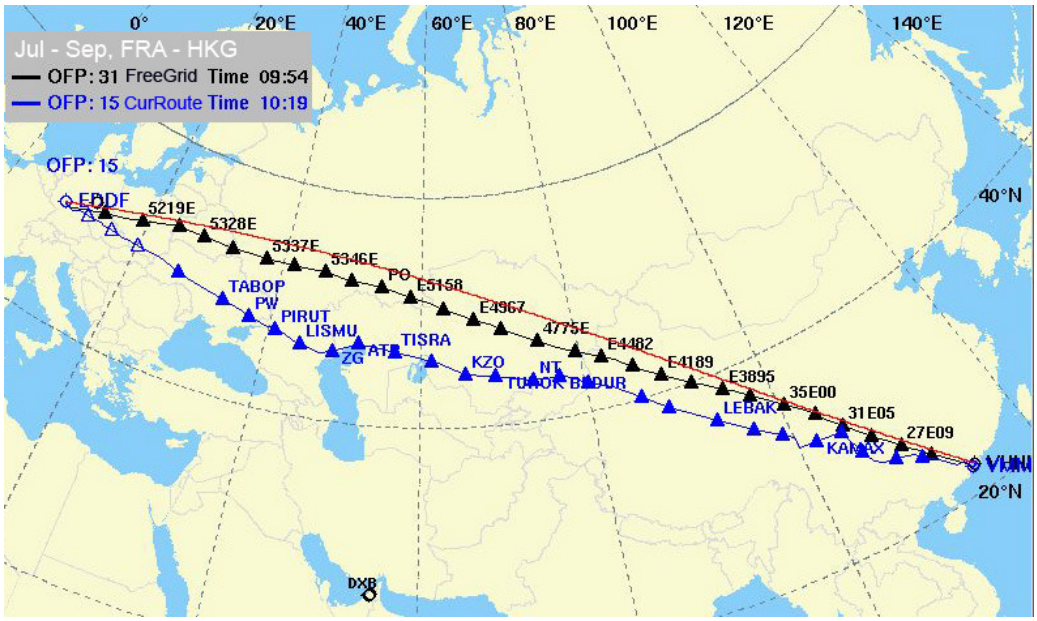


Abbildung 103: Swiss Flug Zürich – Hong Kong via SARIN-HMI-YBL-DOREX, 23.08.2005. Deutlich sichtbar der gezackte Verlauf über China.[163]



[163] Kronenberg (2005): S. XX f.

Abbildung 104: Flug Frankfurt – Hong Kong, Quartal Jul-Sep (Lufthansa), rot = Great Circle.[164]

Auffällig ist der Verlauf der aktuellen Flugroute in Abbildung 103, welcher aufgrund der erklärten Situation in China weit nördlich des optimalen Free Route Tracks sowie gezackt verläuft und somit eine wesentliche zusätzliche Ineffizienz darstellt.

D Diskussion

D.I Ankünfte unmittelbar nach Ende Nachtflugsperre

Geplante Ankünfte anhand eines Beispiels vom 18.11.2007: Bereits 9 Stunden vor der geplanten Landung zeichnet sich ab, dass ein Flug 6 Minuten vor Ende der Nachtflugsperre in Zürich sein wird. Wenn dieser Flug unterwegs noch begünstigende Faktoren antrifft, kann dieser Flug bis zu 20 Minuten zu früh über Zürich eintreffen.

[164] Lufthansa.

Ankünfte von morgen, 18.11.2007

Suchen Letztes Update: 17.11.2007 21:11:21

Plan	erw.	Flug-Nr.	von	H	Typ	Info
06:10	06:21	LX 139	HONG KONG Intl.	2	A343	
06:10	05:54	LX 183	SINGAPORE Changi Intl. via BANGKOK Suvarnabhumi Airport	2	A343	
		OS 8818		2	A343	
		TG 7102		2	A343	
06:10		LX 1851	THESSALONIKI Makedonia	2	A320	
		LH 5261		2	A320	
06:10	06:03	LX 289	JOHANNESBURG Intl.	2	A343	
		SA 7242		2	A343	
06:15		LX 087	MONTREAL Pièrre-Elliott-Trudeau	2	A332	
		AC 6820		2	A332	
06:15		LX 155	BOMBAY MUMBAI	2	A332	
		AC 6823		2	A332	
		AI 6155		2	A332	
		UA 8615		2	A332	
06:15	06:23	MH 010	KUALA LUMPUR Sepang Intl. (KLIA)	2	B772	
		LX 4311		2	B772	
06:20		LX 229	JEDDAH Abdulaziz Intl. via RIYADH King Khalid Intl.	2	A332	
		LH 5279		2	A332	
06:25		LX 243	MUSKAT Seeb Intl. via DUBAI Intl.	2	A332	
		UA 8617		2	A332	
06:25		LX 293	DAR ES SALAAM via NAIROBI Jomo Kenyatta Intl.	2	A332	

Abbildung 105: Ankünfte in Zürich zwischen 06.00 und 06.25 Uhr, erwartete Ankunftszeiten sind bei bereits abgeflogenen Flugzeugen eingetragen. LX183 ist eventuell bereits 6 Minuten vor 06:00 Uhr da.[165]

In Abbildung 106 werden die Warteräume östlich und westlich des Flughafens Zürich sichtbar (weisse Kreise), weil dort ab 05.40 Uhr[166] die Langstreckenflüge aus Montreal und Johannesburg (westliche Warteräume) sowie Hong Kong und Thessaloniki (östliche Warteräume) auf das Ende der Nachtflugsperre warten mussten. Bei Ende der Aufzeichnung um 05.55 Uhr wurde der erste Flug (SR139) für den Anflug aus dem Warteraum gelotst. Der Flug aus Johannesburg überflog den Flughafen Zürich bereits um 05.40 Uhr. Die geschätzte Wartezeit betrug für diesen Flug insgesamt über 20 Minuten.

[165] http://www.unique.ch.
[166] am 15.11.2007.

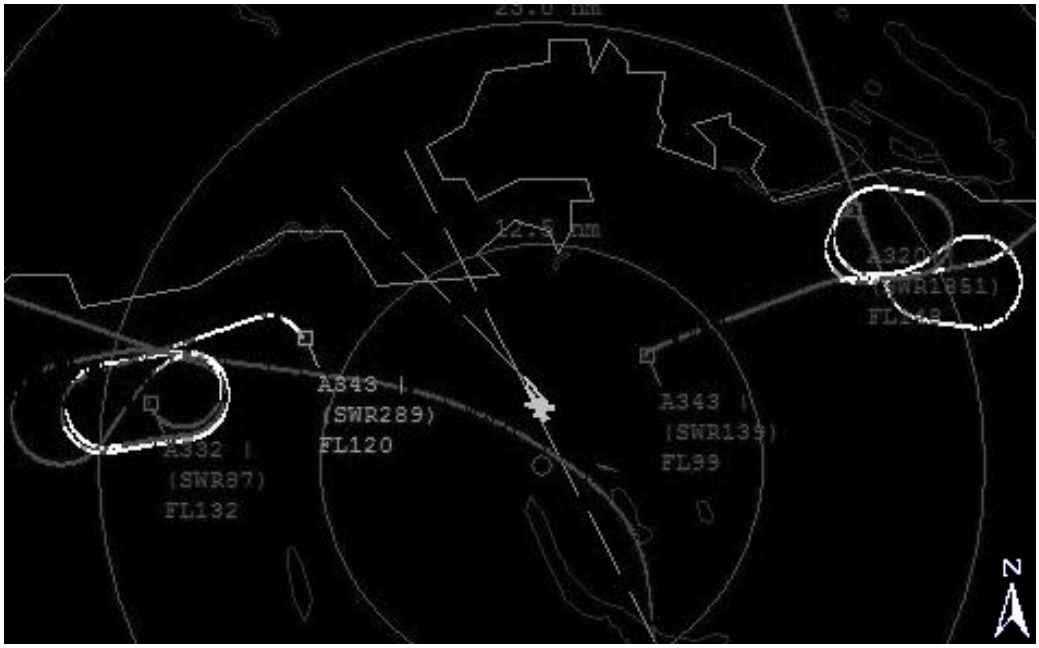


Abbildung 106: Pseudo-Radarbild Nordschweiz, 15.11.2007, 05.36 bis 05.55 Uhr.[167]

D.II Werte und Verfahren für die Hochrechnungen

Verschiedene Flugzeuge weisen unterschiedliche Daten des Treibstoffverbrauchs auf und haben abweichende Blockstundenkosten. Für die Langstreckenflüge wurde ein Airbus A330-300 als Basis gewählt, da dieser Flugzeugtyp etwa ein mittelgrosses Langstreckenflugzeug darstellt. Die Kosten und Verbrauchsdaten anderer Langstreckenflugzeuge weichen jedoch von diesem zweistrahligen Flugzeugtyp ab und sind insbesondere bei vierstrahligen Flugzeugen höher. Die Boeing 747-400 aus der Lufthansa-Studie kostet und verbraucht etwa doppelt so viel, sodass unter Annahme eines A330-300 die Zahlenwerte der Hochrechnung vermutlich etwas geringer ausfallen, als es durchschnittlich in der Praxis der Fall ist. Zu erwähnen ist weiter, dass die Blockstundenkosten von Fluggesellschaft zu Fluggesellschaft stark variieren können und daher die Gesamtkosten nur schwer zu ermitteln sind. Die folgende Abbildung 107 zeigt die Eingangsdaten für die Berechnungen.

[167] eigene Aufzeichnung mittels SBS-1 "Virtual Radar", ADS-B Aufzeichnung. Weiss bedeutet Horizontalflug, grau bedeutet Sinkflug.

Aircraft Type	Typical Fuel Consumption (litres)	Other Costs	Cost of Fuel	Total Operating Costs
A300-600	7071.1	$3,354.77	$2,661.03	$6,015.80
A319	3107.8	$2,443.19	$1,169.65	$3,612.83
A320	3353.9	$2,547.08	$1,261.81	$3,808.89
A321	3505.3	$2,909.03	$1,318.78	$4,227.82
A330-200	6669.9	$3,691.59	$2,510.22	$6,201.81
A330-300	7082.5	$3,708.35	$2,664.38	$6,372.73
A340-300	8229.5	$3,728.46	$3,096.71	$6,825.17
A340-600	9781.5	$4,447.34	$3,679.86	$8,127.20
ATR-42	757.1	$1,685.77	$234.60	$1,920.37
ATR-72	810.1	$2,267.24	$251.36	$2,518.59
B-727-200	4027.7	$3,140.28	$1,248.40	$4,388.69
B-737-200	3013.2	$2,396.27	$933.37	$3,329.64
B-737-200C	4300.2	$3,319.58	$1,332.19	$4,651.77
B-737-300/700	2611.9	$2,530.32	$809.37	$3,339.69
B-737-400	3051.0	$2,825.25	$945.10	$3,770.35
B-737-800	2135.0	$1,990.74	$661.91	$2,652.65
B-737-500	3043.5	$2,535.35	$943.43	$3,478.78
B747-100	15175.7	$8,294.77	$4,702.05	$12,996.82
B-747-200	15228.7	$9,397.39	$4,718.80	$14,116.19
B-747-400	14168.8	$6,939.12	$4,390.36	$11,329.48
B-757-200	3406.9	$3,443.59	$1,055.70	$4,499.28
B-767-200	4606.8	$3,963.06	$1,427.71	$5,390.76
B-767-300	4909.7	$4,172.52	$1,521.55	$5,694.07
B-777-200	7302.1	$4,690.32	$2,262.21	$6,952.53
BAE 146-300	3240.3	$3,327.96	$1,003.75	$4,331.71
CRJ-100	1832.1	$1,860.04	$568.07	$2,428.11
CRJ-200	2017.6	$1,270.19	$625.04	$1,895.23
DC-9-10	3153.2	$2,409.67	$976.94	$3,386.61
DC-9-30	3422.0	$2,553.78	$1,060.73	$3,614.51
DC-9-40	3660.5	$1,608.68	$1,134.46	$2,743.14
DC-9-50	2929.9	$2,022.58	$908.24	$2,930.82
DC-10-10	6787.2	$6,654.25	$2,103.02	$8,757.27
DC-10-30	9467.3	$7,064.80	$2,934.17	$9,998.97
DC-10-40	8464.2	$6,474.95	$2,622.49	$9,097.44
DHC 8-100	931.2	$1,519.87	$288.22	$1,808.09
EMB-120	590.5	$1,571.82	$182.65	$1,754.47
ERJ-135	1287.0	$1,099.27	$398.82	$1,498.09
ERJ-145	1321.1	$1,285.27	$408.87	$1,694.14
MD-11	8237.1	$5,181.30	$2,552.11	$7,733.41
MD-80	3024.5	$2,892.28	$936.72	$3,829.00
MD-87	2805.0	$2,180.10	$869.69	$3,049.79
MD-90	2350.7	$3,855.81	$728.93	$4,584.75
L-1011-500	6015.0	$5,152.81	$1,863.39	$7,016.20

Note: ICAO 2000 US$ values inflated to YTD June 2007 prices and converted to Australian dollars using the PPP conversion factor.

Abbildung 107: Eingangsparameter (Blockstundensatz) für die Hochrechnungen.[168]

Die Preise sind in Australischen Dollar und wurden mit einem Kurs von 1 Australian Dollar = 1.07 Swiss Franc umgerechnet.[169] Alle Kosten sowie der Treibstoffverbrauch beziehen sich auf eine Blockstunde. Für die Frequenzen auf den einzelnen Strecken wurden folgende Zahlen von OAG Worldwide Limited aus

[168] http://www.casa.gov.au/.
[169] http://www.oanda.com/, Kurs vom 1. November, gerundet auf zwei Komma stellen

drei verschiedenen Presseberichten übernommen. OAG sammelt Daten von über 1'000 Fluggesellschaften auf über 3'500 Flughäfen weltweit und ist als einer der führenden Datenverwaltungsorganisation der Luftfahrt bekannt.

Routing	Flüge
International von/nach Europa	103722
innerhalb Europa	611746
Westeuropa - New York	4285
Westeuropa - Chicago	2383
Europa - Asia/ Pacific	11560
Westeuropa - Hong Kong	1146
Transatlantik	27000
Barcelona - Madrid	971
Rome - USA/ Kanada	962
London Heathrow - USA/ Kanada	5133
London Gatwick - USA/ Kanada	1825
Madrid - USA/ Kanada	625

Abbildung 108: Monatliche Frequenzen auf den einzelnen Strecken.[170]

	July	July	July	July	July	July	July	Growth
Key Regions	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	07 vs. 06
Worldwide	2,355,297	2,252,786	2,210,003	2,339,526	2,435,895	2,471,633	2,601,006	5%
To/From Africa	20,141	20,298	21,851	23,396	25,785	28,472	31,644	11%
Within Africa	46,992	48,739	47,946	49,041	54,187	51,314	54,575	6%
To/From Asia/Pacific	34,075	34,036	36,053	42,828	45,178	50,273	53,450	6%
Within Asia/Pacific	368,010	371,827	369,858	420,106	452,707	491,777	528,775	8%
To/From Central & South America	51,302	50,613	51,692	58,287	61,364	61,935	63,060	2%
Within Central & South America	203,239	197,443	176,019	174,882	177,618	183,859	188,520	3%
To/From Europe	74,803	71,195	75,092	83,346	89,136	96,742	103,722	7%
Within Europe	518,408	508,280	510,932	534,350	558,770	577,563	622,072	8%
To/From Middle East	22,685	22,209	24,110	27,573	29,784	34,642	37,162	7%
Within Middle East	25,529	26,278	26,008	28,048	29,080	33,526	37,453	12%
To/From North America	82,622	77,571	78,062	87,478	92,843	95,034	99,196	4%
Within North America	1,050,186	962,121	935,810	971,645	991,488	950,045	975,494	3%

Abbildung 109: Verkehrszahlen (Frequenzen) von OAG, Juli 2007.[171]

[170] http://www.oag.com/.
[171] http://www.oag.com/.

Die Strecke Barcelona – Madrid wurde mit 301 NM (Great Circle Distance)[172] angenommen, wobei dieser Wert zu tief liegt. Die Ineffizienz wurde mit 5% angenommen, die Kosten mit 8 Euro pro NM oder 7.1 Franken pro Kilometer geschätzt (EUR/CHF 1:1.65, NM/KM 1:1.852).[173]

[172] http://gc.kls2.com/.
[173] http://www.eurocontrol.int/.

E Liste der Kontaktpersonen

E.I Deutsche Lufthansa

Matthias Schmitt, Manager Air Traffic Services and Infrastructure, Abteilung OZ-G/5, Frankfurt
Michael Dietz, Manager Air Traffic Services and Infrastructure, Abteilung OZ-G/5, Frankfurt

E.II EUROCONTROL

Stefan Gerris, Expert Airspace Structures, Abteilung AND, Brüssel
Kevin Harvey, Expert Airspace Structures, Abteilung AND, Brüssel

E.III Skyguide

Roland Bauman, Head Planning & Development Aim, OAP, Wangen

E.IV Swiss International Air Lines

Thomas Borer, Flight Area Manager Short Haul, ZRHCRX/OCSR/BHM, Zürich
Heinz Vercelloni, Flight Area Manager Long Haul, ZRHCRX/OCSR/VEHE, Zürich

F Meetings

01.Dez	Prof. H. Elsasser	Universität, Zürich
19. Dez	Heinz Vercelloni	Swiss, Zürich
01. Feb	Prof. H. Elsasser	Universität, Zürich
15. Mär:	Roland Baumann	Skyguide, Zürich
24. Apr	Anita Riva, Anton Coray	Swiss, Zürich
09. Mai	Juan Polymeris	Swiss, Zürich
14. Mai	Andrew Hill	EUROCONTROL, Brüssel
01. Jun	Miachel Dietz	Lufthansa, Frankfurt
08. Jun	Kevin Harvey, Stefan Gerris	EUROCONTROL, Brüssel
18. Jul	Michael Dietz, Matthias Schmitt	Lufthansa, Frankfurt
06. – 10. Aug	Michael Dietz, Matthias Schmitt	Lufthansa, Frankfurt
04. – 05. Sep	Stefan Gerris	EUROCONTROL,Brüssel
07. Sep	Matthias Schmitt	Lufthansa, Frankfurt
27. Okt	Matthias Schmitt	Lufthansa, Frankfurt

Eidesstattliche Erklärung:

Der Verfasser erklärt an Eides statt, dass er die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzug anderer als die angegebenen Hilfsmittel angefertigt hat. Die aus fremden Quellen (einschliesslich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Ort, Datum: Unterschrift: