

Andreas Schlegel

## **Bodenabfertigungsprozesse im Luftverkehr**

# GABLER RESEARCH

Andreas Schlegel

# **Bodenabfertigungsprozesse im Luftverkehr**

Eine statistische Analyse  
am Beispiel der Deutschen Lufthansa AG  
am Flughafen Frankfurt/Main



**GABLER**

**RESEARCH**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Dissertation Georg-August-Universität Göttingen, 2010

1. Auflage 2010

Alle Rechte vorbehalten

© Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010

Lektorat: Ute Wrasmann | Jutta Hinrichsen

Gabler Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

[www.gabler.de](http://www.gabler.de)



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8349-2399-8

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Statistik der Georg-August-Universität Göttingen und wurde im Februar 2010 von der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät als Dissertation mit dem ursprünglichen Titel *Modellierung, Simulation und Prognose von Bodenabfertigungsprozessen der Deutschen Lufthansa AG am Flughafen Frankfurt/Main* angenommen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Walter Zucchini, für die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit, das große Interesse an meiner Arbeit und die stets wertvollen Hinweise und Anregungen. Daneben danke ich Herrn Prof. Dr. Fred Böker für die zügige Erstellung des Zweitgutachtens sowie Frau Prof. Dr. Jutta Geldermann für die Übernahme der Aufgabe als Drittprüferin in der Disputation. Außerdem möchte ich allen Kollegen der Professuren für Statistik und Ökonometrie für die schönen gemeinsamen Jahre danken.

Weiterhin gilt mein großer Dank der Deutschen Lufthansa AG für die Zusammenarbeit und die Zurverfügungstellung ihrer einzigartigen Prozessdaten. Insbesondere danke ich Herrn Arno Thon, Leiter Systempartner und Pünktlichkeitsmanagement der Deutschen Lufthansa AG am Flughafen Frankfurt/Main, für die langjährige Betreuung und Unterstützung meiner Arbeit. Außerdem danke ich Herrn Dr. Michael Mederer für die Anregung des Themas sowie allen Mitarbeitern der Deutschen Lufthansa AG und der Informationsdesign AG, die mit der Beantwortung meiner Fragen mein Verständnis der Daten und der zu Grunde liegenden Prozesse ermöglicht haben.

Schließlich möchte ich meiner gesamten Familie sowie allen Freunden für die langjährige Motivation und das Verständnis für die vielen langen Phasen, in denen meine Promotion an erster Stelle stand und kaum Zeit für anderes blieb, danken. Ganz besonders dankbar bin ich meiner Frau Nadine und meinem Sohn Moritz für ihre unendliche Geduld und ihre unersetzliche Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

# Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>   | <b>VII</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>  | <b>XI</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>  | <b>XVII</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>  | <b>XXI</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>    |
| <b>2 Luftverkehr</b>  | <b>5</b>    |
| 2.1 Entwicklung des Luftverkehrs . . . . .                          | 6           |
| 2.2 Verspätungen im Luftverkehr . . . . .                           | 8           |
| 2.3 Hub&Spoke-Netzwerke . . . . .                                   | 14          |
| 2.4 Strategische Allianzen . . . . .                                | 23          |
| 2.5 Bedeutung der Pünktlichkeit im Luftverkehr . . . . .            | 27          |
| 2.6 Konzepte für einen effizienteren Luftverkehr . . . . .          | 33          |
| 2.7 Deutsche Lufthansa AG . . . . .                                 | 37          |
| 2.8 Flughafen Frankfurt/Main . . . . .                              | 41          |
| <b>3 Bodenabfertigung</b>   | <b>47</b>   |
| 3.1 Prozesse der Bodenabfertigung . . . . .                         | 47          |
| 3.2 Relevanz der Bodenabfertigung . . . . .                         | 57          |
| 3.2.1 Relevanz für die Prozesse einer Fluggesellschaft . . . . .    | 58          |
| 3.2.2 Relevanz für die effiziente Nutzung von Kapazitäten . . . . . | 63          |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.3      | Bodenabfertigungsmodelle . . . . .  | 70         |
| <b>4</b> | <b>Datenbeschreibung</b>  | <b>77</b>  |
| 4.1      | ALLEGRO . . . . .   | 77         |
| 4.2      | ALLEGRO-Sollzeitenmodell . . . . .  | 81         |
| 4.3      | Details zu den Bodenabfertigungsprozessen . . . . .                             | 89         |
| 4.3.1    | Ankunft . . . . .   | 90         |
| 4.3.2    | Deboarding . . . . .  | 91         |
| 4.3.3    | Cleaning . . . . .  | 93         |
| 4.3.4    | Catering . . . . .  | 96         |
| 4.3.5    | Fueling . . . . .   | 98         |
| 4.3.6    | Boarding . . . . .  | 103        |
| 4.3.7    | Loading . . . . .   | 107        |
| 4.3.8    | Pushback und Abflug . . . . .   | 109        |
| 4.3.9    | Weitere Prozesse . . . . .  | 110        |
| 4.4      | Weitere Informationen zur Bodenabfertigung und den Flugereignissen              | 112        |
| 4.5      | Delay Codes . . . . .   | 113        |
| 4.6      | Datenaufbereitung und Datenauswahl . . . . .                                    | 117        |
| <b>5</b> | <b>Datenanalyse</b>   | <b>125</b> |
| 5.1      | Methodik der Modellierung . . . . .   | 129        |
| 5.1.1    | Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape<br>(GAMLSS) . . . . . | 130        |
| 5.1.2    | Mischungen von GAMLSS . . . . .   | 132        |
| 5.1.3    | Verteilung der Zielvariablen . . . . .  | 136        |
| 5.1.4    | Spezielle Funktionstypen . . . . .  | 139        |
| 5.1.5    | Modellüberprüfung und Modellauswahl . . . . .                                   | 143        |
| 5.1.6    | Software . . . . .  | 145        |
| 5.2      | Analyse und Modellierung der Teilprozesse . . . . .                             | 145        |
| 5.2.1    | Deboarding . . . . .  | 149        |
| 5.2.2    | Cleaning . . . . .  | 155        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.2.3    | Catering . . . . .   | 168        |
| 5.2.4    | Fueling . . . . .  | 176        |
| 5.2.5    | Boarding . . . . .   | 187        |
| 5.2.6    | Loading . . . . .  | 194        |
| 5.3      | Simulationen zur Analyse des Einflusses von Veränderungen der Teilprozesse . . . . .     | 198        |
| 5.3.1    | Cleaning . . . . .   | 205        |
| 5.3.2    | Catering . . . . .   | 208        |
| 5.3.3    | Fueling . . . . .  | 209        |
| 5.3.4    | Boarding . . . . .   | 212        |
| 5.3.5    | Loading . . . . .  | 215        |
| 5.3.6    | Wechselwirkungen zwischen mehreren Prozessen . . . . .                                   | 216        |
| 5.4      | Prognose-Modelle für Ready-to-Pushback-Zeiten . . . . .                                  | 224        |
| 5.4.1    | Das Prognose-Modell von Carr et al. (2005) . . . . .                                     | 225        |
| 5.4.2    | Erweiterung des Modells von Carr et al. (2005) . . . . .                                 | 228        |
| 5.4.3    | Prognosen auf Basis des Simulations-Modells . . . . .                                    | 238        |
| 5.4.4    | Vergleich der Prognose-Modelle . . . . .   | 239        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>  | <b>249</b> |
| <b>A</b> | <b>Anhang</b>  | <b>255</b> |
| A.1      | Delay Codes . . . . .  | 255        |
| A.2      | Residuen-Plots der Teilprozess-Modelle . . . . .   | 259        |
| A.3      | Basis-Modelle für die Erweiterung des Prognose-Modells nach Carr et al. (2005) . . . . . | 270        |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>283</b> |

# Abbildungsverzeichnis

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Entwicklung des weltweiten Linien-Luftverkehrs von 1971 bis 2008 sowie Prognose der weiteren Entwicklung bis 2025 . . . . .  | 6   |
| 2.2 | Entwicklung des Anteils verspäteter Abflüge bei Flügen innerhalb der USA sowie innerhalb Europas von 1992 bis 2007 . . . . .   | 9   |
| 2.3 | Geplante Flugbewegungen (nur Turnarounds) der Deutschen Lufthansa AG am Flughafen Frankfurt/Main je 5-Minuten-Intervall am 16.05.2006 . . . . .  | 18  |
| 3.1 | Kernprozesse der Bodenabfertigung . . . . .  | 49  |
| 3.2 | Geräte und Fahrzeuge bei der Bodenabfertigung eines Airbus A320 . . . . .  | 50  |
| 4.1 | Lufthansa Referenzmodell für die Continental-Flotte am Flughafen Frankfurt/Main . . . . .  | 82  |
| 4.2 | Zeitdefinitionen sowie Soll- und Istzeiten am Beispiel der Bodenabfertigung eines Airbus A321 in FRA (Brückenabfertigung) zwischen dem Inbound-Flug LH 3007 aus Stockholm und dem Outbound-Flug LH 4410 nach Madrid am 08. Juli 2006 . . . . . | 88  |
| 4.3 | Verteilung der Verspätungszeiten nach Verspätungsklassen . . . . .   | 116 |
| 5.1 | AGT in Abhängigkeit von SGT und AVGT . . . . .   | 125 |
| 5.2 | AGT und RGT in Abhängigkeit von AVGT . . . . .   | 127 |
| 5.3 | Differenz zwischen den Prozesszeiten und ATA in Abhängigkeit von AVGT . . . . .  | 128 |
| 5.4 | Beispiele von JSU-Verteilungen und BCT-Verteilungen . . . . .  | 139 |
| 5.5 | Darstellung der Konstruktion der Splines $S_1(x)$ , $S_2(x)$ und $S_3(x)$ . . . . .  | 142 |
| 5.6 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Deboarding-Beginn . . . . .   | 151 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.7  | Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen ATA und Deboarding-Beginn . . . . .         | 151 |
| 5.8  | Modell für die Deboarding-Dauer bei Brücken-Abfertigung im Bereich $AVGT \leq 50$ . . . . .  | 153 |
| 5.9  | Modell für die Deboarding-Dauer bei Bus-Abfertigung . . . . .                                | 154 |
| 5.10 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Cleaning-Positionsmeldung . . . . .                     | 156 |
| 5.11 | Modell 1 für den Cleaning-Beginn . . . . .   | 157 |
| 5.12 | Modell 2 für den Cleaning-Beginn . . . . .   | 161 |
| 5.13 | Modell 1 für die Cleaning-Dauer . . . . .  | 162 |
| 5.14 | Modell 2 für die Cleaning-Dauer . . . . .  | 164 |
| 5.15 | Modell 1 für die Cleaning-Dauer mit dem ab November 2006 gültigen Cleaning-Konzept . . . . . | 166 |
| 5.16 | Modell 2 für die Cleaning-Dauer mit dem ab November 2006 gültigen Cleaning-Konzept . . . . . | 167 |
| 5.17 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Catering-Positionsmeldung . . . . .                     | 168 |
| 5.18 | Modell 1 für den Catering-Beginn . . . . .   | 170 |
| 5.19 | Modell 2 für den Catering-Beginn . . . . .   | 172 |
| 5.20 | Modell 1 für die Catering-Dauer . . . . .  | 173 |
| 5.21 | Modell 2 für die Catering-Dauer . . . . .  | 175 |
| 5.22 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Fueling-Positionsmeldung . . . . .                      | 177 |
| 5.23 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Blockfuel-Meldung . . . . .                             | 178 |
| 5.24 | Modell für die Zeit zwischen Fueling-Positionsmeldung und Fueling-Beginn . . . . .           | 181 |
| 5.25 | Modell für die Fueling-Dauer . . . . .   | 185 |
| 5.26 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Boarding-Positionsmeldung . . . . .                     | 188 |
| 5.27 | Modell für die Zeit zwischen Servicing-Ende und Boarding-Beginn . . . . .                    | 190 |
| 5.28 | Modell für die Boarding-Dauer . . . . .  | 192 |
| 5.29 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Loading-Beginn . . . . .                                | 195 |
| 5.30 | Modell für die Zeit zwischen Boarding-Ende und Loading-Ende . . . . .                        | 197 |
| 5.31 | Struktur des Simulationsmodells . . . . .  | 200 |
| 5.32 | Vergleich der Simulation mit den Analysedaten . . . . .                                      | 201 |

---

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.33 | Vergleich der Simulation mit den Validierungsdaten . . . . .   | 203 |
| 5.34 | Auswirkung einer Veränderung des Erwartungswertes $\mu$ des Cleaning-Beginns auf RGT . . . . .                                       | 206 |
| 5.35 | Auswirkung einer Veränderung des Erwartungswertes $\mu$ der Cleaning-Dauer auf RGT . . . . .   | 207 |
| 5.36 | Auswirkung einer Veränderung des Erwartungswertes $\mu$ des Catering-Beginns auf RGT . . . . .                                       | 208 |
| 5.37 | Auswirkung einer Veränderung des Erwartungswertes $\mu$ der Catering-Dauer auf RGT . . . . .   | 209 |
| 5.38 | Auswirkung einer Veränderung des Erwartungswertes $\mu$ der Blockfuel-Meldung auf RGT . . . . .                                      | 210 |
| 5.39 | Auswirkung einer Veränderung des Erwartungswertes $\mu$ des Fueling-Beginns auf RGT . . . . .  | 211 |
| 5.40 | Auswirkung einer Veränderung des Erwartungswertes $\mu$ der Fueling-Dauer auf RGT . . . . .  | 212 |
| 5.41 | Auswirkung einer Veränderung des Erwartungswertes $\mu$ des Boarding-Beginns auf RGT . . . . .                                       | 213 |
| 5.42 | Auswirkung einer Veränderung des Anteils $\pi$ der Bodenabfertigungen mit Verspätung durch Crew Rotation auf RGT . . . . .           | 214 |
| 5.43 | Auswirkung einer Veränderung des Erwartungswertes $\mu$ der Boarding-Dauer auf RGT . . . . .   | 215 |
| 5.44 | Auswirkung einer Veränderung des Erwartungswertes $\mu$ des Loading-Endes auf RGT . . . . .  | 216 |
| 5.45 | Auswirkung einer Veränderung des Anteils $\pi$ der Bodenabfertigungen mit Verspätung auf Grund von Gepäckaumladung auf RGT . . . . . | 217 |
| 5.46 | Auswirkung der Veränderung der Erwartungswerte der Cleaning-Dauer und der Catering-Dauer auf den Erwartungswert von RGT . . . . .    | 218 |
| 5.47 | Auswirkung der Veränderung der Erwartungswerte der Cleaning-Dauer und der Fueling-Dauer auf den Erwartungswert von RGT . . . . .     | 220 |
| 5.48 | Auswirkung der Veränderung der Erwartungswerte der Cleaning-Dauer und der Blockfuel-Meldung auf den Erwartungswert von RGT . . . . . | 220 |
| 5.49 | Auswirkung der Veränderung der Erwartungswerte der Catering-Dauer und der Fueling-Dauer auf den Erwartungswert von RGT . . . . .     | 221 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.50 | Auswirkung der Veränderung der Erwartungswerte der Catering-Dauer und der Blockfuel-Meldung auf den Erwartungswert von RGT . . . . .  | 221 |
| 5.51 | Auswirkung der Veränderung der Erwartungswerte von Cleaning-, Catering- und Fueling-Dauer auf den Erwartungswert von RGT für $AVGT \leq 40$ . . . . .   | 222 |
| 5.52 | Auswirkung der Veränderung der Erwartungswerte von Cleaning-, Catering- und Fueling-Dauer auf den Erwartungswert von RGT für $40 < AVGT \leq 50$ . . . . .  | 223 |
| 5.53 | Auswirkung der Veränderung der Erwartungswerte von Cleaning-, Catering- und Fueling-Dauer auf den Erwartungswert von RGT für $50 < AVGT \leq 60$ . . . . .  | 224 |
| 5.54 | Struktur der Erweiterung des Prognosemodells von Carr et al. (2005)   | 230 |
| 5.55 | Modell für RGT . . . . .  | 231 |
| 5.56 | Residuen-Plots des Modells für RGT . . . . .  | 233 |
| 5.57 | Modell für die Zeit zwischen Boarding-Ende und ACR . . . . .  | 235 |
| 5.58 | Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen Boarding-Ende und ACR . . . . .  | 235 |
| 5.59 | Vergleich der drei Prognose-Modelle am Beispiel der Bodenabfertigung eines Airbus A321 in FRA (Brückenabfertigung) zwischen dem Inbound-Flug LH 3007 aus Stockholm und dem Outbound-Flug LH 4410 nach Madrid am 08. Juli 2006 . . . . . | 241 |
| 5.60 | Bias, Standardabweichung, MSE und Überdeckungswahrscheinlichkeit des Konfidenzintervalls der drei Prognose-Modelle im Zeitverlauf für $39 \leq AVGT \leq 41$ . . . . .  | 243 |
| 5.61 | Bias, Standardabweichung, MSE und Überdeckungswahrscheinlichkeit des Konfidenzintervalls der drei Prognose-Modelle im Zeitverlauf für $59 \leq AVGT \leq 61$ . . . . .  | 244 |
| 5.62 | Prognosefehler der drei Prognose-Modelle und von COB in Abhängigkeit von AVGT und zeitlicher Nähe zu CTD . . . . .  | 245 |
| 5.63 | Standardfehler der Prognose der drei Prognose-Modelle und von COB in Abhängigkeit von AVGT und zeitlicher Nähe zu CTD . . . . .   | 246 |
| 5.64 | Mittlerer quadratischer Prognosefehler der drei Prognose-Modelle und von COB in Abhängigkeit von AVGT und zeitlicher Nähe zu CTD . . . . .  | 247 |

---

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.65 | Überdeckungswahrscheinlichkeit der Konfidenzintervalle der drei Prognose-Modelle in Abhängigkeit von AVGT und zeitlicher Nähe zu CTD . . . . . | 248 |
| A.1  | Residuen-Plots des Modells für die Deboarding-Dauer bei Bus-Abfertigung . . . . .  | 259 |
| A.2  | Residuen-Plots des Modells für die Deboarding-Dauer bei Brücken-Abfertigung und $AVGT \leq 50$ . . . . .                                       | 259 |
| A.3  | Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen ATA und Cleaning-Positionsmeldung . . . . .   | 260 |
| A.4  | Residuen-Plots des Modells 1 für den Cleaning-Beginn . . . . .   | 260 |
| A.5  | Residuen-Plots des Modells 2 für den Cleaning-Beginn . . . . .   | 261 |
| A.6  | Residuen-Plots des Modells 1 für die Cleaning-Dauer . . . . .  | 261 |
| A.7  | Residuen-Plots des Modells 2 für die Cleaning-Dauer . . . . .  | 261 |
| A.8  | Residuen-Plots des Modells 1 für die Cleaning-Dauer nach Änderung des Cleaning-Konzepts . . . . .  | 262 |
| A.9  | Residuen-Plots des Modells 2 für die Cleaning-Dauer nach Änderung des Cleaning-Konzepts . . . . .  | 262 |
| A.10 | Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen ATA und Catering-Positionsmeldung . . . . .   | 263 |
| A.11 | Residuen-Plots des Modells 1 für Catering-Beginn . . . . .   | 263 |
| A.12 | Residuen-Plots des Modells 2 für Catering-Beginn . . . . .   | 264 |
| A.13 | Residuen-Plots des Modells 1 für die Catering-Dauer . . . . .  | 264 |
| A.14 | Residuen-Plots des Modells 2 für die Catering-Dauer . . . . .  | 264 |
| A.15 | Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen ATA und Fueling-Positionsmeldung . . . . .  | 265 |
| A.16 | Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen ATA und Blockfuel-Meldung . . . . .   | 265 |
| A.17 | Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen Fueling-Positionsmeldung und Fueling-Beginn . . . . .   | 266 |
| A.18 | Residuen-Plots des Modells für die Fueling-Dauer . . . . .   | 266 |
| A.19 | Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen ATA und Boarding-Positionsmeldung . . . . .   | 267 |

|  |     |
|--|-----|
| A.20 Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen Servicing-Ende und Boarding-Beginn . . . . .                 | 267 |
| A.21 Residuen-Plots des Modells für die Boarding-Dauer . . . . .   | 268 |
| A.22 Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen ATA und Loading-Beginn . . . . .                             | 269 |
| A.23 Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen Boarding-Ende und Loading-Ende . . . . .                     | 269 |
| A.24 Modell für die Zeit zwischen Deboarding-Beginn und ACR . . . . .  | 271 |
| A.25 Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen Deboarding-Beginn und ACR . . . . .                          | 271 |
| A.26 Modell für die Zeit zwischen dem Beginn des ersten Servicing-Prozesses und ACR . . . . .                      | 273 |
| A.27 Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen dem Beginn des ersten Servicing-Prozesses und ACR . . . . .  | 273 |
| A.28 Modell für die Zeit zwischen dem Ende des ersten Servicing-Prozesses und ACR . . . . .                        | 275 |
| A.29 Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen dem Ende des ersten Servicing-Prozesses und ACR . . . . .    | 275 |
| A.30 Modell für die Zeit zwischen dem Beginn des letzten Servicing-Prozesses und ACR . . . . .                     | 277 |
| A.31 Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen dem Beginn des letzten Servicing-Prozesses und ACR . . . . . | 277 |
| A.32 Modell für die Zeit zwischen dem Ende des letzten Servicing-Prozesses und ACR . . . . .                       | 279 |
| A.33 Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen dem Ende des letzten Servicing-Prozesses und ACR . . . . .   | 279 |
| A.34 Modell für die Zeit zwischen Boarding-Beginn und ACR . . . . .  | 280 |
| A.35 Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen Boarding-Beginn und ACR . . . . .                            | 281 |
| A.36 Modell für die Zeit zwischen Loading-Ende und ACR . . . . .   | 282 |
| A.37 Residuen-Plots des Modells für die Zeit zwischen Loading-Ende und ACR . . . . .                               | 282 |

# Tabellenverzeichnis

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 2.1  | Star Alliance Mitglieder im Oktober 2009 . . . . .  | 24  |
| 4.1  | Klassifizierung der Lufthansa-Flotte . . . . .  | 84  |
| 4.2  | Wichtige Zeitdefinitionen im Überblick . . . . .  | 85  |
| 4.3  | Messpunkte des Deboarding-Prozesses bei Brückenabfertigung . . . . .                          | 91  |
| 4.4  | Messpunkte des Deboarding-Prozesses bei Busabfertigung . . . . .                              | 92  |
| 4.5  | Messpunkte des Cleaning-Prozesses . . . . .   | 94  |
| 4.6  | Messpunkte des Catering-Prozesses . . . . .   | 97  |
| 4.7  | Messpunkte des Fueling-Prozesses . . . . .  | 98  |
| 4.8  | Messpunkte des Boarding-Prozesses bei Brückenabfertigung . . . . .                            | 105 |
| 4.9  | Messpunkte des Boarding-Prozesses bei Busabfertigung . . . . .                                | 106 |
| 4.10 | Messpunkte des Loading-Prozesses . . . . .  | 108 |
| 4.11 | Messpunkte des Pushback-Prozesses . . . . .   | 109 |
| 4.12 | Einteilung der Delay Codes in Verspätungsklassen . . . . .                                    | 115 |
| 4.13 | Vollständigkeit der Prozesszeiten in der ausgewählten Teilgesamtheit . . . . .                | 123 |
| 5.1  | Benennung der verwendeten Variablen . . . . .   | 147 |
| 5.2  | Modell für die Zeit zwischen ATA und Deboarding-Beginn . . . . .                              | 150 |
| 5.3  | Modell für die Deboarding-Dauer bei Brückenabfertigung im Bereich<br>AVGT $\leq$ 50 . . . . . | 152 |
| 5.4  | Modell für die Deboarding-Dauer bei Busabfertigung . . . . .                                  | 154 |
| 5.5  | Modell für die Zeit zwischen ATA und Cleaning-Positionsmeldung . . . . .                      | 155 |
| 5.6  | Modell 1 für den Cleaning-Beginn . . . . .  | 159 |
| 5.7  | Modell 2 für den Cleaning-Beginn . . . . .  | 160 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.8  | Modell 1 für die Cleaning-Dauer . . . . .   | 162 |
| 5.9  | Modell 2 für die Cleaning-Dauer . . . . .   | 164 |
| 5.10 | Modell 1 für die Cleaning-Dauer mit dem ab November 2006 gültigen<br>Cleaning-Konzept . . . . . | 166 |
| 5.11 | Modell 2 für die Cleaning-Dauer mit dem ab November 2006 gültigen<br>Cleaning-Konzept . . . . . | 167 |
| 5.12 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Catering-Positionsmeldung .                                | 169 |
| 5.13 | Modell 1 für den Catering-Beginn . . . . .  | 170 |
| 5.14 | Modell 2 für den Catering-Beginn . . . . .  | 172 |
| 5.15 | Modell 1 für die Catering-Dauer . . . . .   | 174 |
| 5.16 | Modell 2 für die Catering-Dauer . . . . .   | 175 |
| 5.17 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Fueling-Positionsmeldung . .                               | 177 |
| 5.18 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Blockfuel-Meldung . . . . .                                | 179 |
| 5.19 | Modell für die Zeit zwischen Fueling-Positionsmeldung und Fueling-<br>Beginn . . . . .          | 182 |
| 5.20 | Modell für die Fueling-Dauer . . . . .  | 184 |
| 5.21 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Boarding-Positionsmeldung .                                | 187 |
| 5.22 | Modell für die Zeit zwischen Servicing-Ende und Boarding-Beginn .                               | 189 |
| 5.23 | Modell für die Boarding-Dauer . . . . .   | 192 |
| 5.24 | Modell für die Zeit zwischen ATA und Loading-Beginn . . . . .                                   | 195 |
| 5.25 | Modell für die Zeit zwischen Boarding-Ende und Loading-Ende . . .                               | 196 |
| 5.26 | Modell für RGT . . . . .  | 231 |
| 5.27 | Modell für die Zeit zwischen Boarding-Ende und ACR . . . . .                                    | 234 |
| A.1  | IATA Delay Codes und ausgewählte LH-interne Sub-Delay Codes .                                   | 255 |
| A.2  | Modell für die Zeit zwischen Deboarding-Beginn und ACR . . . . .                                | 270 |
| A.3  | Modell für die Zeit zwischen dem Beginn des ersten Servicing-Prozesses<br>und ACR . . . . .     | 272 |
| A.4  | Modell für die Zeit zwischen dem Ende des ersten Servicing-Prozesses<br>und ACR . . . . .       | 274 |
| A.5  | Modell für die Zeit zwischen dem Beginn des letzten Servicing-Prozesses<br>und ACR . . . . .    | 276 |

---

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| A.6 | Modell für die Zeit zwischen dem Ende des letzten Servicing-Prozesses<br>und ACR . . . . . | 278 |
| A.7 | Modell für die Zeit zwischen Boarding-Beginn und ACR . . . . .                             | 280 |
| A.8 | Modell für die Zeit zwischen Loading-Ende und ACR . . . . .                                | 281 |

# Abkürzungsverzeichnis

|      |  |
|------|--|
| AC   | Aircraft   |
| ACR  | Aircraft Ready Time                              |
| AEA  | Association of European Airlines                 |
| AGT  | Actual Ground Time                               |
| AMS  | IATA-Code des Flughafens Amsterdam Schiphol      |
| ATA  | Actual Time of Arrival                           |
| ATD  | Actual Time of Departure                         |
| ATFM | Air Traffic Flow Management                      |
| AVGT | Available Ground Time                            |
| CDG  | IATA-Code des Flughafens Paris Charles de Gaulle |
| CDM  | Collaborative Decision Making                    |
| CFMU | Central Flow Management Unit                     |
| CL   | IATA-Code der Lufthansa CityLine                 |
| CLH  | ICAO-Code der Lufthansa CityLine                 |
| COB  | Confirmed Off-Block Time                         |
| CRS  | Computer-Reservierungssystem                     |
| CTD  | Calculated Time of Departure                     |
| CTOT | Calculated Take-Off Time                         |
| DLH  | ICAO-Code der Deutschen Lufthansa AG             |
| ECAC | European Civil Aviation Conference               |
| ETD  | Estimated Time of Departure                      |
| FRA  | IATA-Code des Flughafens Frankfurt/Main          |

|      |   |
|------|---|
| GDP  | Ground Delay Program                      |
| HCC  | Hub Control Center                        |
| IATA | International Air Transport Association   |
| ICAO | International Civil Aviation Organization |
| LBC  | Lufthansa Boarding Control                |
| LH   | IATA-Code der Deutschen Lufthansa AG      |
| LHR  | IATA-Code des Flughafens London Heathrow  |
| MCT  | Minimum Connecting Time                   |
| MGT  | Minimum Ground Time                       |
| MUC  | IATA-Code des Flughafens München          |
| RGT  | Real Ground Time                          |
| SGT  | Scheduled Ground Time                     |
| STA  | Scheduled Time of Arrival                 |
| STD  | Scheduled Time of Departure               |
| TOAT | Target Off-Block Approval Time            |
| TOBT | Target Off-Block Time                     |
| TSAT | Target Start-Up Approval Time             |
| TTOT | Target Take-Off Time                      |

# 1 Einleitung

Ein Fluggast erlebt die Prozesse einer Fluggesellschaft hauptsächlich während seines Fluges vom Start- zum Zielflughafen, der – wenn das Flugzeug erst einmal in der Luft ist – in der Regel routinemäßig verläuft und kaum von der Fluggesellschaft beeinflusst werden kann. Wesentlich komplexer sind dagegen aus Sicht der Fluggesellschaft die Prozesse, die zwischen zwei Flügen ablaufen, wenn Passagiere und Flugzeuge abgefertigt und auf den nächsten Flug vorbereitet werden.

Gerade bei den großen Netzwerk-Fluggesellschaften wie der Deutschen Lufthansa AG, die einen Großteil ihres Verkehrs über einen oder mehrere zentrale sogenannte Hub-Flughäfen führen, treten an den Hub-Flughäfen mehrmals täglich große Wellen gebündelter ankommender und abgehender Flüge auf, in denen dutzende Flugzeuge gleichzeitig abgefertigt werden müssen und Passagiere, Gepäck und Flugzeug-Crews innerhalb kürzester Zeit das Flugzeug wechseln.

Während dieser Bodenabfertigungsphase hat eine Fluggesellschaft den größten Einfluss auf ihre Prozesse und muss ihre Ressourcen möglichst effizient einsetzen, um ihren Flugplan trotz auftretender Störungen und Verzögerungen einzuhalten. Da die weite Verbreitung von Operations Research Methoden in den letzten Jahren zu sehr engen Flugplänen geführt hat, die äußerst anfällig selbst für kleinste Störungen sind (Filar et al., 2001), spielen die Bodenabfertigungsprozesse eine entscheidende Rolle für die Pünktlichkeit und damit langfristig auch für die Profitabilität einer Fluggesellschaft.

Effiziente und pünktliche Bodenabfertigungsprozesse sind aber nicht nur für die Fluggesellschaft von großer Bedeutung, sondern gleichzeitig eine wichtige Voraussetzung für einen reibungslosen und pünktlichen Verkehrsfluss sowie die effiziente Nutzung der begrenzten Kapazitäten des Luftverkehrs. Insbesondere das starke Wachstum des internationalen Luftverkehrs – mit Ausnahme der aktuellen Luftfahrtkrise ist der internationale Luftverkehr in den letzten Jahrzehnten fast stetig gewachsen – sowie die Ausprägung großer Hub&Spoke-Netzwerke haben an den großen internationalen Verkehrsflughäfen – wie dem Flughafen Frankfurt/Main als wichtigstem Hub-Flughafen der Lufthansa – zu großen Kapazitätsengpässen und einer zunehmenden Verspätungsproblematik geführt.

Mit der vorliegenden Arbeit wird ein Beitrag zu einem besseren Verständnis der komplexen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Teilprozessen der Bodenabfertigung geliefert, auf dessen Basis mögliche Optimierungspotenziale identifiziert und die Teilprozesse besser gesteuert werden können. Zu diesem Zweck werden in Rahmen dieser Arbeit von der Deutschen Lufthansa AG erhobene und zur Verfügung gestellte Daten ihrer Bodenabfertigungsprozesse am Flughafen Frankfurt/Main im Detail untersucht und mit Hilfe statistischer Modelle beschrieben. Die Untersuchung umfasst insbesondere

- die Detailanalyse und statistische Modellierung aller relevanten Teilprozesse der Bodenabfertigung,
- die Entwicklung eines Simulationsmodells, mit dem auf Basis der angepassten Modelle die Auswirkungen einzelner oder simultaner Veränderungen der Teilprozesse auf die gesamte Abfertigungsdauer simuliert werden können, sowie
- die Entwicklung eines Prognose-Modells, mit dem zu jedem Zeitpunkt im Laufe der Bodenabfertigung auf Basis der Stati der Teilprozesse eine Prognose für das Ende der Bodenabfertigung generiert werden kann.

Die Ergebnisse der Modellierung und des Simulationsmodells können zur Identifizierung kritischer Prozesse und relevanter Verspätungstreiber verwendet werden und liefern wertvolle Ansätze für eine Überarbeitung des von Lufthansa für die Teilprozesse der Bodenabfertigung vorgegebenen Sollzeiten-Systems, das unter anderem auch die Grundlage für eine leistungsabhängige Vergütung der an der Bodenabfertigung beteiligten Dienstleister ist.

Das entwickelte Prognose-Modell dient dagegen in erster Linie einer verbesserten Prognose der *Ready-to-Pushback-Zeit*, das heißt desjenigen Zeitpunkts, zu dem die Bodenabfertigung abgeschlossen und das Flugzeug bereit für die Startfreigabe durch die Luftverkehrskontrolle ist. Solche Prognosen sind eine wichtige Eingangsgröße für sogenannte *Departure Management* Modelle, die über eine Optimierung der Startreihenfolge auf Basis der von den Fluggesellschaften gemeldeten *Ready-to-Pushback-Zeiten* eine möglichst effiziente Nutzung des als Hauptengpass geltenden Start- und Landebahnsystems eines beschränkten Flughafens erreichen wollen.

Darüber hinaus können die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit auch in anderen Bereichen Anwendung finden. Beispielsweise ist der Einsatz des Simulationsmodells – oder zumindest einzelner Modelle der Teilprozesse – als Teilmodul im Rahmen der inzwischen weit verbreiteten stochastischen Flugplanung denkbar, insbesondere zur Synchronisation von Flugzeug- und Crew-Umlaufplanung, für die eine Simulation von Deboarding- und Boarding-Zeiten erforderlich ist.

Die Arbeit ist im weiteren Verlauf wie folgt aufgebaut. In Kapitel 2 werden zunächst ausgewählte Grundlagen und Entwicklungen des Luftverkehrs beschrieben, die als wertvolle Hintergrundinformation dienen und die Relevanz der durchgeführten Analysen verdeutlichen. In diesem Zusammenhang werden auch die Deutsche Lufthansa AG und der Flughafen Frankfurt/Main näher vorgestellt.

Kapitel 3 umfasst die Darstellung des typischen Verlaufs der Bodenabfertigung eines Flugzeugs sowie eine Verdeutlichung der Relevanz der durchgeführten Analysen, zum einen für die Steuerung und Planung der Prozesse einer Fluggesellschaft, zum anderen unter dem Aspekt einer effizienteren Nutzung verfügbarer Flughafen-Kapazitäten. In diesem Rahmen wird auch ein kurzer Überblick über die in der wissenschaftlichen Literatur bereits existierenden Bodenabfertigungsmodelle gegeben.

Kapitel 4 enthält eine ausführliche Beschreibung der von der Deutschen Lufthansa AG zur Analyse ihrer Bodenabfertigungsprozesse zur Verfügung gestellten Daten – einschließlich des zu Grunde liegenden Sollzeiten-Modells – sowie der Auswahl und Aufbereitung einer homogenen Teilgesamtheit für die sich anschließenden Analysen.

Kapitel 5 bildet den zentralen Teil dieser Arbeit und umspannt die drei bereits erwähnten wesentlichen Teilaspekte der durchgeführten Analyse der Bodenabfertigung, das heißt die statistische Modellierung aller relevanten Teilprozesse, die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Analyse der Auswirkungen von Veränderungen der Teilprozesse sowie die Erweiterung des Simulationsmodells zu einem Prognose-Modell für die Vorhersage von *Ready-to-Pushback*-Zeiten. Die für die Analyse notwendigen theoretischen statistischen Grundlagen werden ebenfalls im Rahmen dieses Kapitels erläutert.

Das abschließende Kapitel 6 gibt eine knappe Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit und ihrer Anwendungsmöglichkeiten sowie einen Ausblick auf mögliche Erweiterungen der vorgestellten Analysen und Modelle.

## 2 Luftverkehr

In diesem Kapitel werden *ausgewählte* Grundlagen und Entwicklungen des Luftverkehrs vorgestellt, die als nützliche Hintergrundinformation und Motivation für die später folgenden Analysen dienen. Dabei geht es nicht um eine vollständige Darstellung des Luftverkehrs, sondern um eine Vermittlung ausgewählter Aspekte, die die Relevanz der vorliegenden Arbeit verdeutlichen.<sup>1</sup>

In Abschnitt 2.1 wird zunächst die vergangene und – trotz der aktuellen Krise – auch für die Zukunft prognostizierte steile Entwicklung des Weltluftverkehrs dargestellt, die in den letzten Jahren zu enormen Kapazitätsproblemen an den großen internationalen Flughäfen geführt hat und auch weiterhin große Probleme verursachen wird. Die Folge dieser Kapazitätsprobleme sind vor allem große Verspätungen, die Gegenstand des Abschnitts 2.2 sind.

Da die Kapazitäts- und Verspätungsproblematik durch die Entwicklung von Hub&Spoke-Netzwerken sowie strategischen Allianzen noch verstärkt worden ist, werden diese in den Abschnitten 2.3 und 2.4 näher betrachtet. Im anschließenden Abschnitt 2.5 wird aufgezeigt, welche Bedeutung die Pünktlichkeit für den Luftverkehr allgemein, insbesondere aber auch in den Hub&Spoke-Netzen der großen Flugesellschaften beziehungsweise Allianz-Systeme hat.

Abschnitt 2.6 gibt eine kurze Einführung in zwei Konzepte, *Congestion Pricing* und *Collaborative Decision Making*, die als Reaktion auf die zunehmende Kapazitäts- und Verspätungsproblematik entstanden sind und deren Ziel eine effizientere Verteilung und Nutzung der knappen Ressourcen des Luftverkehrs und damit implizit eine Verbesserung der Pünktlichkeit ist.

Zum Abschluss des Kapitels werden die Deutsche Lufthansa AG (Abschnitt 2.7) und der Flughafen Frankfurt/Main (Abschnitt 2.8) näher vorgestellt.

---

<sup>1</sup> Für eine aktuelle und umfassende Einführung in den Luftverkehr sei beispielsweise auf die Bücher von Maurer (2006) und Pompl (2007) verwiesen.

## 2.1 Entwicklung des Luftverkehrs

Der weltweite Luftverkehr war in den letzten Jahrzehnten durch ein steiles Wachstum gekennzeichnet, was Abbildung 2.1 verdeutlicht, in der die Entwicklung der jährlichen Passagierzahlen sowie der Transportleistung in Passagier-Kilometern der Linienfluggesellschaften der ICAO-Mitgliedsstaaten seit 1971 einschließlich einer Prognose bis zum Jahr 2025 dargestellt ist.<sup>2</sup>

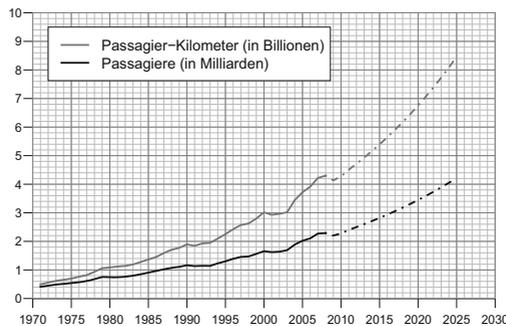


Abbildung 2.1: Entwicklung des weltweiten Linien-Luftverkehrs von 1971 bis 2008 sowie Prognose der weiteren Entwicklung bis 2025 [eigene Darstellung auf Basis von Zahlen aus International Civil Aviation Organization (1981) bis International Civil Aviation Organization (2009b)].

Mit Ausnahme der Jahre 1991 (erster Golfkrieg) und 2001 (Terroranschläge vom 11. September) sowie des auf Grund der aktuellen Finanz- und Wirtschaftskrise erwarteten Einbruchs in 2009 sind die weltweiten Passagierzahlen und die geleisteten Passagier-Kilometer stetig angestiegen; allein von 2002 bis 2008 wuchs die Zahl der Passagiere um rund 40%. In Deutschland war der Anstieg der Passagierzahlen im Linienverkehr in den letzten Jahren sogar noch größer; so stieg die Zahl der an deutschen Flughäfen im *Linienverkehr* abgefertigten Passagiere von 104,7 Millionen im Jahr 2002 um über 50% auf 158,7 Millionen im Jahr 2008 (vergleiche die Zahlen in Statistisches Bundesamt (2003) und Statistisches Bundesamt (2009)).

Die rasante Entwicklung des Luftverkehrs wird sich gemäß der vorliegenden Prognosen in den nächsten Jahrzehnten fortsetzen, auch wenn die aktuelle Krise zu

<sup>2</sup> Die International Civil Aviation Organization (ICAO) ist eine weltweite Luftfahrtorganisation, die als Sonderorganisation der Vereinten Nationen (UNO) als öffentlich-rechtliche Vertretung aller am zivilen, internationalen Luftverkehr beteiligten und als Mitglied der UNO zugelassenen Staaten dient (Maurer, 2006, S. 137). Sie hatte im August 2009 190 Mitgliedstaaten (International Civil Aviation Organization, 2009a).

einem vorübergehenden Rückgang des weltweiten Luftverkehrs geführt hat. Vor Beginn der Krise ging die International Civil Aviation Organization (2007b) noch davon aus, dass die Zahl der Passagiere im Linienverkehr ausgehend vom Jahr 2005 bis zum Jahr 2025 jährlich um 4,1% auf dann 4,5 Milliarden ansteigen würde, während die geleisteten Passagier-Kilometer sogar um 4,6% pro Jahr auf 9,18 Billionen im Jahr 2025 anwachsen und im gleichen Zeitraum die Flugbewegungen um 3,6% sowie die transportierten Fracht-Tonnen um 5,5% pro Jahr steigen würden.

Zu ähnlichen Wachstumsraten kamen auch weitere vorliegende Prognosen.<sup>3</sup> Beispielsweise prognostizierte das Airports Council International (2007) bis zum Jahr 2025 weltweite jährliche Wachstumsraten von 4% für die Passagierzahl, 5,4% für die transportierte Fracht und 2,8% für die Anzahl der Flugbewegungen.<sup>4</sup> Airbus S.A.S. (2007) sagte voraus, dass die weltweit geleisteten Passagier-Kilometer bis zum Jahr 2026 um durchschnittlich 4,9% pro Jahr und die geleisteten Fracht-Tonnen-Kilometer sogar um 5,8% pro Jahr steigen würden. Dabei gingen alle Prognosen davon aus, dass der internationale Luftverkehr insgesamt stärker wachsen würde als der inländische Luftverkehr, was insbesondere für die Deutsche Lufthansa AG mit einem großen Anteil an internationalen Flügen sowie den Flughafen Frankfurt als große internationale Drehscheibe von Bedeutung ist.<sup>5</sup>

Auch wenn diese Prognosen vermutlich auf Grund des aktuellen Einbruchs des Luftverkehrs nach unten korrigiert werden müssen, wird sich an der Tendenz eines langfristigen Anstiegs des Luftverkehrs nicht viel ändern. So erwartet die International Civil Aviation Organization (2009b) in ihrer neuesten Prognose zwar einen Rückgang der geleisteten Passagier-Kilometer um 3,8% im Jahr 2009, sagt aber gleichzeitig eine anschließende Erholung mit Wachstumsraten von 3,3% beziehungsweise 5,5% in den Jahren 2010 und 2011 voraus. Auch EUROCONTROL (2009) geht in einer aktuellen mittelfristigen Prognose der Flugbewegungen im europäischen Luftraum davon aus, dass der Luftverkehr nach 2010 zu Wachstumsraten von 3,5 bis 4,5% zurückkehren wird.

Das stetige Wachstum des Luftverkehrs führt zu Kapazitätsproblemen, da die Kapazitäten insbesondere an den Flughäfen, aber auch in Teilen des Luftraums, nicht mit diesem Wachstum Schritt halten können. So berichten Bratu & Barnhart (2005, S. 2), dass die Anzahl der Flüge der kommerziellen Fluggesellschaften in den USA

---

<sup>3</sup> Da jede Prognose-Studie eine andere Datenbasis verwendet, werden hier nur die vorhergesagten Wachstumsraten vorgestellt, nicht aber die absoluten Zahlen.

<sup>4</sup> Das Airports Council International (ACI) ist die 1991 zum gegenseitigen Erfahrungsaustausch und als Interessenvertretung bei internationalen Verhandlungen gegründete internationale Vereinigung der Verkehrsflughäfen (Klußmann & Malik, 2007, S. 6).

<sup>5</sup> Weitere Details über die Deutsche Lufthansa AG und den Flughafen Frankfurt/Main folgen in den Abschnitten 2.7 und 2.8.

von 1989 bis 2000 um 37% gestiegen ist, während die Flughafenkapazitäten im selben Zeitraum nur um 1% wuchsen. In Europa geht EUROCONTROL (2008a, S. 14–16) in einer langfristigen Prognose des Luftverkehrs im europäischen Luftraum davon aus, dass sich das Wachstum auf Grund des zunehmenden Einflusses von Kapazitätsengpässen an Flughäfen in einigen Jahren verlangsamen wird und dass aus demselben Grund im Jahr 2030 je nach Szenario bis zu 7 Millionen nachgefragte Flüge nicht bedient werden können.<sup>6,7</sup>

Noch dramatischer können sich die Engpässe an einzelnen Flughäfen auswirken. Die Intraplan Consult GmbH (2006, S. 37–39) kommt zum Beispiel in einer Luftverkehrsprognose für den Flughafen Frankfurt/Main zu dem Ergebnis, dass ausgehend von 477 000 Flügen und 50,8 Millionen Passagieren im Jahr 2004 bei Inbetriebnahme einer dritten Start- und Landebahn im Jahr 2010 bis zum Jahr 2020 die Anzahl der jährlichen Flugbewegungen auf 701 000 und die Zahl der abgefertigten Passagiere auf 88,3 Millionen ansteigen wird, während ohne den Bau der neuen Bahn im Jahr 2020 nur 520 000 Flüge beziehungsweise 64,1 Millionen Passagiere abgefertigt werden können.<sup>8</sup>

Die zunehmenden Kapazitätsprobleme im Luftverkehr führen allerdings nicht nur zu einer unbefriedigten Nachfrage, sondern wirken sich auch auf Zuverlässigkeit und Pünktlichkeit des Luftverkehrs aus, wie der folgende Abschnitt verdeutlicht.

## 2.2 Verspätungen im Luftverkehr

Nach internationalen Standards gilt ein Flug erst dann als verspätet, wenn er um mehr als 15 Minuten von seinem Flugplan abweicht (Frank & Mederer, 2002).<sup>9</sup> Abbildung 2.2 zeigt die Entwicklung des Anteils gemäß dieser Definition verspäteter

---

<sup>6</sup> EUROCONTROL ist die europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt, zu deren Aufgaben unter anderem die Durchführung der Verkehrsflugssteuerung in den Mitgliedsstaaten der European Civil Aviation Conference (ECAC), einer zivilen Luftfahrtorganisation analog zur ICAO, die Vereinheitlichung der Flugsicherungssysteme in Europa sowie die Untersuchung von Verspätungen im Luftverkehr gehören (Maurer, 2006, S. 139).

<sup>7</sup> Die knappen Kapazitäten zeigen sich auch in den anderen genannten Prognosen, da diese für die Anzahl der Flugbewegungen jeweils ein geringeres jährliches Wachstum vorhersagen als für die Passagierzahl. Das prognostizierte Wachstum der Passagierzahlen lässt sich daher nur über größere Flugzeuge erreichen.

<sup>8</sup> Auch hier sei für weitere Details zum Flughafen Frankfurt/Main auf Abschnitt 2.8 verwiesen.

<sup>9</sup> Diese relativ großzügige Definition trägt der Tatsache Rechnung, dass ein Linienflug ein komplexer Prozess ist, der vielen externen Störungen unterliegen und daher nicht exakt nach Plan durchgeführt werden kann. Sie ist allerdings gerade bei Kurzstreckenflügen nicht ganz unproblematisch, wenn man bedenkt, dass zum Beispiel bei einer geplanten Flugzeit von 45 Minuten eine Verspätung von 15 Minuten bereits eine erhebliche Abweichung vom Flugplan darstellt.

Abflüge bei Flügen innerhalb der USA sowie bei innereuropäischen Flügen von 1992 bis 2007.

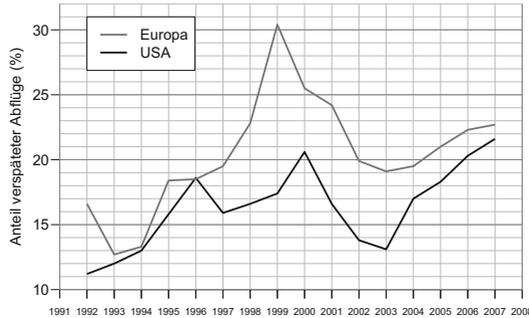


Abbildung 2.2: Entwicklung des Anteils verspäteter Abflüge bei Flügen innerhalb der USA sowie innerhalb Europas von 1992 bis 2007 [eigene Darstellung auf Basis von Zahlen aus Association of European Airlines (2000) und Association of European Airlines (2008c) für Europa sowie Bureau of Transportation Statistics (2009) für die USA].<sup>10</sup>

Ein Vergleich der Abbildungen 2.1 und 2.2 verdeutlicht, dass sowohl in den 90er Jahren als auch in den Jahren ab 2003 der starke Anstieg des Luftverkehrs mit einem ebenso starken Anstieg der Verspätungsquoten einherging, während der Anteil verspäteter Abflüge zu Beginn des neuen Jahrtausends, als der Luftverkehr in Folge der Terroranschläge vom 11. September 2001 stagnierte, deutlich zurückging.<sup>11</sup> Dabei war die Entwicklung in Europa insbesondere in den 90er Jahren noch deutlich dramatischer als in den USA, da es zu Kapazitätsproblemen in der Flugsicherung

<sup>10</sup> Die Zahlen in Bureau of Transportation Statistics (2009) basieren auf den Angaben aller US-Fluggesellschaften, die mindestens einen Anteil von 1% am Umsatz inneramerikanischer Linienflüge haben. Die europäischen Zahlen repräsentieren die Angaben der Mitglieder der Association of European Airlines (AEA), einer Vereinigung der wichtigsten europäischen Fluggesellschaften, die im Dezember 2008 einschließlich der Deutschen Lufthansa AG 35 Mitglieder hatte (Association of European Airlines, 2008a).

Da die AEA ihre Statistik im Jahr 2008 von Kalenderjahren auf Flugplanperioden umgestellt hat und somit für Europa keine vergleichbare Quote für das Jahr 2008 vorliegt, wird auf eine Darstellung der Verspätungsquoten für 2008 verzichtet. Es soll aber erwähnt werden, dass die Verspätungsquoten mit der Abschwächung des Luftverkehrswachstums auf Grund der Finanz- und Wirtschaftskrise wieder deutlich gesunken sind.

<sup>11</sup> Die Kausalität des offensichtlichen Zusammenhangs zwischen Luftverkehrswachstum und Verspätungen wurde bereits empirisch nachgewiesen. So kommen Hsiao & Hansen (2006) in einer ökonometrischen Analyse der durchschnittlichen täglichen Verspätung inneramerikanischer Flüge zu dem Ergebnis, dass 31% des Anstiegs der Verspätungen von Anfang 2004 bis Anfang 2005 auf das Verkehrswachstum in diesem Zeitraum zurückzuführen sind.

kam, die zusätzlich noch durch den Kosovo-Konflikt im Jahr 1999 verstärkt wurden (Bennett, 1999).<sup>12</sup>

Bei der Interpretation der Verspätungsquoten muss berücksichtigt werden, dass es sich um Durchschnitte handelt, bei denen die teilweise noch viel größeren Verspätungsprobleme an den großen Flughäfen durch die guten Pünktlichkeitsraten an kleineren, weniger verstopften Flughäfen ausgeglichen werden (Howart & O’Toole, 2005). So starteten beispielsweise am größten europäischen Flughafen, London Heathrow, im Jahr 2007 sogar 35,5% der innereuropäischen Flüge mit einer Verspätung von mehr als 15 Minuten, während insgesamt „nur“ 22,7% aller von AEA-Mitgliedern durchgeführten innereuropäischen Flüge verspätet abflogen (Association of European Airlines, 2008c).

Hinzu kommt, dass die Verspätungsquoten häufig bei Langstreckenflügen noch deutlich höher liegen, da bei diesen in der Regel auf Grund der niedrigeren Flugfrequenz und der besseren Möglichkeit, Verspätungen unterwegs auszugleichen, länger auf verspätete (Anschluss-)Passagiere gewartet wird. Beispielsweise hoben in 2007 am Frankfurter Flughafen 20,1% der innerdeutschen, 25,7% der europäischen und sogar 34,8% der interkontinentalen Lufthansa-Flüge mit einer Verspätung von mehr als 15 Minuten ab (Association of European Airlines, 2008b).

Schließlich ist noch zu beachten, dass sich die Prozentzahlen jeweils auf die tatsächlich durchgeführten Flüge beziehen, gestrichene Flüge, deren Anteil laut Bureau of Transportation Statistics (2009) im betrachteten Zeitraum zwischen 1% und 4% der geplanten jährlichen inneramerikanischen Flüge ausmachte, werden dagegen häufig nicht in der üblichen Verspätungs- beziehungsweise Pünktlichkeitsstatistik berücksichtigt.<sup>13</sup> Dabei sind es gerade die gestrichenen Flüge, die aus Sicht der Passagiere die größten Verspätungen verursachen.<sup>14</sup>

Die Verspätungsursachen sind dabei nicht immer so eindeutig identifizierbar wie die Höhe der Verspätungen. Man unterscheidet *primäre Verspätungen*, bei denen das

---

<sup>12</sup> Ein weiterer Grund für die deutlich höheren Verspätungsquoten in Europa liegt darin, dass bei Kapazitätsproblemen im Luftraum oder am Zielflughafen Flüge in Europa in der Regel am Gate gehalten werden, was zu einer offiziellen Abflugverspätung führt, während Flüge in den USA trotzdem pünktlich losrollen können und es dann aber auf dem Weg zur Startbahn oder in der Luft zu weiteren Verspätungen kommt (EUROCONTROL, 2008b, S. 36).

<sup>13</sup> Die Begriffe *amerikanisch* und *inneramerikanisch* beziehen sich in dieser Arbeit ausschließlich auf die USA.

<sup>14</sup> Bratu & Barnhart (2005), die auf Basis der Daten einer großen amerikanischen Fluggesellschaft einen Verspätungsrechner aus Passagiersicht entwickeln, kommen zu dem Ergebnis, dass die auf Flüge bezogenen Verspätungsstatistiken die Passagierverspätungen deutlich unterschätzen und dass für die verwendeten Daten im August 2000 die durchschnittliche Verspätung eines Passagiers vor allem auf Grund gestrichener Flüge und verpasster Anschlüsse 1,7 mal so groß war wie die durchschnittliche Verspätung eines Fluges.

Flugzeug trotz ausreichender Bodenzeit verspätet startet, von *reaktionären* oder *Rotations-Verspätungen*<sup>15</sup>, die dadurch entstehen, dass das Flugzeug mit Verspätung landet und die geplante Bodenzeit keinen ausreichend großen Puffer enthält, um dennoch einen pünktlichen Abflug zu gewährleisten; reaktionäre Verspätungen können darüber hinaus entstehen, wenn auf umsteigende Passagiere oder Crews von anderen verspäteten Flügen gewartet werden muss. Laut EUROCONTROL (2008b, Kap. 4) wurden in 2007 rund 55% der verspäteten Abflüge in Europa durch primäre Verspätungen verursacht, die restlichen 45% dagegen durch reaktionäre Verspätungen.<sup>16</sup> Das Verhältnis aus reaktionären zu primären Verspätungen ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen; während im Jahr 2003 eine Minute primäre Verspätung 0,54 Minuten reaktionäre Verspätung nach sich zog, verursachte im Jahr 2007 jede Minute primäre Verspätung im Durchschnitt 0,8 Minuten reaktionäre Verspätung. Gründe für die gestiegene Sensitivität bezüglich primärer Verspätungen sind vermutlich der starke Anstieg des Verkehrsaufkommens und die damit verbundene höhere Auslastung der Kapazitäten (EUROCONTROL, 2008b, S. 35).<sup>17</sup>

Die Ursachen für die primären Verspätungen wiederum – und damit indirekt auch für die daraus folgenden Rotationsverspätungen – lagen in 2007 gemäß EUROCONTROL (2008b, Kap. 4) zu 76% in Verzögerungen im *Turnaround-Prozess*<sup>18</sup>, die sowohl durch die Fluggesellschaft als auch durch den Flughafen verschuldet sein können, und zu 24% im Air Traffic Flow Management (ATFM), das auf Grund von Wetterproblemen und Kapazitätsengpässen an den Flughäfen oder im zu durchfliegenden Luftraum die Startfreigabe zeitlich hinausschieben kann.

Die AEA verwendet eine etwas andere Kategorisierung der Verspätungsursachen und kommt zu dem Ergebnis, dass in 2007 42% der primären Abflugverspätungen innereuropäischer Flüge ihrer Mitglieder auf Grund von Verzögerungen oder

---

<sup>15</sup> Unter *Rotation* versteht man den Umlauf eines Flugzeugs, also die zeitliche und örtliche Abfolge von Flügen und Bodenereignissen, die ein Flugzeug hintereinander absolviert (Maurer, 2006, S. 199). Bei Kurzstreckenflugzeugen umfasst eine Rotation in der Regel einen Tag, bei Langstreckenflugzeugen kann sie sich auch über einen längeren Zeitraum erstrecken.

<sup>16</sup> Die von EUROCONTROL veröffentlichten Pünktlichkeitsdaten und Verspätungsursachen beziehen sich zwar auf die ECAC-Staaten (vergleiche Fußnote 6) und haben somit eine andere Datenbasis als die oben verwendeten, auf Angaben der AEA-Fluggesellschaften basierenden Verspätungsquoten, die Überschneidung der Datenbasen ist aber so groß, dass eine Verknüpfung der Statistiken nicht zu falschen Aussagen führen sollte.

<sup>17</sup> Die allgemein hohe Sensitivität des Luftverkehrs bezüglich originärer Verspätungen ergibt sich aus der weit verbreiteten *Hub&Spoke*-Netzstruktur, die in Abschnitt 2.3 detailliert erläutert wird. In diesem Kontext wird auch noch näher auf die Einflussfaktoren reaktionärer Verspätungen eingegangen.

<sup>18</sup> Mit *Turnaround* bezeichnet man den Standard-Fall der Bodenabfertigung, bei dem das Flugzeug nach dem eingehenden Flug für den anschließenden ausgehenden Flug *umgedreht* wird.

technischen Problemen während der Flugzeugabfertigung auftraten, während sich die restlichen 58% durch Wetterprobleme, Engpässe am Flughafen oder verzögerte Startfreigaben ergaben (Association of European Airlines, 2008c). Der Hauptunterschied zu den vorangegangenen Angaben besteht darin, dass hier nur durch die Fluggesellschaft und ihre Dienstleister verursachte Verspätungen dem Abfertigungsprozess zugewiesen werden, während in EUROCONTROL (2008b) auch Probleme durch Sicherheitskontrollen oder andere Prozesse, die im Verantwortungsbereich des Flughafens liegen, dem Turnaround-Prozess zugeordnet werden.

Der Luftverkehr in den USA zeigt ähnliche Tendenzen. Laut Bureau of Transportation Statistics (2009), das die *Ankunftsverspätung* inneramerikanischer Flüge mit mindestens 15 Minuten Ankunftsverspätung in fünf Kategorien einteilt, ist der Anteil der Rotationsverspätungen an den gesamten Verspätungsminuten ebenfalls in den letzten Jahren deutlich angestiegen und lag in 2007 bei rund 38%. Von den primären Verspätungen entfielen ca. 46% auf Probleme der Fluggesellschaften während der Bodenabfertigung, die restlichen 54% auf andere Ursachen wie Wetter oder Kapazitätsengpässe.

Diese Zahlen verdeutlichen, dass der Luftverkehr sehr anfällig für Folgeverspätungen ist und dass ein Großteil der primären Verspätungen während der Bodenabfertigung entsteht. Die Engpässe befinden sich also zunehmend am Boden (Howart & O'Toole, 2005), so dass dort ein besonderes Optimierungspotenzial besteht. Dies gilt insbesondere auch für den Flughafen Frankfurt/Main, an dem neben den Bodenabfertigungsprozessen (einschließlich technischer Probleme) mit einem Anteil von rund 36% an den primären Abflugverspätungen innereuropäischer Flüge auch Verzögerungen auf Grund zunehmender Kapazitätsengpässe mit einem Anteil von 28% eine große Rolle spielen (vergleiche die Zahlen in Association of European Airlines (2008b)).

Die wachsenden Kapazitätsprobleme im Luftverkehr machen sich aber nicht nur in den Verspätungsstatistiken bemerkbar, sondern auch in einer zunehmenden Verlängerung der geplanten *Blockzeiten*.<sup>19</sup> Golaszewski & Ballard (2001) berichten, dass

---

<sup>19</sup> Die *tatsächliche Blockzeit* „bezeichnet den Zeitraum zwischen off-block und on-block, also zwischen dem Entfernen der Bremsklötze am Flugzeug vor dem Start und dem Anlegen der Bremsklötze nach der Landung“ (Klufmann & Malik, 2007, S. 40). Diese beiden Zeitpunkte werden in der Regel auch als Abflug und Ankunft eines Fluges definiert. Die *geplante Blockzeit* entspricht dem Zeitraum zwischen geplanter Abflugzeit, Scheduled Time of Departure (STD), und geplanter Ankunftszeit, Scheduled Time of Arrival (STA), und stellt einen wichtigen Parameter in der Flugplanung von Fluggesellschaften dar.

Entsprechend ist die Zeit zwischen STA und STD die geplante Bodenzeit, die Zeit zwischen tatsächlicher Ankunft und tatsächlichem Abflug die tatsächliche Bodenzeit. Für weitere Definitionen von Zeitpunkten und Zeiträumen siehe Abschnitt 4.2.