

# Kapazität von Infrastrukturanlagen der General Aviation in der Schweiz

Entwicklung eines Modelles zur Kapazitätsabschätzung für die planerische Weiterentwicklung der Luftfahrtinfrastrukturen in der Schweiz

Joël-Pascal Buntschu

Leitung: Prof. Dr. Ulrich Weidmann

Betreuung: Hermann Orth

In Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL)

Masterarbeit  
Studiengang Raumentwicklung und Infrastruktursysteme

Juni 2013



# Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	1
	Dank.....	2
1	Einleitung.....	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.1.1	Ausgangslage .....	3
1.1.2	Zielsetzung.....	4
1.1.3	Vorgehen .....	4
1.2	Stand der Forschung .....	5
1.2.1	Internationale Grundlagen .....	5
1.2.2	Situation in der Schweiz .....	6
2	Systemanalyse.....	7
2.1	Das System Luftfahrtinfrastruktur .....	7
2.1.1	Luftseite.....	9
2.1.2	Landseite .....	24
2.2	Rechtliche Aspekte von Luftinfrastrukturen in der Schweiz .....	29
2.2.1	Bundesrecht .....	29
2.2.2	Umgang mit internationalem Luftverkehrsrecht.....	30
2.2.3	Lokales Recht.....	31
2.3	Definition Kapazität .....	32
2.3.1	Luftseitige Kapazität .....	32
2.3.2	Landseitige Kapazität.....	33
2.4	Einflussfaktoren und Berechnung der Kapazität .....	34
2.4.1	Umwelt.....	34
2.4.2	Luftseitige Infrastruktur .....	46
2.4.3	Landseitige Infrastruktur.....	54
2.4.4	Zusammensetzung Luftverkehr.....	61

3	Praktische Umsetzung.....	64
3.1	Grundlagen.....	64
3.1.1	Flugzeugdatenbank.....	65
3.1.2	Meteorologische Daten .....	66
3.2	Modellkonzept .....	68
3.2.1	Modellteil Charakteristik / Eignung.....	69
3.2.2	Modellteil Kapazität Luftseitig .....	69
3.2.3	Modellteil Kapazität Landseitig.....	70
4	Untersuchung von Fallbeispielen .....	71
4.1	Flughafen Bern-Belp.....	71
4.1.1	Heutige Nutzung .....	72
4.1.2	Potenzial.....	72
4.1.3	Fazit .....	74
4.2	Flugplatz St.Gallen-Altenrhein .....	75
4.2.1	Heutige Nutzung .....	75
4.2.2	Potenzial.....	76
4.2.3	Fazit .....	77
4.3	Flugplatz Birrfeld.....	78
4.3.1	Heutige Nutzung .....	78
4.3.2	Potenzial.....	78
4.3.3	Fazit .....	80
4.4	Flugplatz Buttwil.....	81
4.4.1	Heutige Nutzung .....	81
4.4.2	Potenzial.....	81
4.4.3	Fazit .....	82
4.5	Flugplatz Speck-Fehraltorf.....	83
4.5.1	Heutige Nutzung .....	83
4.5.2	Potenzial.....	84
4.5.3	Fazit .....	84
4.6	Gesamtbeurteilung der Fallbeispiele .....	85
4.6.1	Reserven .....	85
4.6.2	Auslastung .....	86

5	Untersuchungen der Einflussgrössen.....	87
5.1	Effekte einzelner Faktoren.....	87
5.1.1	Umweltbedingungen.....	87
5.1.2	Erschliessung.....	89
5.1.3	Terminal.....	89
5.1.4	Vorfeld (Abfertigung).....	90
5.1.5	Start-/ Landebahn.....	90
5.1.6	Rollwege.....	91
5.1.7	Luftraum.....	91
5.1.8	Flugzeugmix.....	94
6	Synthese und Empfehlungen.....	96
6.1	Weitergehende Forschung.....	96
6.1.1	Aktualisierung.....	96
6.1.2	Regionalisierung.....	97
6.1.3	Zusammenarbeit mit Privatwirtschaft.....	98
6.1.4	Kapazitätsnachfrage in der Schweizer Luftfahrt.....	98
6.2	Bestehende Reserven.....	99
6.2.1	SIL-Festlegungen.....	99
6.2.2	Reserven und deren Nutzung.....	99
6.3	Neue Kategorisierung der Schweizer Luftfahrtinfrastruktur.....	101
6.3.1	Begründung.....	101
6.3.2	Neue Kategorisierung.....	102
7	Literatur.....	106
	Anhang.....	110

8	Modellanleitung.....	A-1
8.1	Umwelt.....	A-1
8.1.1	Recht .....	A-1
8.1.2	Meteorologie.....	A-2
8.2	<b>Eingabe Charakteristik - Landseitige Infrastruktur</b> .....	A-3
8.2.1	Erschliessung allgemein .....	A-3
8.2.2	Erschliessung Öffentlicher Verkehr .....	A-3
8.2.3	Erschliessung Motorisierter Individualverkehr .....	A-4
8.2.4	Terminal Abflug .....	A-4
8.2.5	Terminal Ankunft.....	A-4
8.3	<b>Eingabe Charakteristik - Luftseitige Infrastruktur</b> .....	A-5
8.3.1	Flugsteig.....	A-5
8.3.2	Abfertigung .....	A-5
8.3.3	Pisten .....	A-5
8.3.4	Rollwege.....	A-6
8.3.5	Vorfeld und Standplätze.....	A-6
8.3.6	An- / Abflüge.....	A-7
8.3.7	Kontrollierte Lufträume .....	A-7
8.4	<b>Eingabe Flugzeuge</b> .....	A-8
8.4.1	Flächenflugzeuge.....	A-8
8.4.2	Flugverkehr .....	A-8
8.4.3	Beschleunigungs- / Bremsvermögen .....	A-8
8.4.4	Touch-and-Go .....	A-9

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Schematischer Aufbau einer Luftfahrtinfrastruktur.....	8
Abbildung 2	Schematischer Aufbau des Schweizer Luftraums.....	10
Abbildung 3	Beispiel Luftraum D (CTR Sion dunkelblau gestrichelt, TMA Sion hellblau) .....	11
Abbildung 4	Schematische Darstellung von An- und Abflugrouten für IFR und VFR .....	12
Abbildung 5	Beispiel Instrumenten-Abflugrouten ab Flugplatz Grenchen .....	14
Abbildung 6	Beispiel Visual Approach Chart (VAC) Flugplatz Bad Ragaz.....	14
Abbildung 7	Verschiedene Arten der Längenbemessung von Start- und Landebahnen .....	18
Abbildung 8	Empfohlene Breite der Start- und Landebahn in Abhängigkeit zur Länge.....	19
Abbildung 9	Klassifizierung von Flughäfen nach der Löschwasser-/ Schaumteppichleistung.....	23
Abbildung 10	Anteile des ÖV im Personentransport auf Flughäfen der USA .....	26
Abbildung 11	Anteile des ÖV im Personentransport auf internationalen Flughäfen .....	26
Abbildung 12	Kapazitätssimulation Luftraum TMA Bern .....	39
Abbildung 13	Weg-Zeit-Diagramm Flugbetrieb.....	45
Abbildung 14	Pistensystem Flughafen Zürich.....	48
Abbildung 15	Pistensystem Flughafen München.....	48
Abbildung 16	Ausschnitt der grafischen Modelldarstellung (siehe Anhänge B-2, B-3, B-4) ..	68
Abbildung 17	Luftbild des Flughafens Bern-Belp .....	72
Abbildung 18	Modellauswertung der Kapazität Luftseitig Flughafen Bern-Belp .....	73
Abbildung 19	Luftbild des Flugplatzes St.Gallen-Altenrhein .....	75
Abbildung 20	Modellauswertung der Kapazität Luftseitig Flugplatz St.Gallen-Altenrhein..	76
Abbildung 21	Luftbild des Flugplatzes Birrfeld .....	78
Abbildung 22	Luftbild des Flugplatzes Buttwil .....	81
Abbildung 23	Luftbild des Flugplatzes Speck-Fehraltorf.....	83
Abbildung 24	Klassifizierung von Luftfahrtinfrastrukturen in Kanada, den USA und GB....	102

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Klassifizierung des Schweizer Luftraums .....	10
Tabelle 2	Codierung des Belag-Codes nach ICAO .....	17
Tabelle 3	Begriffe der Länge einer Start- und Landebahn .....	17
Tabelle 4	Zeitplan für die Abfertigung einer SAAB 340 .....	22
Tabelle 5	Zeitplan für die Abfertigung eines Airbus A319.....	22
Tabelle 6	Durchschnittliche Verweilzeiten auf der Flughafenvorfahrt .....	27
Tabelle 7	Arbeitsaufwand Flugleitung pro Flugbewegung .....	38
Tabelle 8	Simulation von Sektorkapazitäten auf den Flughäfen Zürich und Genf .....	40
Tabelle 9	Abstandsvorschriften nach Anflugverfahren (in nm) .....	42
Tabelle 10	Vorhandene und kapazitätsbestimmende Elemente der Abfertigung .....	52
Tabelle 11	Kombinierte Flugzeug-Codierung nach Kategorisierungsraster der ICAO .....	66
Tabelle 12	Auswertung der Reserven auf den untersuchten Flugplätzen.....	85
Tabelle 13	Auswertung der Auslastung auf den untersuchten Flugplätzen.....	86
Tabelle 14	Einfluss von Wetterphänomenen auf die Kapazität nach Regionen.....	88
Tabelle 15	Einfluss der Anteile je Flugmodus auf die Kapazität des Luftraums .....	93
Tabelle 16	Einfluss der Professionalität der Piloten auf die Kapazität des Luftraums .....	93
Tabelle 17	Beispielresultate für den Einfluss einheitlicher Flugzeugtypen .....	94
Tabelle 18	Kategorisierung von Luftfahrtinfrastrukturen nach Nutzungszweck .....	103
Tabelle 19	Möglicher Kriterienkatalog für die Kategorisierung von Schweizer Luftfahrtinfrastrukturanlagen.....	104
Tabelle 20	Mögliche Einteilung der Schweizer Luftfahrtinfrastrukturen (Ausschnitt)...	105
Tabelle 21	Aufbau des Excel-Modells.....	A-1



## Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Englisch	Deutsch
ACN	Aircraft Classification Number	Flugzeugklassifizierungsnummer
ACRP	Airport Cooperative Research Program	US-amerikanisches Flughafen-Forschungsprogramm
APP	Approach	Anflug / Landung
BAZL		Bundesamt für Zivilluftfahrt
Bew		Bewegungen (aviat. für Start oder Landung)
BV		Bundesverfassung
d	Day	Tag (Einheit für Zeit)
DEP	Departure	Abflug / Start
d.h.		das heisst
FAA	Federal Aviation Administration	US-amerikanische Luftfahrtaufsichtsbehörde
FAF	Final Approach Fix	Beginn des Endanflugs
FGZO		Fluggruppe Zürcher Oberland
FL	Flight level	aviat. Flugfläche
Ft	Feet	Fuss (aviat. Einheit für Höhe)
h	Hour	Stunde (Einheit für Zeit)
ICAO	International Civil Aviation Organisation	Internationale Zivilluftfahrt-Organisation
i.d.R.		in der Regel
IFR	Instrument Flight Rules	Instrumentenflug (-regeln)
ILS	Instrument Landing System	Instrumenten-Landesystem
JAA	Joint Aviation Authorities	Vereinigte Luftfahrtbehörden (Europa)

JAR	Joint Aviation Requirements	Gemeinsame Luftfahrtregelungen der JAA
Kn	Knot	Knoten (aviat. Einheit für Geschwindigkeit)
l	Liter	Liter (Mengeneinheit für Flüssigkeiten)
LFG		Luftfahrtgesetz
LuftVo		Deutsche Luftfahrtverordnung
m	Meter	Meter (Einheit für Distanz)
MIV		Motorisierter Individualverkehr
MPa		Megapascal (Einheit für Druck)
nm	Nautic mile	Nautische Meile (aviat. Einheit für Distanz)
ÖV		Öffentlicher Verkehr
PAX	Passangers	Passagiere
PAXFZ		Passagierflugzeuge
PCN	Pavement Classification Number	Belagsklassifizierungsnummer
RFF		Richtlinie zu Feuerwehr- und Rettungswesen auf schweizerischen Flugplätzen
s	Second	Sekunde (Einheit für Zeit)
SID	Standard Instrument Departure	Standard-Instrumentenabflugroute
TSA	Transportation Security Administration	US-amerikanische Transportsicherheitsbehörde
usw.		und so weiter
v.a.		vor allem
VAC	Visual Approach Chart	Sichtanflugkarte
VBA	Visual Basic for Applications	Programmiersprache
VIL		Verordnung über die Infrastruktur der Luftfahrt
VFR	Visual Flight Rules	Sichtflug (-regeln)
z.B.		zum Beispiel

Masterarbeit Studiengang Raumentwicklung und Infrastruktursysteme

## **Kapazität von Infrastrukturanlagen der General Aviation in der Schweiz**

### **Entwicklung eines Modelles zur Kapazitätsabschätzung für die planerische Weiterentwicklung der Luftfahrtinfrastrukturen in der Schweiz**

Joël-Pascal Buntschu  
Hinterrütistrasse 5  
8964 Rudolfstetten-Friedlisberg  
077 417 17 78  
j.buntschu@gmx.ch

## **Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit soll die Grundlagen dafür schaffen, das Angebot von Luftfahrtinfrastrukturen in der Schweiz bezüglich Eignung und Kapazität anhand von objektiven Parametern abzuschätzen. Ziel ist es, die eignungs- und kapazitätsbeeinflussenden Faktoren zu bestimmen, eine mathematische Herleitung für deren Quantifizierung zu finden und diese in einem praxisnahen Anwendungsmodell (Excel) umzusetzen. Empfehlungen zur weiteren Forschung, Nutzung von Reserven sowie Kategorisierung der Schweizer Luftfahrtinfrastrukturen im Rahmen der planerische Weiterentwicklung des Sachplan Infrastruktur Luftfahrt (SIL) schliessen die Arbeit ab.

Grundlagenforschungen und Studien zum Thema Kapazität von Flughäfen stammen primär aus Nordamerika um 1980. Die Adaption von Berechnungsmethoden auf Schweizer Verhältnisse 2013 ist daher nötig. Allgemein wird in einen luftseitigen (Luftraum, Pisten, Rollwege, Vorfeld) und einen landseitigen (Erschliessung, Terminal) Systemteil unterschieden. Am stärksten beeinflusst die Gesamtkapazität die Anzahl Betriebsstunden, welche von den rechtlichen und meteorologischen Bedingungen sowie der Ausgestaltung der Piste abhängt. Die Kapazitäten der luftseitigen Elemente sind stark voneinander abhängig und betreffen alle Flugzeugarten und -grössen, während landseitige Teile isolierter zu betrachten und nur für den Passagierverkehr bedeutend sind.

An 5 Fallbeispielen von kleinen bis mittelgrossen Anlagen wird gezeigt, dass das kapazitätslimitierende Subsystem nicht gleichbleibend ist und für eine seriöse Abschätzung eine individuelle Modellierung notwendig ist, denn Auslastung und Reserven der Anlagen liegen weit auseinander.

Es wird die Überprüfung der Grundlagen sowie eine Nachfragerhebung in der Schweizer Aviatik empfohlen, um eine bedarfsgerechte Weiterentwicklung des SIL zu ermöglichen. Auf Grund der gewonnen Erkenntnisse zum Luftinfrastrukturangebot in der Schweiz wird eine Kategorisierung der Anlagen nach objektiven Kriterien und für definierte, langfristige Nutzungen vorgeschlagen.

## **Schlagworte**

Kapazität von Flughäfen und -plätzen; Einflussfaktoren der Kapazität; Kapazitätsmodell; Luftfahrtinfrastruktur in der Schweiz; Klassifizierung von Flugzeugen und Luftfahrtinfrastrukturen.

## Dank

Ich möchte mich für die Unterstützung aller bedanken, welche zum Gelingen dieser Arbeit einen Beitrag geleistet haben und mich im Laufe des Studiums unterstützten.

**Prof. Dr. Ulrich Weidmann** danke ich für seine vielseitige Unterstützung als Tutor schon vor und während des Studiums, als Dozent im Rahmen der vielen Vorlesungen, welche ich bei Ihm besuchen durften, insbesondere für die angeregten, politischen Diskussionen in den Pausen und nicht zuletzt als leitender Professor für diese Arbeit und seine Bereitschaft, ein Thema ausserhalb seiner sonstigen Berufswelt zu betreuen.

**Hermann Orth** möchte ich herzlich für seine konstruktive, kompetente Betreuung der Arbeit danken. Die Tür zu seinem Sachwissen und zu seinem Büro stand mir jederzeit offen.

Bei den Herren **Martin Bär** und **Bernhard Traber**, Bundesamt für Zivilluftfahrt, bedanke ich mich für die Möglichkeit, eine Arbeit mit einem solchen Praxisbezug durchführen zu können, für die von Ihnen aufgewendeten Stunden bei der Ausformulierung der Aufgabenstellung sowie dem grossen Interesse an meiner Arbeit.

Im Weiteren danke ich besonders **Samuel Ellenberger**, SkyGuide, für den tiefen Einblick in die praktische Welt der Flugsicherung, den er mir ermöglichte und sein spontanes organisatorisches Mithelfen. Ich möchte mich zudem bei **Adrian Meier**, SkyGuide Flughafen Bern, für seine Hilfe bei der Modellvalidierung bedanken sowie bei **Laurent Favey**, SkyGuide Genève, welcher mir seine unveröffentlichten Arbeitsergebnisse zur Luftraumkapazität zur Verfügung stellte.

Dann bedanke ich mich bei **Michael Felder**, Flugplatzleiter St.Gallen-Altenrhein, **Roger Trüb**, Flugplatzleiter Birrfeld, **Patrick Eichenberger**, Flugplatzleiter Buttwil sowie **Daniel Stäubli**, Vorstand FGZO am Flugplatz Speck-Fehraltorf, für ihre Bereitschaft und der genommenen Zeit, die notwendigen Fakten für die Modellierung ihrer Flugplätze zusammenzutragen und die Resultate im Experteninterview zu analysieren.

Zuletzt danke ich meiner Freundin und Familie für den Beistand während der Studienzeit sowie ihr aufopferndes Lektorieren der vorliegenden Arbeit.

# 1 Einleitung

Die vorliegende Masterarbeit bildet den Abschluss zum Studiengang Raumentwicklung und Infrastruktursysteme zum Erlangen des Master in Science ETH. „Die Studierenden stellen damit ihre Fähigkeit, selbständig, strukturiert und wissenschaftlich zu arbeiten unter Beweis“ (D-BAUG 2012).

## 1.1 Aufgabenstellung

Zum Abschluss des Studiums will ich mit meiner Master-Arbeit ein Themenbereich bearbeiten, welcher:

- Im Studium nicht behandelt wird
- Einen Praxisbezug hat bzw. aus der Praxis kommt
- Nach Abschluss der Arbeit einen weitergehenden Nutzen nach sich zieht

Obwohl das Risiko eines Misserfolges auf Grund von Unvorhergesehenem grösser ist, motiviert mich ein selbst gewähltes Thema für die bevorstehende Bearbeitungszeit.

Die vorliegende Arbeit wird in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL durchgeführt, welche die Forschungsfrage aufgeworfen hat. Die Resultate sollen als Grundlagen in die längerfristige Planung der Luftfahrtinfrastrukturen in der Schweiz im Rahmen des Sachplan Infrastruktur Luftfahrt (SIL) einfließen.

### 1.1.1 Ausgangslage

In der Schweiz ist der Bund bzw. das BAZL im Rahmen des SIL für die Planung der Luftfahrtinfrastrukturanlagen verantwortlich. Ihm obliegt auch die Aufsicht, sicherheitsrelevante Überwachung und die Genehmigung baulicher Massnahmen an Luftfahrtinfrastrukturanlagen. Die Eigentumsverhältnisse und Betreiberstrukturen sind hingegen meist lokal geregelt und differieren stark.

Für kleinere Luftfahrtinfrastrukturen (ohne die Landesflughäfen in Zürich, Genf und Basel-Mulhouse) fehlt bisher eine ganzheitliche Betrachtung sowohl was den Bestand (bestehende Nutzung und Kapazitäten) als auch die Zukunft (Kapazitätsreserven, konzeptionelle Weiterentwicklung) betrifft. Infolgedessen fehlen auch Grundlagen für eine systematische Planung der zukünftigen Entwicklung der Schweizer Luftfahrtinfrastruktur. Gleichzeitig ist das weltweite stete Wachstum der Aviatik insgesamt ungebrochen und auch in der Schweiz wird innerhalb der nächsten 20 - 30 Jahre eine Verdoppelung der Fluggastzahlen erwartet.

### 1.1.2 Zielsetzung

Die Arbeit soll eine Systematik liefern, mit der die Kapazität von Luftfahrtinfrastrukturen in der Schweiz bestimmt, diese klassifiziert und ihr Potential im Hinblick auf ein weiteres Wachstum des Luftverkehrs abgeschätzt werden kann. Dazu ist zu ermitteln, welche Faktoren die Kapazität massgeblich bestimmen, inwieweit der bestehende Flugbetrieb diese auslastet und wie gross die Kapazitätsreserven der bestehenden Luftfahrtinfrastrukturen sind.

Am Ende der Arbeit sollen eine Methodik sowie ein Anwendungsmodell für die Abschätzung der Kapazität und des Potentials einer Luftfahrtinfrastruktur stehen. Aus den Erkenntnissen und Fallbeispielen sind Empfehlungen für die weitere planerische Entwicklung der schweizerischen Luftfahrtinfrastruktur zu entwickeln.

### 1.1.3 Vorgehen

Gegenstand dieser Arbeit ist die schweizerische Luftfahrtinfrastruktur mit Ausnahme der Landesflughäfen, der rein militärisch genutzten Flugplätze sowie reinen Heliports (Helikopterlandeplätze). Anlagen der Luftraumüberwachung und Flugsicherung sind nur Gegenstand der Arbeit, sofern sie die Kapazität der Flugplätze direkt mitbeeinflussen. Es sind alle Nutzer mit Ausnahme des Militärs zu berücksichtigen.

In einem ersten Schritt sind die Faktoren zu identifizieren, die direkten Einfluss auf die Kapazität einer Luftfahrtinfrastruktur ausüben. Dazu sind die Bedingungen des relevanten Luftraumes, der Pisten und Rollwege, der Abfertigungsorganisation, der Gebäude, der landseitigen Erschliessung sowie die politischen und planungsrechtlichen Rahmenbedingungen zu untersuchen. Es ist eine Methodik zu entwickeln, um mittels dieser Faktoren die Kapazität einer Luftfahrtinfrastruktur abzuschätzen.

Mittels der zu entwickelnden Methodik ist für auszuwählende Fallbeispiele zu zeigen, wie die derzeitige Auslastung der Anlagen ist und welche Nutzungsreserven und Perspektiven für eine weitere Entwicklung bestehen.

## 1.2 Stand der Forschung

Die Aviatik ist aus wissenschaftlicher Sicht eine der jüngeren Disziplinen und hat ihre Wurzeln vor allem im Ingenieurwesen der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Das Thema Kapazität war wie bei anderen Infrastrukturentwicklungen auch in der Aviatik lange Zeit kaum von Interesse. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, dass in den Anfängen schlicht so grosse Reserven vorhanden waren, dass Überlegungen zu Engpässen und der Umgang damit als vergebene Liebesmühe betrachtet werden mussten. Den Auslöser, sich wissenschaftlich mit einem Thema auseinander zu setzen, kommt naturgemäss mit dem Auftauchen von Problemen.

Im Bereich der Zivilaviatik, um welche sich die vorliegende Arbeit dreht, manifestierten sich erste Problemstellungen im Bereich von Kapazitäten der Luftfahrt nach der intensiven Wachstumsphase der Passagierluftfahrt nach dem 2. Weltkrieg. In den wirtschaftlichen Aufschwungsphase der 50er- und 60er-Jahren erfuhr auch die Aviatik eine Prosperität, welche, jeweils mit regionalen Verschiebungen des Hauptwachstums, bis heute anhält. Beginnend in den USA, folgte in den 60er- bis 80er-Jahren ein starkes Wachstum in Europa. In den letzten Jahrzehnten war es der asiatische und der arabische Raum, welche das grösste Wachstum erfuhr und die weltweite Aviatik antreibt. Folglich war es den auch in den USA der 60er-Jahre, in welchen sich Kapazitätsprobleme auf Flughäfen zeigten und wo sich Wissenschaftler mit den theoretischen Hintergründen und Grundlagen der Luftfahrtkapazität beschäftigten.

Das Themengebiet Kapazität von Luftfahrtinfrastrukturen ist sehr weit und reicht von der lokalen, landseitigen Erschliessung über die landseitigen Gebäudeteile, die luftseitige Infrastruktur bis hin zur lokalen und internationalen Luftraumorganisation und -überwachung.

### 1.2.1 Internationale Grundlagen

Am Beginn der wissenschaftlichen Untersuchung des Themas Kapazität stand die Luftfahrtbehörde der USA, die Federal Aviation Administration (FAA), welche sich mit einem stark wachsenden Verkehrsaufkommen auf den amerikanischen Flughäfen auseinander setzen musste. In ihrem Auftrag und von eigenen Mitarbeitern wurden in den 1960er und 70er-Jahren viele Grundlagen, theoretisch oder empirisch auf den Flughäfen, entwickelt, welche als Basis für wichtige Standardwerke der „Kapazitätstheorie der Luftfahrt“ dienten. Als die Bibel des Fachgebietes gilt (Horonjeff and McKelvey 1983), welche nicht nur die Erkenntnisse aus den vielen Grundlagenarbeiten in einem Werk zu allen kapazitätsbeeinflussenden Elementen vereinten, sondern auch wichtige und bis heute gültige Berechnungen im Bereich der luftseitigen Kapazität erarbeiteten.

Im Bereich der Kapazität des Luftraumes seien (Couluris 1974) und (Odoni 1979) erwähnt. Die Methoden zur Kapazitätsberechnung und -abschätzung von An- und Abflug im Zusammenhang mit Pistensystemen und Rollwegen sind in (Newell 1979) und (Horonjeff and McKelvey 1983) sehr detailliert behandelt. Neuste Erkenntnisse dazu fasst (Fisher 2012) zusammen.

Besonders auf dem Gebiet der landseitigen Kapazität, also des Terminals und die Erschliessung leisten die fortlaufenden Studien und Berichte des National Research Council (NRC) sowie der FAA wichtige Grundlagenarbeit. Als Beispiele können (TRB 1987) und die ACRP-Reports (Airport Cooperative Research Program) wie (Coogan 2008) genannt werden.

Alle vorgenannten Werke stammen im Wesentlichen aus den Vereinigten Staaten und sind auch anhand der dortigen Luftfahrtinfrastruktur erstellt worden. Auf Grund von doch gewissen kulturellen Unterschieden wäre für die vorliegende Arbeit auch Literatur aus dem europäischen Raum wünschenswert. Wie die Recherche jedoch gezeigt hat, sind Grundlagen auf dem Gebiet der Kapazität von Flughäfen in Europa kaum vorhanden. Wirklich vertieft mit allen Teilen der Thematik hat sich hier nur der Slowene Milan Janic, der seit den 1980er-Jahren verschiedene Arbeiten im europäischen Raum verfasste und auch mehrere Bücher dazu veröffentlichte. So insbesondere (Janic 2000) und (Janic 2009).

### **1.2.2 Situation in der Schweiz**

In der Schweiz ist das Thema der Kapazität von Luftfahrtinfrastrukturen bis heute kein Forschungsgegenstand. Auf universitärer Stufe fehlten bis anhin Ausbildungs- und Forschungsmöglichkeiten im Bereich der operationellen Aviatik. Im privaten Sektor finden sich einige wenige spezialisierte Fachbüros, welche sich mit Luftfahrtinfrastrukturen auseinandersetzen, jedoch ohne Forschungsarbeit in Richtung der Thematik.

Im Hinblick auf die künftige Entwicklung setzen sich die Flughafenbetreiber der Flughäfen Zürich und Genf am ehesten mit der Kapazität ihrer Anlage und ihren Möglichkeiten auseinander, da Kapazitätsfragen auf diesen Luftfahrtinfrastrukturen auf Grund der hohen Auslastung immer mehr in den Fokus rücken. Die Arbeiten werden jedoch weder publiziert noch enthalten sie Grundlagenforschung, welche über die Anwendung von Bekanntem für die eigene Anlage hinausgeht.

Das Bundesamt für Zivilluftfahrt betreibt oder delegiert bis heute keine Forschung im Bereich der Kapazität von Luftfahrtinfrastrukturen. Die Planung etwa im Rahmen des Sachplan Infrastruktur Luftfahrt basieren primär auf Erfahrungswerten und den politischen Möglichkeiten. Eine objektivierte wissenschaftliche Herangehensweise ist noch nicht verbreitet in Anwendung.



## 2 Systemanalyse

Im Kapitel Systemanalyse werden die Strukturen und Zusammenhänge innerhalb eines bestehenden Systems aufgeschlüsselt und die beeinflussenden Komponenten und Parameter detailliert betrachtet. In der vorliegenden Arbeit ist von Interesse, aus welchen Elementen sich eine Luftfahrtinfrastruktur zusammensetzt und inwiefern diese die Kapazität der Luftfahrtinfrastruktur beeinflussen.

### 2.1 Das System Luftfahrtinfrastruktur

#### Verkehrsnetz aus punktuellen Infrastrukturen

Unter den Verkehrssystemen bildet die Luftfahrt zusammen mit der Schifffahrt diejenige Kategorie, welche nur punktuelle bauliche Einrichtungen braucht, um räumliche Mobilität zu bewerkstelligen. Im Gegensatz zum Strassenverkehr, Schienenverkehr, Radverkehr usw., welche auf eine lineare Infrastruktur als Transportweg angewiesen sind, dienen der Luft- und Schifffahrt die natürlichen Elemente Luft und Wasser als Transportweg. Diese wegfallenden, im Bau und Unterhalt teuren, Transportinfrastrukturen sind ein grosser Vorteil der Luft- und Schifffahrt im intermodalen Mobilitätswettbewerb. Hinzu kommen beim Luftverkehr v.a. die hohe Transportgeschwindigkeit und die räumliche Flexibilität. Beim Schiffsverkehr die enormen Transportmengen und der dadurch geringen Kosten pro tkm Transportleistung.

Trotzdem, dass keine baulichen Infrastrukturen von A nach B erforderlich sind, sind in der Luft- und Schifffahrt die Organisation und Überwachung der Verkehrsobjekte während des Fluges bzw. der Fahrt ab einer gewissen Dichte des Verkehrs unumgänglich. Beide Verkehrsarten sind durch ihre spezifischen einschränkenden Eigenschaften, die hohe Geschwindigkeit des Flugzeugs sowie die träge Reaktion eines Schiffes, vom Menschen ohne Regelung und technische Unterstützung nicht mit ausreichender Sicherheit zu bedienen.

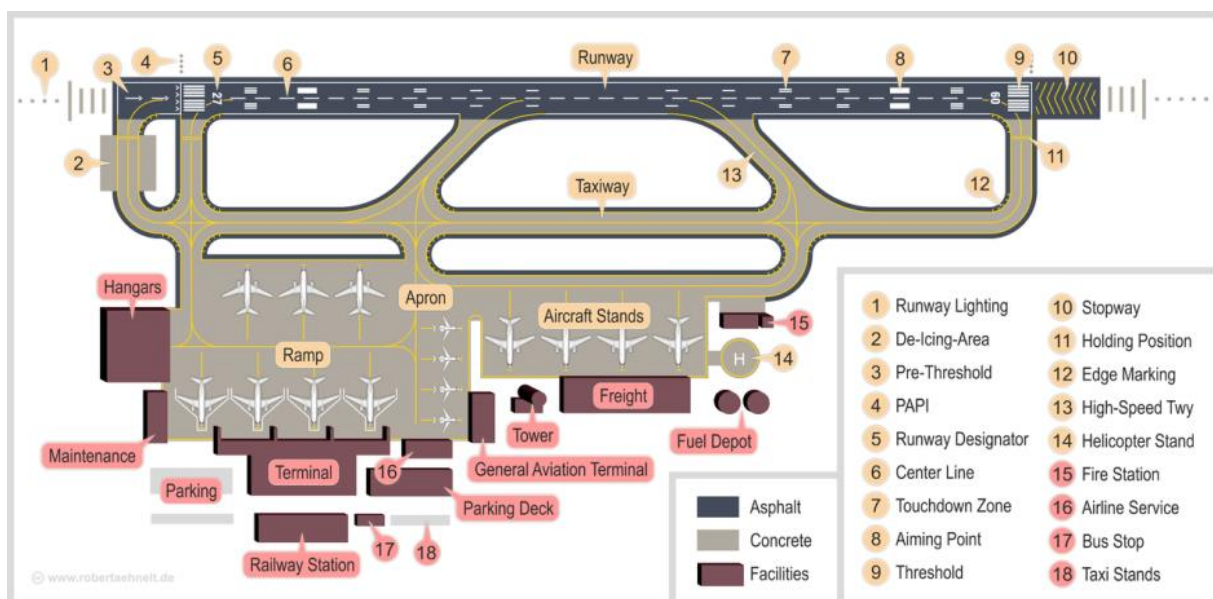
Die Luftfahrt als Verkehrssystem setzt sich zusammen aus den Flughäfen und Flugplätzen als Knoten sowie den Flügen als Strecken. Die Flughäfen und Flugplätze sind als integrales Netz aus baulichen Infrastrukturen zu betrachten, welche sowohl den Anschluss an andere Verkehrsnetze (intermodal) als auch an andere Einheiten des gleichen Systems (intramodal) ermöglichen.

#### Aufbau des System Luftfahrtinfrastruktur

Die Luftfahrtinfrastruktur wird in der Fachwelt in einen luftseitigen und einen landseitigen Bereich unterteilt. Zum luftseitigen Teil gehören diejenigen Flächen und Einrichtungen, welche mit dem Flugzeug erreichbar sind bzw. welche für Personen nur über einen kontrollierten Eingang zugänglich sind. Dazu gehören die Start- und Landebahn (engl. Runway), die Rollwege

(engl. Taxiway), das Vorfeld (engl. Apron), die Standplätze am Terminal (engl. Ramp), die übrigen Abstellplätze (engl. Stands), der Flugsteig (engl. Gate) sowie weitere Gebäude um das Vorfeld wie Hangars. Der landseitige Bereich besteht aus den öffentlich zugänglichen Bereichen eines Flughafens, also dem Terminal bis zur Sicherheitskontrolle, der Parkhäuser, Bahnhöfe und Busterminals.

Abbildung 1 Schematischer Aufbau einer Luftfahrtinfrastruktur



Quelle: [www.robortaehehelt.de](http://www.robortaehehelt.de)

### Kategorisierung von Luftfahrtinfrastrukturen nach ICAO

Die ICAO (International Civil Aviation Organisation) verwendet in ihren Regularien eine Klassifizierung mit Codierung für Start- und Landebahnen von Flughäfen und grösseren Flugplätzen (ICAO 2006). Die Codierung von Luftfahrtinfrastrukturen ist in Kapitel 2.1.1.3 erläutert. Auf diese Codierung wird im Weiteren häufig Bezug genommen, zumal die ICAO für viele Elemente von Luftfahrtinfrastrukturen Standards und Vorschriften entsprechend dieser Klassifizierung setzt. Für kleine Luftfahrtinfrastrukturen, insbesondere für solche ohne befestigte Start- und Landebahn, ist diese Kategorisierung nicht direkt anwendbar.

Die ICAO führt eine Liste, welchem ICAO-Code die gängigen Flugzeugmodelle entsprechen. Durch Abgleich von Flugplatz- und Flugzeugcode kann einfach referenziert werden, ob die anzufliegende Luftfahrtinfrastruktur die Mindestanforderungen des Flugzeuges erfüllt.

Ein solcher Abgleich der Anforderungen von Flugzeugen mit den Eigenschaften von Luftfahrtinfrastrukturen ist dank Codierung auch bei spezifischen Komponenten möglich. So kann etwa für die Prüfung der genügenden Tragfähigkeit von Start- und Landebahnen, Rollwegen und Vorfeldflächen die PCN (Pavement Classification Number) der Fläche der ACN (Aircraft Classification Number) des jeweiligen Flugzeugtyps gegenübergestellt werden (ICAO 2009). Die sogenannte PNC-ANC-Methode.

## **2.1.1 Luftseite**

### **2.1.1.1 Lufträume**

Der Luftraum wird in der Aviatik nach den Vorgaben der ICAO unterteilt. Gemäss Annex 11, Kapitel 2, Abschnitt 2.6 zum Übereinkommen über die internationale Zivilluftfahrt (Eidgenossenschaft Stand 2010) setzt sich dieser aus den Klassen A bis G zusammen, wobei für jede Klasse bestimmte Regeln (z.B. erlaubte Höchstgeschwindigkeit) und Bedingungen gelten (z.B. Mindestsichtweite, Ausstattung des Flugzeuges). Die Klassen sind nach dem internationalen Alphabet benannt und weltweit gültig. Grundsätzlich werden sie nach ihrer Höhe gestaffelt, wobei der Luftraum A die oberste und G die tiefste Ebene darstellt.

Die Grenzen der Lufträume sind grundsätzlich als Höhe in ft (Fuss) oder als Flugfläche (engl. Flight Level (FL)) angegeben. Die Lage der Flugflächen ist dabei theoretisch unabhängig von der Höhe, denn sie wird anhand des barometrischen Drucks bestimmt. In der Praxis, d.h. bei normalen Luftdruckverhältnissen, entspricht ein FL jedoch genau 100 ft, also ca. 30m. Die FL 100 liegt im Normalfall auf 10'000 ft oder rund 3'000m.ü.M.

#### **Kontrollierte Lufträume**

Die Klassen A (Alpha) bis E (Echo) sind sogenannte kontrollierte Lufträume und werden von der Flugsicherung vollständig mit Radar überwacht. Diese Lufträume sind grundsätzlich für kontrollierte Flüge vorgesehen, welche vom Flugsicherungsdienst freigegeben werden müssen. Um die Anweisungen der Flugsicherung empfangen zu können, müssen die Flugzeuge kontrollierter Flüge entsprechend mit Transpondern und Funknavigation ausgerüstet sein. Instrumentenflüge gelten a priori als kontrollierte Flüge.

#### **Unkontrollierte Lufträume**

Die Klassen F (Foxtrott) und G (Golf) gehören zu den unkontrollierten Lufträumen. Sie befinden sich in geringer Höhe, in der Schweiz bis 600m über Boden. Diese Lufträume sind mit Radar insbesondere in hügeligen und bergigen Gebieten nicht zuverlässig zu überwachen.

#### **Luftraumklassifizierung in der Schweiz**

In der Schweiz wird der Luftraum in die 4 Klassen C (Charlie), D (Delta), E (Echo) und G (Golf) unterteilt (VRR Stand 2011). Das BAZL legt die detaillierte Luftraumstruktur jährlich in Koordination mit den europäischen Partnerbehörden fest.

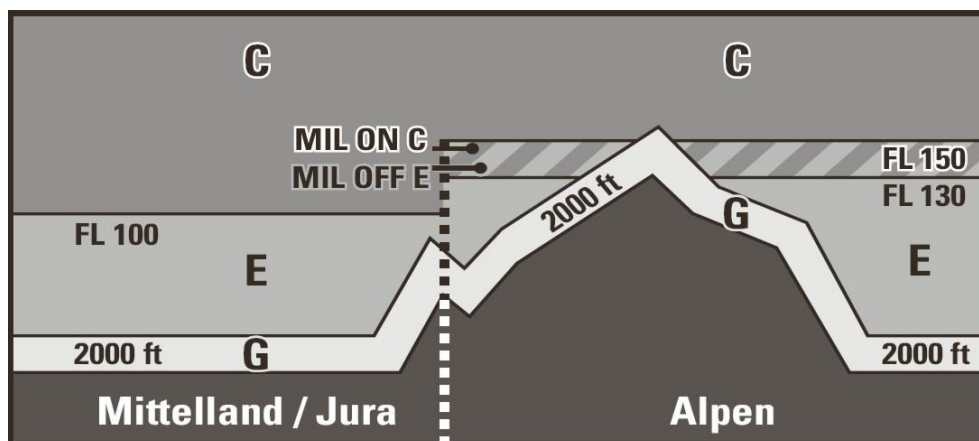
Tabelle 1 Klassifizierung des Schweizer Luftraums

Klasse	Kontrolliert?	Freigabe nötig?	Anwendung
C (Charlie)	Ja	Ja	> 10'000 ft / 3050 m.ü.M. (Mittelland / Jura) > 3950 / 4600 m.ü.M. (Alpen)
D (Delta)	Ja	Ja	Kontrollzonen CTR um Flughäfen
E (Echo)	Ja	Nein	
G (Golf)	Nein	Nein	< 2'000 ft / 600 m über Grund

Quelle: Eigene Darstellung

Speziell und in Europa einzigartig ist die Verschiebung der Luftraumklassen je nach Tageszeit. Im Alpenraum wird in den Zeiten, in welchem die Luftwaffe ihre Betriebszeiten hat (MIL ON) die Grenze zwischen den Lufträumen C und E um 20 FL oder rund 2000ft nach oben verschoben (siehe Abbildung 2). Derzeit ist dies Montag - Freitag von 07.30 - 12.05 Uhr und von 13.15 - 17.05 Uhr der Fall.

Abbildung 2 Schematischer Aufbau des Schweizer Luftraums

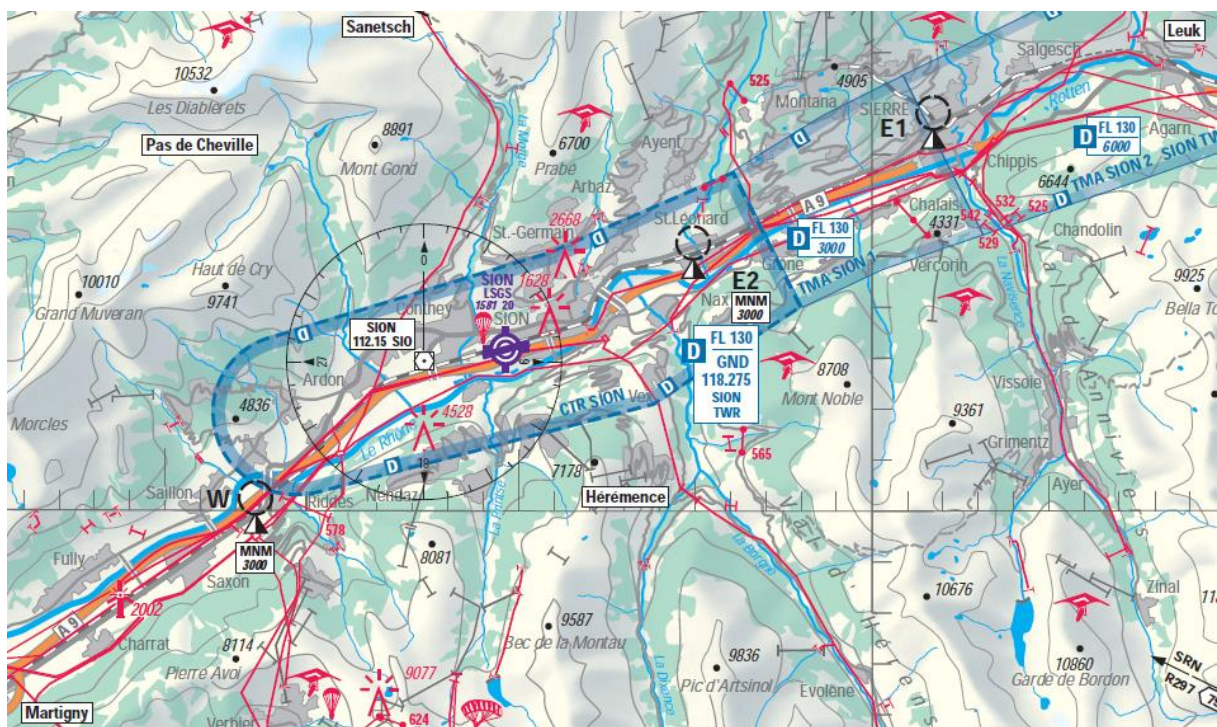


Quelle: Luftfahrtkarte ICAO, Schweiz 1:500'000

Der Luftraum C (Charlie) ab einer Höhe von 3'050m.ü.M. (in den Alpen höher) bildet den oberen Luftraum, welcher ausschliesslich mit Erlaubnis der Flugsicherung befliegen werden darf. Er ist in erster Priorität dem Linienluftverkehr (Passagier- / Frachtflüge) vorbehalten und wird von der Flugsicherung beplant, organisiert und überwacht. So werden in diesem Luftraum etwa Luftstrassen für Überflüge, Warteräume oder An- und Abflugrouten räumlich festgelegt, Slots (Zeitfenster für Flugbewegungen) vergeben und der Flugbetrieb kontrolliert und koordiniert.

Der Luftraum D (Delta) umfasst einen bestimmten Perimeter, die sogenannten Kontrollzonen, um die Landesflughäfen, die Militärflughäfen sowie einige Regionalflugplätze. Die Kontrollzone CTR (engl. für Controlled Region) umgibt das Flugplatzgelände mit den Endanflug- und Abflug-routen zu bzw. ab der entsprechenden Luftfahrtinfrastruktur. Der Nahflugbereich TMA (engl. für Terminal Area) umfasst einen etwas ausgedehnteren Bereich, welche primär für die Sink- und Steigphase genutzt wird (siehe Abbildung 3). CTR wie TMA eines Flugplatzes reichen i.d.R. bis an den Luftraum C hinauf und werden vom der regional stationierten Flugsicherung oder dem Tower des Flughafens oder -platzes überwacht.

Abbildung 3 Beispiel Luftraum D (CTR Sion dunkelblau gestrichelt, TMA Sion hellblau)



Quelle: Luftfahrtkarte ICAO, Schweiz 1:500'000

Der Luftraum E (Echo) umfasst den Bereich ab 2'000ft (rund 600m) über Grund bis an den Luftraum C in 10'000ft (rund 3'050m.ü.M.) im Mittelland und Jura bzw. 13'000 bis 15'000ft (rund 4'000 bis 4'600m.ü.M.) in den Alpen. Dieser Luftraum wird von der Flugsicherung überwacht, darf jedoch von allen Flugobjekten befliegen werden. Es gelten allerdings restriktive Bedingungen für das Befliegen im Sichtflug (Mindestsichtweite 8km, Mindestabstände zu Wolken).

Als Luftraum G (Golf) sind in der Schweiz die ersten 600m über dem Boden klassifiziert. Dieser wird nicht (bewusst) überwacht und Instrumentenflüge sind nicht möglich. Der Luftraum wird daher fast nur von der Privat- und Freizeitluftfahrt, Helikoptern etc. im Sichtflug genutzt.

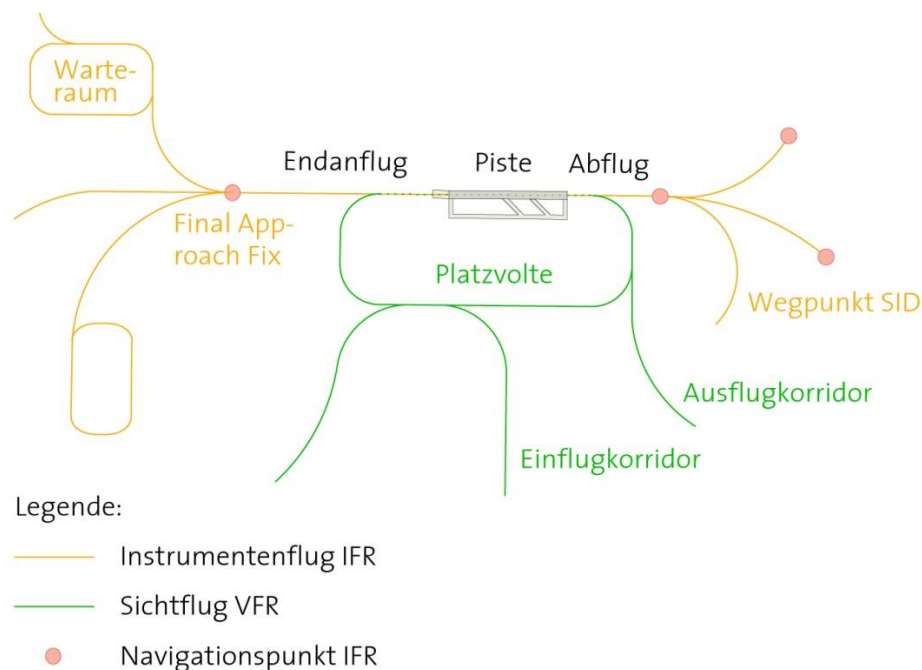
### 2.1.1.2 An- und Abflüge

Der Luftraum um einen Flughafen weist naturgemäss die höchste Dichte an Flugbewegungen auf. Die daraus resultierende Komplexität an Flugbewegungen bedarf aus Sicherheitsgründen einer genauen Organisation, Regelung und Überwachung.

Die Betriebsleitung und -überwachung wird auf Flughäfen und grossen Flugplätzen innerhalb eines bestimmten Perimeters, der Kontrollzone CTR oder Luftraum D (Delta), durch die örtliche Flugsicherung wahrgenommen. Auf kleineren Flugplätzen findet diese Überwachung nicht oder nur in reduziertem Masse statt. Die organisatorische Regelung im Luftraum um Flughäfen oder -plätze ist hingegen auf allen Luftfahrtinfrastrukturen üblich. Für einen geordneten Ablauf der Flugbewegungen werden normalerweise Anflugkorridore, sowie An- und Abflugrouten festgelegt.

Für Instrumentenflüge (IFR), welche von der Flugsicherung überwacht und geleitet werden, werden Anflugrouten und Warteräume definiert, von welchen aus der Final Approach Fix (FAF), der Beginn des Endanflugs, angesteuert wird. Dieser beschreibt immer eine Gerade bis zur Piste. Beim Abflug werden sogenannte Standard Instrument Departure (SID), sinngemäss Standardabflugroute für Instrumentenflüge, angewandt, welche mit Wegpunkten definiert werden. Der Pilot bekommt von der Flugsicherung vor dem Start die Anweisung, welcher Wegpunkt anzufliegen ist.

Abbildung 4 Schematische Darstellung von An- und Abflugrouten für IFR und VFR



Quelle: eigene Darstellung



Für Sichtflüge (VFR) wird eine sogenannte Volte, ein Runde um den Flugplatz festgelegt, welche für An- und Abflüge i.d.R. zwingend zu nutzen ist. Ab dieser Volte sind Ein- und Ausflugkorridore festgelegt, über welche in die Volte einzufliegen oder auszufliegen ist. Für Übungsflüge zum Anfliegen und Landen wird die Platzrunde mehrere Male beflogen, jedoch ohne auf der Piste zu landen bzw. gleich wieder durchzustarten. Diese Manöver werden Touch-and-Go's genannt.

## Regelung in der Schweiz

In der Schweiz werden die An- und Abflugverfahren gemäss Art. 36c LFG vom jeweiligen Luftfahrtinfrastrukturbetreiber oder der Flugsicherung festgelegt, wobei das BAZL für die Genehmigung zuständig ist. Die Luftfahrtinfrastrukturbetreiber achten bei der Ausgestaltung von Korridoren, Routen und Volten (Platzrunde) in erster Linie auf die Sicherheit. Die Hindernisfreiheit, Übersichtlichkeit und ein möglichst gerader Verlauf sind wichtige Aspekte dabei. Im Interesse einer guten Zusammenarbeit und Akzeptanz in den benachbarten Gemeinden und Städten wird zudem darauf geachtet, dass bewohnte Gebiete möglichst umflogen werden.

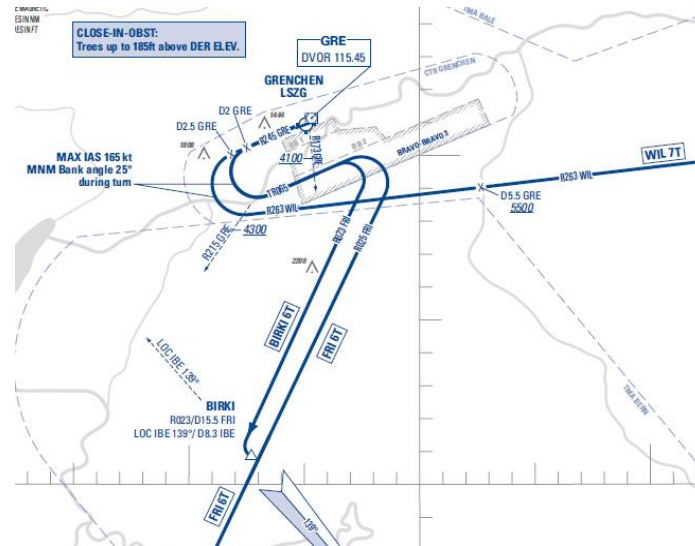
Der Einfluss der lokalen Interessenvertreter und auch der schweizerischen Luftwaffe ist hierbei nicht zu unterschätzen. So kommt es oft vor, dass An- und Abflugrouten als Kompromiss zwischen verschiedenen Interessen ausgearbeitet werden müssen. Gerade in Bereichen, wo Korridore mehrerer Luftfahrtinfrastrukturen zusammen kommen, führt dies zu atypischen und für die Flugüberwachung und Piloten komplexen Routen (siehe Abbildung 5).

Als ein Beispiel seien hier die Abflugrouten für Instrumentenflüge ab Grenchen genannt. Aufgrund eines für Militärflüge reservierten Luftraumes über dem Chasseral /Jura müssen die startenden Flugzeuge nach 4km eine 180°-Wende nach links fliegen und können nicht gerade aus nach Süden steigen. Diese muss zudem eng geflogen werden, da sonst der Luftraum TMA Bern, der Anflugluftraum auf den Flugplatz Bern-Belp, tangiert wird. Will der Pilot trotzdem nach Süden fliegen, so muss er, sobald er die erforderliche Höhe zum Überfliegen der TMA Bern erreicht hat, eine weitere enge Rechtskurve fliegen. Dabei ist zu beachten, dass diese Route zudem die Abflugroute nach Norden kreuzt. Für Piloten und v.a. die Flugsicherung ist dieses Verfahren aus mehreren Gründen unvorteilhaft:

- Der Pilot braucht mehr Zeit und Treibstoff, um sein Ziel zu erreichen.
- Der Abflug bedingt eine intensive Kommunikation mit der Flugsicherung und starke Flugmanöver in der Steigphase.
- Das Flugzeug befindet sich viel länger im kontrollierten Luftraum der Flugsicherung, als wenn direkt geflogen würde. Dies bedingt häufigere Anweisungen (für jedes Manöver) und eine stärkere Konzentration des Fluglotsen auf das Flugzeug.
- Das Kreuzen von An- und/oder Abflugrouten birgt ein Sicherheitsrisiko und vervielfachen den Kontrollaufwand für den Fluglotsen.

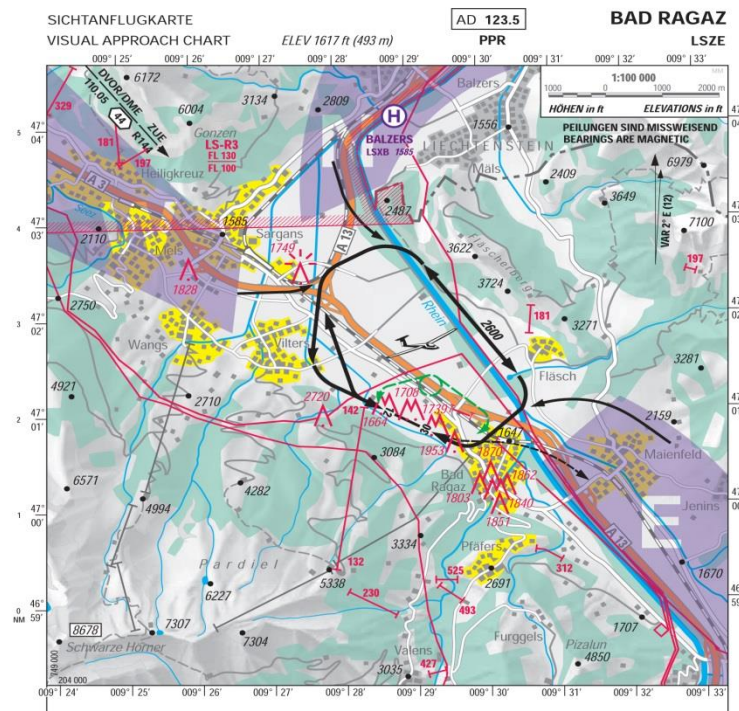
Für Sichtflüge VFR werden die An- und Abflugrouten sowie die Volten für jeden Flugplatz in der Schweiz in den Sichtenflugkarten VAC (engl. Visual Approach Chart) festgehalten (siehe Abbildung 6). Ausserdem werden die bevorzugten Anflugkorridore dargestellt, welche einen sicheren und nicht störenden Sinkflug ermöglichen sollen.

Abbildung 5 Beispiel Instrumenten-Abflugrouten ab Flugplatz Grenchen



Quelle: SkyGuide, VFRM Aeronautical Information Publication, Mai 2013

Abbildung 6 Beispiel Visual Approach Chart (VAC) Flugplatz Bad Ragaz



Quelle: SkyGuide, VFRM Aeronautical Information Publication, Mai 2013



Die An- und Abflugrouten sind im Endanflug möglichst lange gerade geführt, damit sich der Pilot im Endanflug nicht auf die Flugrichtung konzentrieren muss. Ausserdem erleichtert es im Sichtflug das Abschätzen von Distanzen. Die Länge der Gerade hängt von den Flugzeuggrössen ab, welche den Flughafen oder Flugplatz anfliegen. Während der Flughafen Zürich-Kloten mit einem auf Grossraumflugzeuge ausgerichteten Betrieb im Minimum 10km vorsieht, sind bei Kleinflugplätzen Endanflug-Geraden von nur 1'000m möglich.

### **Instrumenten-Landesystem ILS**

Starts und insbesondere Landungen sind bei schlechten Sichtverhältnissen wie etwa in der Nacht, bei Nebel oder tiefen Wolken gefährlich und dürfen daher nach den Regeln des Sichtfluges (Visual flight rules, VFR) nicht durchgeführt werden, wenn die darin geforderten Mindestsichtweiten nicht erfüllt sind. Bereits in den 1930er-Jahren wurden daher Systeme entwickelt, welche dem Piloten mit Hilfe von Leitinstrumenten einen sicheren Ab- und v.a. Anflug bei schlechten Sichtverhältnissen ermöglichen sollten. Ursprünglich für die Militärluftfahrt konstruiert, wurden die Instrumentenlandesysteme, kurz ILS, nach dem 2. Weltkrieg auch in der Zivilluftfahrt eingesetzt. Flugmanöver mit Unterstützung von ILS werden Instrumentenflug (Instrument flight rules, IFR) genannt. Beim Instrumentenflug gelten geringere Mindestsichtweiten, jedoch auch grössere Abstandsvorschriften als im Sichtflug.

Es wird unterschieden zwischen Nichtpräzisionsanflug und Präzisionsanflug. Beim Nichtpräzisionsanflug wird das Flugzeug nur in der Richtung geleitet und der Pilot stuft im Anflug selbstständig die Höhe ab. Ab dem sogenannten Fehlanflugpunkt, ein paar hundert Meter vor der Piste, muss im Sichtflug gelandet oder bei unzureichender Sicht durchgestartet werden. Beim Präzisionsanflug wird das Flugzeug zusätzlich in der Höhe geleitet, sodass der Pilot innerhalb eines virtuellen Trichters auf die Piste geleitet wird. Der Präzisionsanflug ist heutzutage das gängige Anflugverfahren im internationalen Luftverkehr.

Das Instrumenten-Landesystem ist funkbasiert und wird mittels Richt- oder Leitstrahl ab Senderantennen im Anflugkorridor ins Flugzeug übermittelt. Mittels akustischer und im letzten Teil des Anfluges zusätzlich über Leitfeuer am Boden werden allfällig nötige Korrekturen in Richtung und Höhe angezeigt. Durch diese Leithilfen ist ein sicherer Flugbetrieb auch bei schlechten Sichtverhältnissen möglich, wodurch sich die möglichen Betriebszeiten eines Flughafens oder -platzes ausdehnen lassen.

Mittlere und grosse Flugzeuge, in Deutschland gemäss §22 LuftVo z.B. ab 14'000 kg zulässigem Startgewicht, müssen mit einem ILS ausgestattet sein. Passagierflüge werden üblicherweise immer, d.h. auch bei besten Sichtverhältnissen, als Instrumentenflüge durchgeführt. Dementsprechend verfügen Luftfahrtinfrastrukturen, welche Passagierflüge abfertigen, in aller Regel über ein ILS. In der Schweiz sind neben den Landesflughäfen auch die Regionalflugplätze Bern-Belp, Grenchen, Lugano, Sion und St.Gallen-Altenrhein mit ILS ausgestattet.

### 2.1.1.3 Start- und Landebahn

Die Start- und Landebahn oder Piste (engl. Runway) bestimmt am Massgeblichsten, für welche Luftfahrzeuge und Funktionen eine Luftfahrtinfrastruktur gebaut ist. Ebenso hat die Anzahl und Anordnung von Start- und Landebahnen auf einer Luftfahrtinfrastruktur den stärksten Einfluss auf deren Kapazität. Je mehr und je unabhängiger Pisten betrieben werden können, desto mehr Flugbewegungen ermöglicht die Luftfahrtinfrastruktur.

Die Start- und Landebahn kann nach folgenden Charakteristika unterschieden werden:

#### Belag

Die Oberfläche (engl. Pavement) einer Piste hat primär Einfluss auf die maximale Tragfähigkeit des Bodens und damit direkt auf die Masse der Luftfahrzeuge, welche auf der Bahn verkehren können. Es wird unterschieden zwischen befestigten und unbefestigten Start- und Landebahnen.

#### Befestigte Start- und Landebahn

Befestigte Pisten besitzen einen Beton oder Asphaltbelag. Betonbeläge sind teurer im Bau, dafür mit 30 - 40 Jahren sehr langlebig und werden daher v.a. für grössere Flughäfen verwendet, da Unterbrüche für Pistensanierungen grosse Auswirkungen haben (Wells and Young 2004). Asphaltbeläge sind günstiger und einfacher zu unterhalten. So kann z.B. nur der Deckbelag erneuert werden anstatt des gesamten Oberbaus wie bei Beton. Asphaltbeläge halten je nach Belastung jedoch nur 10 - 20 Jahre.

Die Tragfähigkeit befestigter Start- und Landebahn wird nach ICAO Annex 14, Teil 1, Kapitel 2.6 (ICAO 2009) klassifiziert. Jede Piste erhält einen Code, welcher seine Tragfähigkeitseigenschaften beschreibt. Dieser setzt sich zusammen aus der PCN (Pavement Classification Number), dem Gegenstück zur ACN (Aircraft Classification Number), welche Flugzeuge nach ihren Eigenschaften klassifiziert, sowie einem vierstelligen Buchstabencode. Dieser setzt sich je nach Charakteristik des Belages zusammen (siehe Tabelle 2). So entsteht ein Code wie: *060 FBWT*.

#### Unbefestigte Start- und Landebahn

Als unbefestigte Start- und Landebahnen gelten Schotter-, Sand-, Gras- oder Eispisten. In der Schweiz sind viele kleinere Flugplätze mit Graspisten ausgestattet. Nachteile dieser Bauform bzgl. der Nutzbarkeit sind:

- Tragfähigkeit ist geringer als bei befestigten Pisten, womit sie bereits für mittelgrosse Flugzeuge nicht ausreicht.
- Verminderter Rollwiderstand bei Nässe führt zu längerem Bremsweg
- Bei Schnee (Pflügen unmöglich) und starkem Regen ist sie nicht nutzbar

Tabelle 2 Codierung des Belag-Codes nach ICAO

Eigenschaft	Code	Ausprägungen
Belagstyp	F	Asphalt (flexible)
	R	Beton (rigid)
Tragfähigkeit des Untergrunds	A	fest
	B	mittlere Stärke
	C	weich
	D	sehr weich
max. Reifendruck	W	unbegrenzt
	X	< 1,5 MPa
	Y	< 1,0 MPa
	Z	< 0,5 MPa
Evaluationsmethode	T	theoretisch
	U	praktisch

Quelle: Eigene Darstellung

## Länge

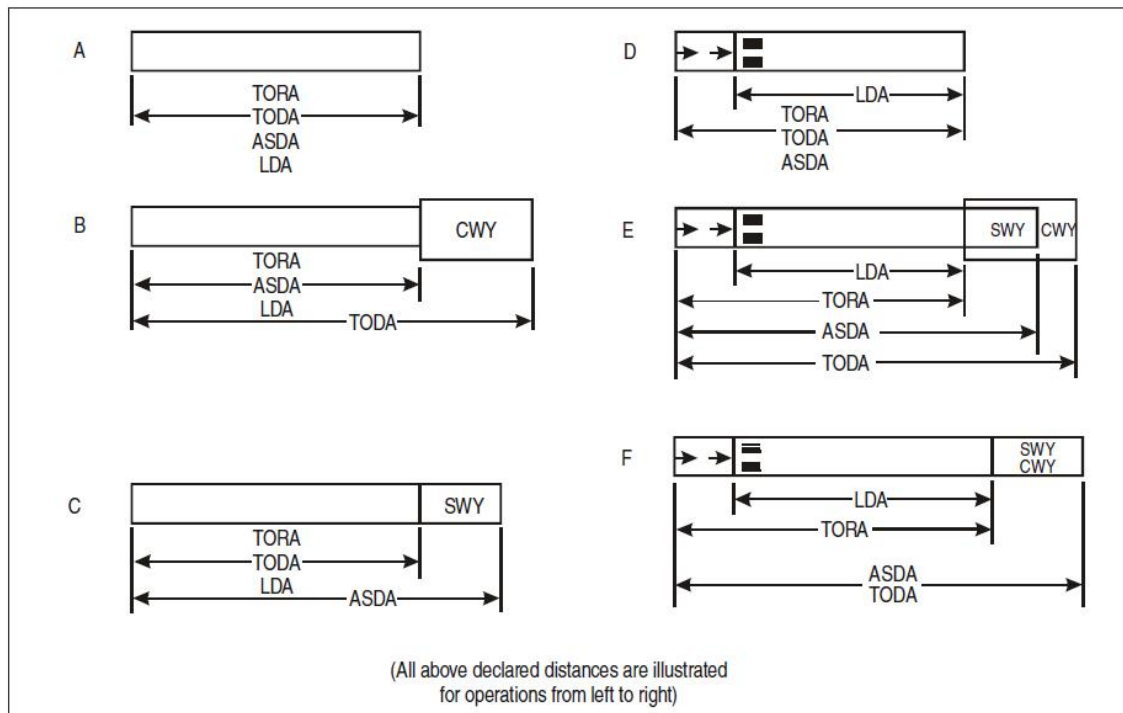
Die Länge einer Start- und Landebahn bestimmt die Grösse der Flugzeuge welche eine Luftfahrtinfrastruktur benutzen können. Als vereinfachte Faustregel gilt: Je grösser das Flugzeug, desto länger die benötigte Startstrecke. Bei der Definition der Länge einer Start- und Landebahn gilt es die unterschiedlichen Messweisen und Begriffe zu beachten.

Tabelle 3 Begriffe der Länge einer Start- und Landebahn

Abkürzung	Begriff engl.	Begriff dt.
ASDA	Accelerate-stop distance available	verfügbare Startabbruchstecke
CWY	Clear Way	hindernisfreie Fläche
LDA	Landing distance available	verfügbare Landestrecke
LOD	Lift-off distance	Strecke bis zum Abheben
SD	Stop distance	Anhaltestrecke
SWY	Stop Way	Anhaltefläche
TOD	Take-off distance	Startstrecke bis 35 ft Höhe
TODA	Take-off distance available	verfügbare Startstrecke
TOR	Take-off run	Startbahnlänge
TORA	Take-off run available	verfügbare Startbahnlänge

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7 Verschiedene Arten der Längenbemessung von Start- und Landebahnen



Quelle: ICAO Annex 14 Vol. I (ICAO 2009)

Jeder Flugzeugtyp hat eine Bezugsstartbahnlänge, welche vom Hersteller angegeben wird. Die effektiv benötigte Startstrecke eines Flugzeuges hängt jedoch von mehreren Faktoren ab. Neben der Flugzeugkonfiguration (z.B. Triebwerke, Auftriebshilfen) etwa auch von der konkreten Startmasse (Ladegewicht) oder den meteorologischen Bedingungen (Luftdruck, Temperatur, Wind). Diese werden in Kapitel 2.4.1 behandelt.

Die Startstrecke TOD, setzt sich zusammen aus der LOD, der Laufstrecke bis zum Abheben des Flugzeuges sowie der Steigflugphase, bis das Flugzeug eine Höhe von 35 ft (rund 15m) erreicht hat. Diese wird üblicherweise als die benötigte Bezugsstartbahnlänge eines Flugzeugs unter Standardbedingungen (Start mit max. Startgewicht auf Meereshöhe bei 15°C und Windstille) angegeben und muss als TODA zur Verfügung stehen. Die TODA einer Start- und Landebahn setzt sich i.d.R. zusammen aus der effektiven Länge der präparierten oder befestigten Piste und der am Ende der Piste angrenzenden hindernisfreien Fläche CWY (siehe Abbildung 7).

Die Start- und Landebahn von Luftfahrtinfrastrukturen werden nach der ICAO-Codierung (siehe Kapitel 2.1) klassifiziert. Luftfahrtinfrastrukturen mit Pisten, welche eine max. TODA von bis 800m aufweisen, erhalten als erste Ziffer den Code 1, bis 1200m eine 2, bis 1800m eine 3 und für längere Pisten den Code 4.

## Breite

Auch die Breite einer Start- und Landebahn bestimmt die maximale Grösse der Flugzeuge, welche diese benutzen dürfen. Entscheidend sind hier, die Spannweite eines Flugzeuges sowie der Radstand des hinteren Fahrwerks (siehe Tabelle 11, S.66). Je breiter die Räder des Hauptfahrwerks auseinander liegen, desto breiter muss die Start- und Landebahn sein.

In Abhängigkeit zur Länge einer Piste ist deren Breite genormt. Es gibt sechs Klassen von A (schmal) bis F (breit), welche den zweiten Teil des ICAO-Codes ergeben (siehe Grafik 4). Grosse Verkehrsflughäfen haben standardmässig 45 oder 60m breite Start- und Landebahn.

Abbildung 8 Empfohlene Breite der Start- und Landebahn in Abhängigkeit zur Länge

Code number	Code letter					
	A	B	C	D	E	F
1 <sup>a</sup>	18 m	18 m	23 m	–	–	–
2 <sup>a</sup>	23 m	23 m	30 m	–	–	–
3	30 m	30 m	30 m	45 m	–	–
4	–	–	45 m	45 m	45 m	60 m

a. The width of a precision approach runway should be not less than 30 m where the code number is 1 or 2.

Quelle: ICAO Annex 14 Vol. I (ICAO 2009)

## Befeuerung

Als Befeuerung wird die Markierung des Anflugweges, der Piste und wichtigen Stellen auf ihr, sowie der Rollwege mit optischen Signalen verstanden. Sie erlaubt den Flugbetrieb vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang, was die betriebliche Flexibilität und Kapazität beeinflusst.

Die Befeuerung ist in der einschlägigen Norm des ICAO detailliert geregelt (ICAO 2009). Dank unterschiedlichen Signalfarben, -anordnung und Mengen kann eine Vielzahl von Informationen über die Luftfahrtinfrastruktur optisch übermittelt werden, was besonders in ausserordentlichen Situationen (z.B. Ausfall der Funkverbindung) sehr wichtig ist.

### 2.1.1.4 Rollwege

Die Rollwege (engl. Taxiway) verbinden die Start- und Landebahn mit dem Vorfeld und den Standplätzen. Auf grösseren Luftfahrtinfrastrukturen verlaufen die Rollwege üblicherweise parallel über die gesamte Länge der Piste. Der Mindestabstand zwischen Start- und Landebahn

und Rollweg ist abhängig von der ICAO-Klassifizierung und beträgt zwischen 37,5m (1A non-instrument runway) und 190m (4F instrument runway) (ICAO 2009).

Aus Sicht des Betriebes sowie der Kapazität hat dies mehrere Vorteile. So können abfliegende Flugzeuge zum Start ans Pistenende gelangen, ohne die Start- und Landebahn zu benutzen und für andere Flugzeuge zu blockieren. Der Abflug erfolgt dann sehr speditiv, wenn über den Rollweg bereits sehr nahe an die Startposition gefahren und bei Freigabe der Piste innert Minutenfrist mit dem Start begonnen werden kann. Ankommende Flugzeuge können die Landebahn schneller verlassen und freigeben, wenn sie nach dem Aufsetzen und genügendem Bremsen über die sogenannten Abrollwege von der Piste auf den parallel verlaufenden Rollweg fahren. Dies bedingt, dass Rollweg und Piste nicht nur am Anfang und Ende der Piste verbunden sind. Je nach Ablenkwinkel dieser Verbindungen spricht man von normalen Abrollwegen oder Schnellabrollweg (engl. Rapid exit taxiway). Die ICAO empfiehlt bei letztgenannten einen Winkel von 30° (möglich sind 25° - 45°) (ICAO 2009). Diese können mit Geschwindigkeiten bis 50kn (93km/h) befahren werden.

Die Mindestbreite von Rollwegen beträgt je nach Flugplatzkategorie bzw. -codierung zw. 7,5m (A) und 25m (F) (ICAO 2009).

#### **2.1.1.5 Vorfeld**

Als Vorfeld (engl. Apron) wird in der Terminologie des ICAO der Bereich eines Flughafens oder -platzes bezeichnet, auf welchem Luftfahrzeuge manövriert, be- und entladen, betankt, abgestellt und gewartet werden. Damit sind sowohl Standplätze am Gate, wie auch übrige Parkflächen inbegriffen. In den USA bzw. in der Terminologie der FAA werden die Standplätze am Gate als "ramp" und übrige Parkierungsflächen als Stands bezeichnet. Das Apron umfasst hier lediglich das Vorfeld zwischen diesen Standplätzen und den Rollwegen. In der vorliegenden Arbeit wird die Definition im Sinne des ICAO impliziert.

Auf dem Vorfeld muss genügend Platz vorhanden sein, um sowohl in den Spitzenstunden des Flugbetriebes alle Flugzeuge versorgen und aneinander vorbeilotsen zu können, als auch während der Nacht genügend Abstellplätze für die am Boden bleibenden Flugzeuge bieten zu können.

Das Vorfeld ist vom ICAO mit Ausnahme der Markierung und Befuerung nicht reglementiert. Es liegt im Interesse und Ermessen des Flugplatzbetreibers die notwendige Fläche für einen reibungslosen Ablauf bereit zu stellen.

Für Passagierflüge sind Standplätze direkt am Gate, verbunden über eine Brücke, ein wichtiges Komfortkriterium und deswegen bei den Fluggesellschaften erwünscht. In den Spitzenstunden des Betriebes kann die Anzahl dieser Plätze zu einem kapazitätsbestimmenden Kriterium werden, wenn allen Airlines eine Parkposition am Gate zugestanden werden will. Weitere Ausführungen hierzu folgen im Kapitel 2.4.2.3.

### 2.1.1.6 Abfertigung

Unter der Abfertigung luftseitig fassen wir die folgenden Dienstleistungen an einem Flugzeug auf einem Flughafen zusammen:

- Stromversorgung
- Betankung
- Frischwasserzufuhr
- Abwasserentleerung
- Kabinenreinigung
- Gepäckservice (Aus- und Einladen auf dem Vorfeld)
- Catering
- Enteisung

Bis auf das Betanken und das Enteisen sind die aufgeführten Bodenservices praktisch ausschliesslich im Passagierflugverkehr von Relevanz. Eine Luftfahrtinfrastruktur, welche Passagierflüge abfertigen soll, muss über eine gewisse Grundausrüstung an Einrichtungen und Fahrzeugen für alle Dienstleistungen verfügen.

Die Organisation sowie die verfügbaren Einheiten des Bodenservice sind wesentlich mitbestimmend dafür, wie lange ein Flugzeug an einem Flughafen oder Flugplatz verweilen muss. Ein stehendes Flugzeug ist für eine Airline ein Verlustgeschäft, zumal auf grossen Flughäfen i.d.R. Standgebühren anfallen, weshalb auf eine möglichst speditiven Abfertigung gedrängt wird.

Die Abfertigungszeit einer Maschine wird vom Hersteller im „Airport planning manual“ entsprechend den Flugzeugcharakteristika berechnet und angegeben. Je grösser ein Flugzeug ist, desto länger dauert die Abfertigung. Abhängig vom Flugzeugtyp nimmt das Betanken oder das Ent- und Beladen der Bordküche am meisten Zeit in Anspruch. Entscheidend für den Gesamtzeitbedarf der Abfertigung ist jedoch bei praktisch allen Flugzeugtypen die Abfolge: Aussteigen - Kabinenreinigung - Einsteigen. Diese Zeitspanne beträgt zwischen 15 Minuten bei kleinen Passagierflugzeugen bis 90 Minuten bei einem Airbus A380.

Für die in dieser Arbeit untersuchten Luftfahrtinfrastrukturen sind nachfolgend die Abfertigungszeiten als Beispiel die Abfertigungszeiten zweier in Frage kommender Passagierflugzeugtypen aufgeführt (siehe Tabellen 4 und 5). Die Saab 340 ist eine etwas ältere Turboprop-Maschine für 35 Passagiere und der Airbus A319 ein kleines Mittelstreckenflugzeug für 124 Passagiere. Die bestimmenden Zeitfenster für die gesamte Abfertigungszeit sind rot umrahmt.

Tabelle 4 Zeitplan für die Abfertigung einer SAAB 340

[illegible]

Quelle: Eigene Darstellung / Airport Planning Manual SAAB

Tabelle 5      Zeitplan für die Abfertigung eines Airbus A319

[illegible]

Quelle: Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning Airbus

#### 2.1.1.7 Sicherheitseinrichtung

Jede Luftfahrtinfrastruktur hat für den Fall eines Absturzes oder sonstigen Ernstfalles innerhalb ihres Einzugsbereiches ein Notfalldispositiv. Besonders bei Vorfällen mit Passagierflugzeugen kann die schnelle Einsatzbereitschaft einer genügend grossen Einsatztruppe viele Menschenleben retten. Um dieses Ziel zu erreichen fällt der Rettung und Erstversorgung von Opfern, der Feuerbekämpfung sowie dem Training dieser Einsätze die grösste Bedeutung zu (ICAO 2009).



Die ICAO kategorisiert Flughäfen und Flugplätze beim Thema Sicherheit in 10 Klassen von 1 bis 10, abhängig von der Länge und dem Rumpfdurchmesser der auf der Luftfahrtinfrastruktur zugelassenen Flugzeuge.

Für die Kategorien werden von der ICAO Anforderungen definiert bzw. empfohlen. So müssen z.B. je nach Klasse Mindestmengen an Löschmitteln und Schaumteppichen pro Minute ausgebracht werden können (siehe Abbildung 9) oder eine Anzahl an Feuerwehrfahrzeugen jederzeit verfügbar sein (ICAO 2009). Ein internationaler Flughafen wie Zürich-Kloten gehört zur Kategorie 10 und muss 16,6 m<sup>3</sup> Schaumteppich pro Minute ausbringen können und mind. 3 Feuerwehrfahrzeuge in stetiger Einsatzbereitschaft haben.

Abbildung 9 Klassifizierung von Flughäfen nach der Löschwasser-/ Schaumteppichleistung

Aerodrome category	Foam meeting performance level A		Foam meeting performance level B	
	Water (L)	Discharge rate foam solution/minute (L)	Water (L)	Discharge rate foam solution/minute (L)
	(1)	(2)	(3)	(4)
1	350	350	230	230
2	1 000	800	670	550
3	1 800	1 300	1 200	900
4	3 600	2 600	2 400	1 800
5	8 100	4 500	5 400	3 000
6	11 800	6 000	7 900	4 000
7	18 200	7 900	12 100	5 300
8	27 300	10 800	18 200	7 200
9	36 400	13 500	24 300	9 000
10	48 200	16 600	32 300	11 200

*Note.— The quantities of water shown in columns 2 and 4 are based on the average overall length*

Quelle: ICAO Annex 14 Vol. I (ICAO 2009)

## Regelung in der Schweiz

Die Abteilung Sicherheit Infrastruktur des BAZL als Aufsichtsbehörde hat für die Schweizer Luftfahrtinfrastrukturen die RFF-Richtlinie für Flugplätze (Feuerwehr- und Rettungswesen auf schweizerischen Flugplätzen) erlassen. Sie beschreibt darin, welche ICAO-Klassen die verschiedenen Anlagen erfüllen und wie sie kontrolliert und beübt werden müssen. Im Generellen gilt:

- Kommerzielle Luftfahrt setzt eine höhere Sicherheitsbereitschaft voraus.
- Je grösser die Anlage, desto höher die Anforderungen.

Interessanterweise sind die Richtlinie und damit die ICAO-Anforderungen gemäss Kap. 2 (BAZL 2010) nur für aufgezählte Luftfahrtinfrastrukturen verbindlich. Neben den Landesflughäfen Zü-

rich und Genf (Basel-Mulhouse unterliegt der französischen Luftfahrtaufsicht) und den Regionalflugplätzen gemäss SIL sind die Flugfelder von Locarno, Saanen und Buochs erwähnt. Alle anderen Flugfelder haben keine Vorschriften zur Sicherheitsausstattung und verfügen in aller Regel auch über keine spezifischen Einrichtungen.

Die Auswahl der aufgeführten Flugplätze folgt keinen objektiven Kriterien bezüglich Konzessionsstatus, Grösse, Verkehrszwecke o.ä. Die Zuteilung der verlangten Sicherheitsstufe wird offensichtlich auf den aktuellen Flugzeugmix, welcher kommerziell ab dem Flughafen verkehrt, abgestützt.

#### **2.1.1.8 Flugsteig**

Als Flugsteig oder im englischen Gate definieren wir den luftseitigen Bereich des Flughafen-terminals, also jenen Teil, welche nur Flugpassagiere nach Passieren der Sicherheitskontrolle erreichen können. Für abfliegende Passagiere umfasst das Gate den Warteraum und den Zugang zum Flugzeug. Dies kann eine Fluggastbrücke oder auch ein Shuttlebus sein, wenn sich das Flugzeug nicht an einem Standplatz am Gate befindet. Auf internationalen Flughäfen beinhaltet der Flugsteig meist auch einen Duty-Free-Shop-Bereich. Für ankommende Fluggäste ist neben der Fluggastbrücke oder einem Shuttle die Gepäckausgabe Teil des Gates.

Für den Betrieb und die Kapazität einer Luftfahrtinfrastruktur sind auf Seiten des Flugsteiges insbesondere die Gestaltung von Korridoren und Aufenthaltsbereichen sowie die Boarding-Methode relevant (TRB 1987). Der Zugang zum Flugzeug verfügt in der Regel über eine höhere Durchlässigkeit als der Boarding-Schalter oder die Gänge des Flugzeuges. Bei der Ankunft sind die Durchlässigkeit und Distanz des Weges vom Flugzeug zur Gepäckausgabe wie auch die Gepäckausgabe selbst kapazitätsrelevant.

### **2.1.2 Landseite**

#### **2.1.2.1 Erschliessung**

Mit der Kapazität einer Luftfahrtinfrastruktur hat der Anschluss an das nationale und lokale Verkehrsnetz des Flughafenstandortes erst auf den zweiten Blick zu tun. Bei kleineren Flugplätzen und insbesondere wenn kein Passagier- oder Frachtverkehr stattfindet, genügen als Erschliessung eine Zufahrtsstrasse und ein mittelgrosser Parkplatz. Bei Luftfahrtinfrastrukturen mit Passagierverkehr hingegen stellt die gute Erreichbarkeit des Stadtzentrums oder sonstigen Anziehungspunktes mit grossem Personenandrang wie etwa ein Kongress-, Messe- oder Sportzentrum einen wichtigen Qualitätsaspekt dar. Es ist deshalb sowohl im Interesse der Reisenden (zügiges Erreichen des Ziels), des Flughafenbetreibers (Attraktivität und Image der Luftfahrtinfrastruktur) wie auch des regionalen Gewerbes (Tourismus, Zulieferfirmen), dass der Anschluss ans nachgelagerte Verkehrsnetz quantitativ wie qualitativ den Ansprüchen genügt.

Die Nachfrage bzw. die bereit zu stellende Kapazität der Erschliessung hängt dabei von verschiedenen Aspekten ab. Der Nachfrageverlauf ist bei einer Luftfahrtinfrastruktur direkt ab-

hängig vom Flugplan, da sich Spitzenstunden im Flugbetrieb zeitlich vorgelagert oder verzögert auf die Nachfrage auf den Zu- und Wegfahrten zur Luftfahrtinfrastruktur überträgt. Bei einer ausgeglichenen Verteilung der Starts und Landungen sind auch die Verkehrsmengen auf der Erschliessung konstanter. Ein weiterer Punkt stellt der Modal split dar. Verfügt ein Flughafen über einen guten und schnellen ÖV-Anschluss in die Stadt, kann ein Anteil von bis zu 64% (Oslo) des Verkehrsaufkommens über Bahn oder Bus abgewickelt werden (Coogan 2008). Fehlt ein solches Angebot, entspricht die Kapazität von MIV und Taxis dem gesamten Verkehrsaufkommen der Luftfahrtinfrastruktur.

### **ÖV-Anschluss**

Der Anschluss ans öffentliche Verkehrsnetz kann entweder mittels strassengebundener oder schienengebundener Verkehrsträger bewerkstelligt werden.

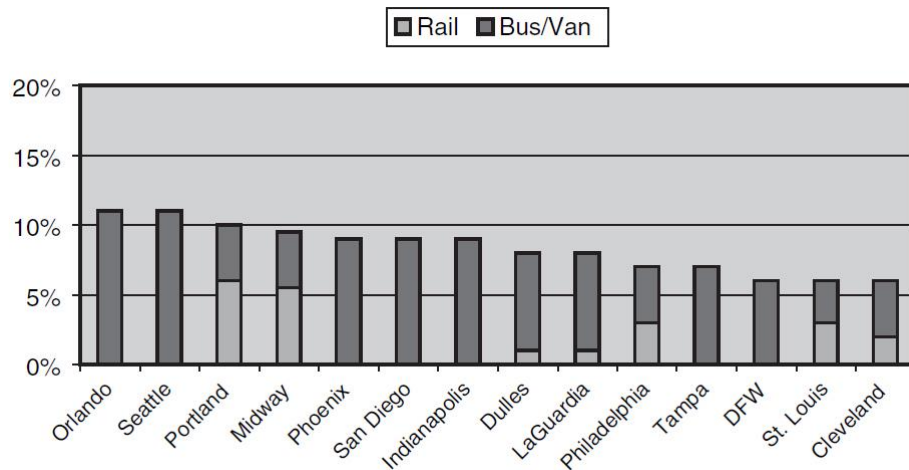
Ein strassengebundenes System, in aller Regel sind dies Busse, hat den Vorteil, dass es die vorhandene Strassenerschliessung nutzt und dadurch geringe Investitionskosten generiert. Des Weiteren ist das System einfach an die Nachfrage anpassbar bzw. erweiterbar. Nachteile sind die beschränkte Kapazität eines Bussystems auf Grund der geringen Gefässgrösse sowie der Einfluss auf die Verfügbarkeit und Qualität des Systems im Falle einer Überlastung des Strassennetzes.

Ein schienengebundener Verkehrsträger ist auf eine eigene Infrastruktur (Bahnhof, Strecke) angewiesen, welche hohe Grundinvestitionen bedingt. Zudem muss das System langfristig konzipiert und dimensioniert werden. Anpassungen, nur schon beim Rollmaterial, sind im Vergleich zu einem Bussystem viel kostenintensiver. Die Vorteile eines Bahnsystems liegen in der hohen Kapazität und hohen Geschwindigkeit, welche auf dem eigenen Trasse erreicht werden können. Es ist vollkommen unabhängig von anderen Verkehrsarten zu betreiben.

Auf Grund der erwähnten Systemeigenschaften ist nachvollziehbar, dass die Erschliessung mittels schienengebundenem System primär für Grossflughäfen mit hohem und gleichmässigem Passagieraufkommen zweckmässig ist. Die benötigten Kapazitäten sind so planbar und die finanziellen Risiken gering. Ein Bahnsystem macht insbesondere dann Sinn, wenn sich die Nachfrage auf eine bis wenige Linien konzentriert, etwa vom Flughafen ins Stadtzentrum. Für kleine bis mittelgrosse Luftfahrtinfrastrukturen ist hingegen ein Bussystem zweckmässiger, da das Passagieraufkommen unregelmässiger verteilt ist und es bedarfsgerecht gestaltet werden kann. Auch ist es für einen Flugplatzbetreiber oder eine Kommune finanziell kaum tragbar, die Investitionskosten eines Bahnsystems zu tragen, wenn die langfristige Nachfrage nicht gesichert ist.

Auf internationalen Verkehrsflughäfen werden für Fahrten vom und zum Flughafen sehr verschiedene ÖV-Anteile erreicht. Im amerikanischen Raum ist der Flughafen San Francisco mit 23% der einzige, welcher einen Anteil von 1/5 übertrifft. Üblich sind Werte zwischen 6 und 18% (Coogan 2008). I.d.R. sind es Bussysteme, welche die Mehrheit der ÖV-Passagiere befördern (siehe Abbildung 10).

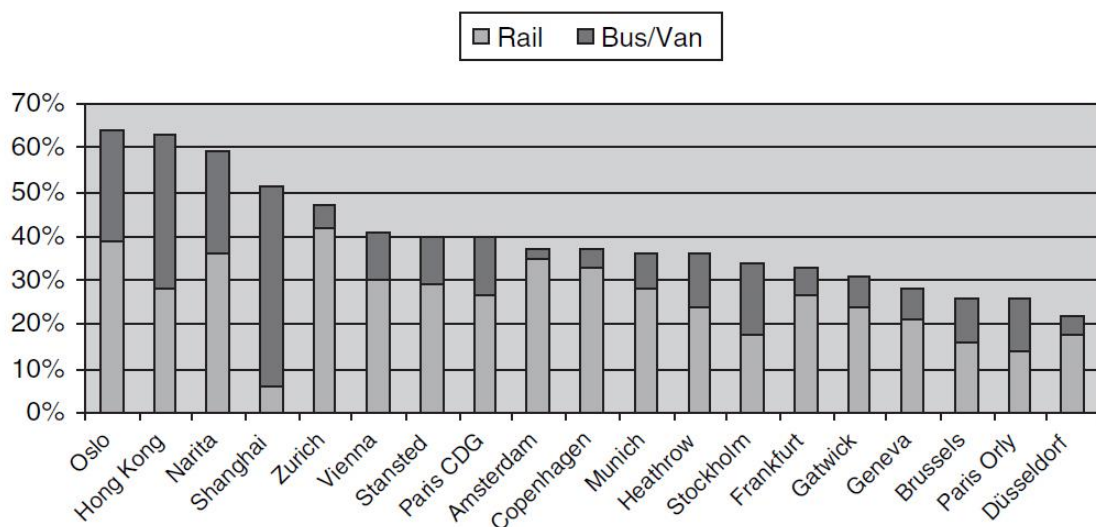
Abbildung 10 Anteile des ÖV im Personentransport auf Flughäfen der USA



Quelle: ACRP Report 4 (Coogan 2008)

Im europäischen und asiatischen Raum hingegen verfügen alle grossen Verkehrsflughäfen über einen Bahnanschluss. In Europa befördert die Bahn jeweils auch den Grossteil der ÖV-Passagiere. Spitzenreiter im Modal Split ÖV-MIV ist Oslo mit einem Anteil von 64%. Üblich sind im eurasischen Raum Werte zw. 25% und 60% (siehe Abbildung 11).

Abbildung 11 Anteile des ÖV im Personentransport auf internationalen Flughäfen



Quelle: ACRP Report 4 (Coogan 2008)

## Vorfahrt

Die Vorfahrt am Terminal umfasst den Teil der strassenseitigen Erschliessung, auf welchem Fahrzeuge nur kurzzeitig abgestellt werden können oder auf denen nur das Ein- und Aussteigen erlaubt ist. Sie ist für Passagiere gedacht, welche mit dem Taxi, einem Shuttle-Bus oder mit dem privaten Auto an den Flughafen gebracht oder von dort abgeholt werden. Die Vorfahrt ist möglichst direkt an den Terminalhaupttrakt und das Strassennetz angeschlossen, um eine gute Erreichbarkeit und damit einen raschen Umschlag der Fahrzeuge zu ermöglichen.

Auf grossen Flughäfen sind die Aufenthaltszeiten der Fahrzeuge sehr kurz. Untersuchungen in den USA (TRB 1987) ergaben Werte von:

Tabelle 6 Durchschnittliche Verweilzeiten auf der Flughafenvorfahrt

Verkehrsmittel	Abflug	Ankunft
	Min.	Min.
Privatauto	1 - 3	2 - 5
Taxi	1 - 2	1 - 3
Limousine	2 - 4	2 - 5
Shuttlebus	2 - 5	5 - 10

Quelle: Eigene Darstellung nach (TRB 1987)

Bei einer gemeinsamen Vorfahrt für Abflug und Ankunft ist für Kapazitätsüberlegungen der Zeitraum nach der Ankunftsspitze im Flugplan relevant, da sich das Passagieraufkommen bei der Ankunft stärker konzentriert als beim Abflug. Bei der Abreise verteilen sich die Passagiere auf der Vorfahrt auf mehrere Stunden, Geschäftsreisende eher kürzer (0,75 - 1,5h), Ferienreisende eher länger vor dem Abflug (1,5 - 3h). Bei der Ankunft verlassen nach der Gepäckausgabe die meisten Passagiere einen Flughafen innert kürzester Zeit (ca. 0,25h), was zu einer entsprechenden Belastung der Vorfahrt führt.

Die Vorfahrt ist meist mit getrennten Haltekannten bzw. Haltebereichen für Busse, Taxis und den Privatverkehr ausgestattet. Teilweise sind auch Kurzzeitparkplätze vorhanden.

## Parkierung

Die Parkierung an einem Flughafen teilen wir in drei Kategorien auf. Das Kurzzeitparken (bis und mit 1h), das normale Parken (ab 1h bis 24h) sowie das Langzeitparken (mehr als 24 Stunden). Auf kleinen Luftfahrtinfrastrukturen ohne Passagierverkehr kann auf eine Unterscheidung verzichtet werden, da Kurz- und Langzeitparkplätze nicht vorhanden bzw. notwendig sind.

Kurzzeitparkplätze sind für Fahrzeuge gedacht, welche Reisenden zum Flughafen bringen oder von dort abholen. Dieser Zweck impliziert, dass sich solche primär an grossen Verkehrsflughäfen befinden. Auf passagierreichen Flughäfen sind die Kurzzeitparkplätze idealerweise in unmittelbarer Nähe zum Terminal angesiedelt und ihre Bewirtschaftung einfach gestaltet, dies aufgrund des hohen Umschlages an Fahrzeugen. Einrichtungen wie Schrankenanlagen mit Ticketautomaten führen zu Staus und Wartezeiten und verärgern so die Betroffenen. Die Anzahl Kurzzeitparkplätze hat sich an den Spitzen des Passagieraufkommens zu orientieren und ist abhängig von den rechtlichen Möglichkeiten, dem verfügbaren Platz, dem Anteil des MIV der landseitigen Erschliessung sowie der Verkehrspolitik des Flughafens (Förderung des ÖV, Tarifstruktur Parkierung). Üblicherweise beträgt der Anteil Kurzzeitparkplätze weniger als 5%, am Flughafen Zürich z.B. ca. 2,5%.

Parkplätze für das normale Parken zwischen 1 und 24 Stunden sind für Mitarbeiter und Besucher, geschäftlich am Flughafen Verkehrende sowie Begleiter von Flugreisenden (Bringende und Abholende), welche sich länger am Flughafen aufhalten. Diese Parkplätze sollten vom Terminal zu Fuss bequem erreichbar sein und werden in aller Regel bewirtschaftet. Am Flughafen Zürich sind rund 84% aller Parkplätze primär für normales Parken vorgesehen (D'Onghia 2012). Untersuchungen in den USA ergaben Werte zw. 70 - 85% (TRB 1987).

Langzeitparkplätze sind Anlagen, welche primär für das Abstellen von Autos der Flugreisenden selbst für die Dauer ihrer Abwesenheit vorgesehen sind. Sie liegen meist weiter vom Flughafen entfernt, sind aber oft über einen Shuttle-Bus mit dem Terminal verbunden. In aller Regel sind die Parkplätze bewirtschaftet, wobei die Tarife tiefer angesetzt sind, als bei normalen Parkplätzen. In den USA sind jeweils 15 – 30% als Langzeitparkplätze ausgewiesen (TRB 1987), am Flughafen Zürich fallen rund 2'300 der 17'100 Parkplätze oder 13,5% (D'Onghia 2012) in diese Kategorie.

### **2.1.2.2 Terminal**

Das Terminal-Gebäude umfasst sowohl einen landseitigen wie auch einen luftseitigen Bereich. Letzterer wird Gate oder Flugsteig genannt und ist in Kapitel 2.1.1.8 behandelt. In dieser Arbeit soll der Begriff Terminal fortan für den landseitigen Teil der Flughafengebäude stehen, welcher für die Allgemeinheit grundsätzlich zugänglich ist.

Das Terminal umfasst den Haupteingang und die Eingangshalle mit ihren Einrichtungen (Informationsschalter, Wechselbörsen, Cafés, Restaurants etc.), den Check-In-Bereich sowie die Sicherheitskontrolle, welche die Grenze zum luftseitigen Bereich bildet.

Den Betrieb und die Kapazität des Terminals beeinflusst die Konfiguration des Gebäudes an sich, und insbesondere die Kapazität des Check-In und der Sicherheitskontrolle, deren Zahl und Disposition wiederum von den verfügbaren Flächen des Gebäudes abhängt.

## 2.2 Rechtliche Aspekte von Luftinfrastrukturen in der Schweiz

Der Betrieb einer Luftfahrtinfrastruktur wird neben technischen Vorgaben auch von rechtlicher und nicht selten von politischer Seite massgeblich beeinflusst, was sich auch auf die Kapazität einer Anlage auswirkt. Im Folgenden soll kurz der rechtliche Rahmen beschrieben werden, in welchem sich Flughäfen und Flugplätze in der Schweiz bewegen.

### 2.2.1 Bundesrecht

In der schweizerischen Bundesverfassung (BV) als höchste Rechtsnorm in der Schweiz regelt Art. 87 die Zuständigkeit des Bundes für den Luftverkehr.

**Art. 87** Eisenbahnen und weitere Verkehrsträger\*

Die Gesetzgebung über den Eisenbahnverkehr, die Seilbahnen, die Schifffahrt sowie über die Luft- und Raumfahrt ist Sache des Bundes.

Das daraus abgeleitete „Bundesgesetz vom 21. Dezember 1948 über die Luftfahrt“, kurz Luftfahrtgesetz (LFG), bildet die gesetzliche Grundlage (legislatives Recht) für die Regelung der Luftfahrt. Zum LFG erlässt die Exekutive, der Schweizer Bundesrat, Verordnungen (exekutives Recht), welche „Gesetze im materiellen Sinne“ (Wikipedia) darstellen. Derzeit regeln in der Schweiz 37 Verordnungen verschiedene Aspekte der Luftfahrt.

Für den Betrieb und die Kapazität einer Luftfahrtinfrastruktur ist neben dem LFG insbesondere die „Verordnung über die Infrastruktur der Luftfahrt“ (VIL) von Bedeutung.

Im LFG handelt es sich primär um Art. 36, 37 und 39a. Art. 36 - 36d LFG umfassen die Betriebsvoraussetzungen, Art. 37 - 37t LFG die Plangenehmigungsbestimmungen. Die Plangenehmigung ist für alle grösseren, baulichen Veränderungen auf einer Luftfahrtinfrastruktur notwendig. Sie wird vom UVEK (Flughäfen) bzw. vom BAZL (Flugplätze und -felder) erteilt (LFG Stand 2012) und ersetzt sozusagen die Baubewilligung, da für Bauvorhaben auf Flugplätzen Standortgemeinde und -kanton nicht bewilligungsbefugt sind. Art. 39a schliesslich regelt die Koordination von Slots auf Flughäfen.

Die VIL konkretisiert Art. 36 - 36d LFG in Art. 10 - 16 VIL Betriebskonzession, Art. 17 - 22 VIL Betriebsbewilligung und Art. 23 - 27 VIL Betriebsreglement. Das Plangenehmigungsverfahren und Ausnahmen davon im Sinne von Art. 37 - 37t LFG sind in Art. 27 - 29 VIL materiell ausformuliert.

Art. 39 - 39d VIL behandeln die Nachtflugordnung. Art. 39 VIL legt klar fest, dass nicht gewerbsmässige Flüge zwischen 22 Uhr und 6 Uhr verboten sind. Mit Ausnahme der Landesflughäfen Zürich und Genf sind auch gewerbsmässige Flüge zwischen 22 Uhr und 6 Uhr auf schweizerischen Luftfahrtinfrastrukturen praktisch verboten. Für die Landesflughäfen gilt ge-

mäss Art. 39a VIL, dass gewerbsmässige Starts nicht zwischen 24 Uhr und 6 Uhr und Landungen nicht zwischen 24 Uhr und 5 Uhr geplant werden dürfen. Ausnahmen regelt Art. 39d VIL, insbesondere Abs. 1:

**Art. 39d** Ausnahmen

1 Keiner Beschränkung unterliegen:

- a. Notlandungen;
- b. Starts und Landungen von Such- und Rettungsflügen, Ambulanzflügen, Polizeiflügen und von Flügen zur Katastrophenhilfe;
- c. Starts und Landungen von schweizerischen Militärluftfahrzeugen;
- d. Starts und Landungen von Staatsluftfahrzeugen, die vom BAZL bewilligt wurden.

Die Einschränkungen durch die Nachtflugordnung beeinflusst die Kapazität der schweizerischen Luftfahrtinfrastrukturen massgeblich, da lediglich 16 Betriebsstunden pro Tag zur Verfügung stehen und damit 1/3 der Kapazität gegenüber einer identischen Anlage im Ausland ohne Nachtflugbeschränkung nicht zur Verfügung steht.

Die VIL definiert in Art. 2 auch die Begriffe für Luftfahrtinfrastrukturen im schweizerischen Recht.

**Art. 2** Begriffe

In dieser Verordnung bedeuten:

- a. *Flugplatz*: in einem Sachplan festgelegte Anlage für die Ankunft und den Abflug von Luftfahrzeugen, für deren Stationierung und Wartung, für den Verkehr von Passagieren und für den Umschlag von Gütern;
- b. *Flugfeld*: Flugplatz ohne Zulassungszwang;
- c. *Flughafen*: Flugplatz mit Zulassungszwang;
- d. *Zulassungszwang*: Verpflichtung, einen Flughafen im Rahmen der allgemeinen Vorschriften über die Luftfahrt und der speziellen Konzessionsbestimmungen allen im internen und im internationalen Luftverkehr zugelassenen Luftfahrzeugen für die ordentliche Benützung zur Verfügung zu stellen;
- e. *Flugplatzanlagen*: Bauten und Anlagen, die der Erfüllung des Zwecks des Flugplatzes gemäss Sachplan Infrastruktur der Luftfahrt dienen und örtlich und funktionell zu diesem gehören;
- f. *Nebenanlagen*: Bauten und Anlagen auf Flugplätzen, die nicht zu den Flugplatzanlagen gehören;

Der Begriff Flugplatz ist hierzulande demnach ein Überbegriff für Anlagen mit Zulassungszwang, Flughafen genannt, und Anlagen ohne Zulassungszwang, Flugfelder genannt.

## 2.2.2 Umgang mit internationalem Luftverkehrsrecht

Da der Luftverkehr naturgemäss eine grenzüberschreitende und damit internationale Materie darstellt, sieht das LFG vor, dass der Bund internationale Vereinbarungen und Zusammenarbeiten abschliessen und er auch international anerkannte Regelungen übernehmen kann.



Basierend auf Art. 3a Abs. 1 LFG, der da lautet:

#### **Art. 3a**

1 Der Bundesrat kann internationale Vereinbarungen abschliessen über:

- a. den grenzüberschreitenden Luftverkehr;
- b. die Flugsicherheit;
- c. die Flugsicherung;
- d. den Austausch von Luftfahrt Daten.

wurden bis heute rund 180 bilaterale und multinationale Staatsverträge zum Luftverkehr abgeschlossen und Regelungen von EUROCONTROL, der europäischen Koordinationsstelle für Luftverkehrskontrolle und Flugsicherung, für verbindlich erklärt.

Nach Art. 3b LFG kann das BAZL mit ausländischen Luftfahrtbehörden Vereinbarungen über die Zusammenarbeit abschliessen. Die im Zusammenschluss der europäischen Luftfahrtbehörden (JAA) entwickelten Regeln zu Themen wie Zertifizierung, Lizenzierung und Betriebsvorschriften für Beteiligte in der Luftfahrt, JAR, haben daher auch in der Schweiz direkt Anwendung gefunden.

Art. 6a LFG besagt, dass der Bundesrat auch Regelungen und Vorschriften in Form von Anhängen für „unmittelbar anwendbar erklären“ kann, welche im Rahmen der europäischen Zusammenarbeit oder des „Übereinkommen vom 7. Dezember 1944 über die internationale Zivilluftfahrt“ erarbeitet werden. Dieses Übereinkommen, auch bekannt als Chicagoer Abkommen, bildete die Grundlage für die Gründung der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation ICAO, womit Anhänge der ICAO unter das Chicagoer Abkommen fallen. Der Bundesrat erklärte bis heute alle Anhänge der ICAO für unmittelbar anwendbar, womit diese auch für alle Schweizer Luftfahrtbeteiligte verbindlich sind.

### **2.2.3 Lokales Recht**

Neben nationalem und internationalem Recht sind praktisch alle schweizerischen Luftfahrtinfrastrukturen durch lokale, sprich kantonale oder kommunale Gesetze, Verordnungen und Verträge geregelt. In vielen Fällen macht das lokale Recht weitergehende Einschränkungen zum Betrieb des Flugplatzes, so können etwa die täglichen Betriebszeiten festgelegt sein oder der Betrieb an gewissen Feiertagen verboten werden. Aber auch Grundbucheinträge z.B. zu einem späteren Rückbau von Anlagen oder Bewirtschaftungsverträge für die Grünflächen innerhalb des Flugplatzareals fallen in die Kategorie.

Das lokale Recht ist von Flugplatz zu Flugplatz individuell und kann den Vergleich zweier baugleichen Luftfahrtinfrastrukturen erschweren.

## 2.3 Definition Kapazität

Unter Kapazität wird der Durchsatz bzw. die Menge an Einheiten verstanden, welche innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls von einer Einrichtung bewältigt werden kann. Im aviatischen Bereich der vorliegenden Arbeit sind zwei Arten von Kapazitäten von Interesse. Erstens die luftseitige Kapazität einer Luftfahrtinfrastruktur, welche die Anzahl Flugzeuge beschreibt, welche innerhalb einer Stunde, eines Tages oder eines Jahres bewältigt werden kann. Zweitens die landseitige Kapazität, in welcher die Menge an Personen bzw. Passagiere gemessen wird, welche eine Einrichtung innerhalb einer Stunde, eines Tages oder eines Jahres durchlaufen kann.

### 2.3.1 Luftseitige Kapazität

Literatur, Studien und Untersuchungen zur luftseitigen Kapazität stammen fast ausschliesslich aus Nordamerika und wurden in den 1960er- bis 1980er-Jahren erarbeitet. Die FAA mit Sitz in Washington sowie die ICAO mit Sitz in Montreal waren bei vielen dieser Grundlagenarbeiten beteiligt. Als die Standardwerke gelten „Airport capacity and delays“ (Newell 1979) und „Planning and design of airports“ (Horonjeff and McKelvey 1983).

Für die Bemessung der luftseitigen Kapazität einer Luftfahrtinfrastruktur bestehen nach (Horonjeff and McKelvey 1983) zwei grundsätzliche Konzepte.

#### Absolute Kapazität

Die absolute Kapazität (ultimate capacity) wird als diejenige Anzahl an Flugoperationen beschrieben, welche eine Einrichtung unter Ausserachtlassung von Verspätungen und Rückstaus bei konstanter Nachfrage innerhalb eines Zeitabschnitts bewältigen kann. In diesem Konzept wird also davon ausgegangen, dass ein Flugzeug so lange wie nötig warten kann, bis sich ein Zeitslot für seine Operation öffnet (Janic 2009). Bei der Berechnung erlaubt dies theoretisch eine Optimierung der Kapazität durch die Einrichtung der effizientesten Abfolge aller Flugzeuge ungeachtet der daraus entstehenden Verspätungen. Durch eine zufällig verteilte Anordnung der Operationen reduziert sich die absolute Kapazität etwas, ist dafür näher an der Realität.

#### Praktische Kapazität

Die praktische Kapazität (practical capacity) ist demgegenüber diejenige Anzahl an Flugoperationen, welche eine Einrichtung bei zufälliger Nachfrageverteilung innerhalb eines Zeitabschnitts bewältigen kann, ohne dass die durchschnittliche Verspätung der Flugzeuge ein zu definierendes Niveau überschreitet (Janic 2009). Die praktische Kapazität nimmt das Konzept der Level-of-service (LOS) auf, bei welchem einen bestimmten Level an Rückstau bzw. Verspätung nicht überschritten werden darf. Sie entspricht dadurch eher den Zuständen und Bestrebungen im realen Flugbetrieb, dass die Nachfrageverteilung ungleichmässig ist und dass Verspätungen

nicht auf Kosten einer Kapazitätsoptimierung überproportional erhöht werden. Die Berechnung der praktischen Kapazität war v.a. in den USA verbreitet.

## **Modellierung**

Die Modellierung und Berechnung der absoluten Kapazität ist im Vergleich mit derjenigen der praktischen Kapazität wesentlich einfacher und benötigt ein Vielfaches weniger an Rechenleistung, da sich die iterative Optimierung auf eine Verbesserung der Operationsabfolge bei stetiger Nachfrage beschränkt. Die Resultate der beiden Konzepte weichen gemäss Studien nur geringfügig voneinander ab (Horonjeff and McKelvey 1983). Auf Grund dieses Missverhältnisses zwischen höherem Aufwand zu geringer Verbesserung der Resultatgenauigkeit wird bei neueren Untersuchungen primär die absolute Kapazität evaluiert.

### **2.3.2 Landseitige Kapazität**

Im Gegensatz zur luftseitigen Kapazität bildet die landseitige Kapazität ein weltweites Forschungsgebiet. Es handelt sich dabei primär um die Kapazität der Erschliessung einer Luftfahrtinfrastruktur sowie des Terminals oder Flughafengebäudes. Die Einheit ist in diesem Fall Personen bzw. Passagiere pro Zeiteinheit, welche diese Einrichtungen bewältigen können.

Die landseitige Kapazität ist stark verknüpft mit Überlegungen zur Kapazität von Strasseninfrastrukturen, Bahn- und Bussystemen, Personenanlagen, Abfertigungssystemen usw. Die Modellierung von Systemkapazitäten dieser Art ist auch bei vielen urbanen Forschungsdisziplinen von Bedeutung (Architektur, Städtebau, Verkehrsmanagement, Logistik etc.) und entsprechend gut erforscht. Für spezifische Definitionen von Kapazität in Mikrosimulationen von Personenströmen, wie sie in Gebäuden wie einem Flughafenterminal zur Anwendung kommen, wird auf entsprechende Fachliteratur dieser Forschungszweige verwiesen.

Wichtige Literatur mit Bezug auf Flughäfen bilden die Publikationen des Transportation Research Board, wie „Measuring airport landside capacity“ (TRB 1987) oder die fortlaufenden Reports des „Airport cooperative research program“, kurz ACRP.

## 2.4 Einflussfaktoren und Berechnung der Kapazität

Nach den Definitionen, Abgrenzungen und Beschreibungen der Systemteile werden im Folgenden die Einflussflussfaktoren auf die Kapazität und deren Berechnung erläutert. Die Umsetzung dieser Berechnungen in das Kapazitätsmodell ist in Kapitel 3 und in Anhang B erläutert.

### 2.4.1 Umwelt

Unter Umwelt fallen in dieser Arbeit all jene Einflussfaktoren, welche vom einzelnen Betreiber einer Luftfahrtinfrastruktur nicht, oder zumindest nicht mit infrastrukturellen Massnahmen, beeinflusst werden können. Auf den möglichen Einfluss eines Flugplatzbetreibers auf die politischen oder technischen Prozesse bei der Ausgestaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

#### 2.4.1.1 Recht

Unter die rechtlichen Einflussfaktoren auf die Kapazität fallen v.a. die Betriebszeiten. In der Schweiz gilt ein generelles Nachtflugverbot, von welchem nur eine unbedeutende Anzahl Rettungs-, Staats- und Militärflügen ausgenommen ist. Mit geringen Ausnahmen auf den Landesflughäfen sind die Betriebszeiten auf maximal 16 Stunden von 06.00 Uhr morgens bis 22.00 Uhr abends beschränkt. Im Vergleich mit einer ansonsten identischen Luftfahrtinfrastruktur im Ausland ohne Betriebszeitbeschränkung weist eine Schweizer Anlage nur schon aus diesem Grund eine um 1/3 geringere Kapazität auf.

Betriebsdauer [h/d]	= Betriebsende - Betriebsbeginn
Betriebsstunden [h]	= Anzahl Betriebstage [d] * Betriebsdauer pro Betriebstag [h/d]

#### 2.4.1.2 Meteorologie

Die geodätische Höhenlage (Meter über dem Meeresspiegel) und die meteorologischen Verhältnisse beeinflussen die Kapazität eines Flugplatzes sowohl direkt über die Anzahl möglicher Betriebstage wie auch indirekt über ihren Einfluss auf startende und landende Flugzeuge.

##### Höhenlage

Je höher ein Flugplatz gelegen ist, desto tiefer sind die durchschnittlichen Temperaturen und mit umso mehr Schneetagen muss gerechnet werden. Diese führen zu einer Einschränkung oder gar zur Einstellung des Flugbetriebes und verringern durch die wegfallenden Betriebsstunden die Kapazität der Luftfahrtinfrastruktur.

Neben diesem direkten Einfluss auf die Betriebszeit bewirkt die Höhenlage jedoch auch indirekt eine Kapazitätsverringern. Auf Grund des abnehmenden Luftdruckes verlängert sich die

Startstrecke eines Flugzeuges um rund 7% pro rund 300 Höhenmeter (Horonjeff and McKelvey 1983). Ein und dasselbe Flugzeug benötigt demnach auf dem Engadin Airport Samedan auf 1'707 m.ü.M. eine 35% längere Startstrecke als auf dem Flugplatz Locarno (198 m.ü.M.). Diese Verlängerung bedeutet auch eine längere Belegung der Start-/ Landebahn, was die Kapazität der Starts und des ganzen Flugplatzes beeinflusst.

Umweltfaktor Höhenlage [-] =  $1 + \text{Höhenlage [m.ü.M.] / 304.8 [m]} * 0.07$

Startzeit [s] =  $\sqrt{\frac{2 * \text{Startstrecke}}{\text{Beschleunigung}}} [\text{s}] * \text{Umweltfaktor Höhenlage [-]} * \text{Umwelt...}$

### Ungenügende Sichtverhältnisse

Die Sichtverhältnisse entscheiden gerade bei kleineren Luftfahrtinfrastrukturen und Flugzeugen stark über die Betriebsdauer und damit die Kapazität der Anlage. Grund dafür sind die Regeln, ab welchen Sichtweiten im Sichtflug geflogen werden darf. Herrschen schlechtere Bedingungen, dürfen nur Instrumentenflüge durchgeführt werden. Dafür müssen sowohl der Ziel-flughafen und die Maschine mit ILS ausgerüstet sein wie auch der Pilot über eine entsprechende Zulassung verfügen. Kleinflugzeuge verfügen i.d.R. nicht über ILS, ebenso die meisten Flugplätze in der Schweiz, abgesehen von den unter Kapitel 3.1.1.2 aufgezählten Anlagen.

Ab einer horizontalen Sichtweite von unter 5'000 m und einer vertikalen Sichtweite von unter 500 m sind die Bedingungen für Sichtflüge nicht mehr gegeben (ICAO 2009). Luftfahrtinfrastrukturen ohne ILS müssen den Betrieb einstellen. In der Schweiz sind die meteorologischen Verhältnisse sehr kleinräumig und stark different. Während im Mittelland in den Wintermonaten an rund 1/3 aller Tage ungenügende Sichtverhältnisse herrschen, sind es im Wallis durchschnittlich gerade mal 6 Tage pro Jahr.

Tag mit ungenügenden Sichtverhältnissen [d]

= horizontale Sichtweite < 5'000m oder vertikale Sichtweite < 500m

Betriebstage (Non-ILS) [d] = 365 - Tage mit ungenügenden Sichtverhältnissen [d]

### Witterung

Die Witterung hat v.a. dann einen wesentlichen Einfluss auf die Kapazität, wenn die entsprechende Luftfahrtinfrastruktur keine befestigte Piste hat. Unbefestigte Start-/ Landebahnen, in der Schweiz üblicherweise Graspisten, sind bei Schnee nicht maschinell räumbar und verlieren nach starkem oder anhaltendem Regen an Tragfähigkeit und sind deshalb bei diesen Bedingungen nicht nutzbar. Bei der Modellierung wird dies berücksichtigt, indem Tage mit Schnee und Regentage ab einer Niederschlagsmenge von mehr als 10mm für unbefestigte Start-/ Landebahnen nicht als Betriebstage zählen. Bei befestigter Start- / Landebahn gelten Schnee- und Regentage grundsätzlich als Betriebstage.

Je nach Standort fallen mehr oder weniger Betriebstage wegen widrigen Wetters aus. Während in St. Gallen in den Wintermonaten über die Hälfte aller Tage keinen Betrieb zulassen, sind es im Tessin nur 5 - 10 Tagen pro Monat.

Regentage [d] = Tage mit Niederschlag > 10mm [d]

Schneetage [d] = Tage mit Schneefall und anschliessende Frosttage [d]

Betriebstage (unbefestigt) [d] = 365 - Regentage [d] - Schneetage [d]

## Temperatur

Die Temperatur beeinflusst die Kapazität einer Luftfahrtinfrastruktur indirekt, indem sich die Startstrecke von Flugzeuge in deren Abhängigkeit verändert. Dies wiederum führt zu einer Veränderung der Belegungszeit der Start-/ Landebahn.

Pro Grad Celsius Abweichung von der Normaltemperatur von 15° verlängert (bei höheren Temperaturen) oder verkürzt (bei tieferen Temperaturen bis 0°) sich die Startstrecke um 1% (Horonjeff and McKelvey 1983). Ein Start bei sommerlichen Temperaturen benötigt eine bis um 1/3 längere Strecke als im Winter.

Umweltfaktor Temperatur [-] =  $1 + (15 - \text{Durchschnittstemperatur } [^{\circ}\text{C}]) * 0.01$

Startzeit [s] =  $\sqrt{\frac{2 * \text{Startstrecke}}{\text{Beschleunigung}}} [s] * \text{Umweltfaktor Temperatur [-]} * \text{Umwelt...}$

## Wind

Wie die Temperatur so beeinflusst auch der Wind die Kapazität dadurch, dass sich die Startstrecke eines Flugzeuges verändert. Rückenwind von 5kn (rund 10 km/h) verlängert die Startstrecke um 7%, während Gegenwind um 5kn sie um 3% verkürzt. Da im Modell ein Durchschnittswert der Windstärke und Richtung über die Betriebsdauer errechnet werden muss, fallen Böen nicht als solche ins Gewicht. Bei der Landung sind es insbesondere die Seitenwinde, welche den Anflug erschweren. Böiger Seitenwind erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass eine Landung abgebrochen und durchgestartet werden muss. Auf die Gesamtkapazität betrachtet, handelt es sich dabei jedoch um eine unbedeutende Zahl solcher Ereignisse, welche im Modell nicht implementiert werden.

Umweltfaktor Wind [-] =  $1 + (0.5 * \text{frontaler Gegenwind } [m/s] + 0.5 * \text{seitliche Gegenwinde } [m/s]) * 0.03 + (0.5 * \text{direkter Rückenwind } [m/s] + 0.5 * \text{seitliche Rückenwinde } [m/s]) * -0.07$

Startzeit [s] =  $\sqrt{\frac{2 * \text{Startstrecke}}{\text{Beschleunigung}}} [s] * \text{Umweltfaktor Wind [-]} * \text{Umweltfaktor...}$

## **Kumulation der meteorologischen Ereignisse**

In der Realität treten die eben aufgezählten Wetterphänomene, welche sich auf die Aviatik auswirken, gelegentlich auch in kumulierter Art auf. Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, werden die Wetterereignisse mit negativem Kapazitätseffekt vom Modell zufallsverteilt, sodass auch Kumulationen wahrscheinlich sind. Getrennt sind jedoch z.B. Regentage und Schneetage, da diese meteorologisch nicht am gleichen Tag erfasst werden können.

### **2.4.1.3 Kontrollierte Lufträume**

Als kontrolliert gelten Lufträume, wenn sie von einer Flugdienstleitung überwacht werden und für das Befliegen die Erlaubnis der Flugüberwachung eingeholt werden muss. Für die Kapazitätsberechnung in der vorliegenden Arbeit werden die Endanflugrouten sowie die Abflugrouten in einem separaten Kapitel behandelt. Im Kapitel „Kontrollierte Lufträume“ sind der Endanflug sowie der Abflug für die Kapazitätsbetrachtung daher ausgeklammert.

Für die Berechnung der Kapazität von kontrollierten Lufträumen wurden in den 70er und 80er-Jahren mehrere Modelle entwickelt, wobei sich diese in zwei Gruppen einteilen lassen. (Dunlay 1975), (Janic 1982) oder auch (Fan 1988) behandeln die Kapazität von Luftraumüberwachung von der technischen Seite, d.h. wie viele Flugoperationen unter Einhaltung der einschlägigen Abstandsvorschriften der ICAO En-Route aber auch im An- und Abflug möglich sind. Diese (technische) Kapazität geht von der Annahme aus, dass die Luftraumüberwachung unendlich Ressourcen an Personal zur Verfügung hat. Sie lässt den Faktor Mensch und dessen Leistungsfähigkeit ausser Acht. Die zweite Gruppe von Untersuchungen wie (Couluris 1974), (Odoni 1979) und (Janic 1989) interessiert sich hingegen primär für den Fluglotsen als Mensch und dessen Möglichkeiten, den Flugdienst unter gegebenen Umständen sicher zu leiten (Janic 2000).

Für die technische Kapazität eines Luftraumes ist der An- und Abflug bestimmend. Diese werden im Modell dieser Arbeit als theoretische Werte berechnet und ausgewiesen und im Bericht im Kapitel „An- und Abflüge“ ausführlich behandelt. Im Kapitel „Kontrollierter Luftraum“ fokussieren wir uns daher auf den Faktor Mensch sowie den Grad an Sicherheit, welcher bei dessen Tätigkeit gefordert wird.

### **Kapazitätsbegrenzender Mensch**

Die Tätigkeit eines Fluglotsen bedingt ein ausserordentlich gutes räumliches Vorstellungsvermögen, eine hohe Konzentrationsfähigkeit und Belastbarkeit sowie ein rasches Erfassen und Lösen von neuen Problemsituationen (Holawe 2010). Ein falsches oder zu langsames Reagieren des Fluglotsen ist in vielen Fällen sicherheitsrelevant und gefährdet direkt (Insassen) und indirekt (am Boden) Menschenleben. Da sowohl von Passagieren, Piloten wie auch von der Allgemeinheit die grösstmögliche Sicherheit im Flugbetrieb verlangt wird, ist die Flugsicherung bestrebt, ihre Lotsen möglichst keinen Stresssituationen auszusetzen. In Stresssituationen kann die Fehlerquote eines Menschen um bis den Faktor 10 steigen.

Die Luftraumüberwachung ist wie der Luftraum in Sektoren horizontaler wie vertikaler Art eingeteilt (siehe Kapitel 2.1.1.1), wobei jeder Sektor von mindestens einem Fluglotsen kontrolliert wird. Damit alle Bewegungen innerhalb dieses Bereiches vom Lotsen zuverlässig wahrgenommen und korrekte Anweisungen weitergegeben werden können, darf die Anzahl der Flugzeuge einen gewissen Level nicht übersteigen. Wie hoch dieser Level ist, hängt von mehreren Umständen ab (Holawe 2010):

- Grösse des Sektors (z.B. bedeuten kurze Verweilzeiten einen hohen Übergabe-/ Übernahmeaufwand)
- Komplexität der Routenverläufe und Verkehrsverhältnisse innerhalb des Sektors
- Umweltbedingungen (z.B. erhöhter Betreuungsaufwand bei schlechtem Wetter)
- Berufserfahrung des Lotsen
- Persönliche Befindlichkeit des Lotsen (z.B. Müdigkeit, psychische Situation)

### Sektorkapazität

*Anmerkung: Die folgenden Ausführungen basieren auf einer, zum Zeitpunkt der Abgabe der vorliegenden Arbeit, noch nicht publizierten Arbeit von Laurent Favey, SkyGuide Genève (Favey 2013).*

Die Kapazität eines Sektors und damit des entsprechenden Luftraumes ist bestimmt durch die Anzahl Flugzeuge, welche ihn pro Zeiteinheit benutzen können. Sie kann aber aus ob genannten Gründen nicht pauschal angegeben oder berechnet werden. Mit Hilfe von Simulationen ist es jedoch möglich, den kritischen Kapazitätslevel anhand von Auftretenswahrscheinlichkeiten statistisch zu eruieren.

Hierfür werden anhand von Befragungen die Belastung und der Zeitbedarf verschiedener Luftverkehrssituationen evaluiert. (Janic 1989) untersuchte die slowenischen Flugsicherung bzw. den Luftraum um den Flughafen Ljubljana und kam auf folgende Werte (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7      Arbeitsaufwand Flugleitung pro Flugbewegung

Tätigkeit	Anteil	Zeitbedarf
	%	Sec.
Radarüberwachung und -analyse	25	100
Konstruktion von Flugmanövern (Wahl der Staffelung, Wegpunkte)	25	90
Funkkontakt mit Flugzeugen (Piloten) und Nachbarlufträumen (Lotsen)	20	75
Analyse und Lösung von aussergewöhnlichen Situationen	30	115
total	100	380

Quelle: Eigene Darstellung, nach (Janic 1989)

Während die Verteilung der Arbeitsanteile überall ähnlich sein dürfte, variiert der Zeitbedarf pro Flugzeug stark mit der Komplexität der Luftraumorganisation. Je mehr Kurven etwa An- und Abflugrouten innerhalb eines Sektors aufweisen, desto länger ist die Verweildauer einer



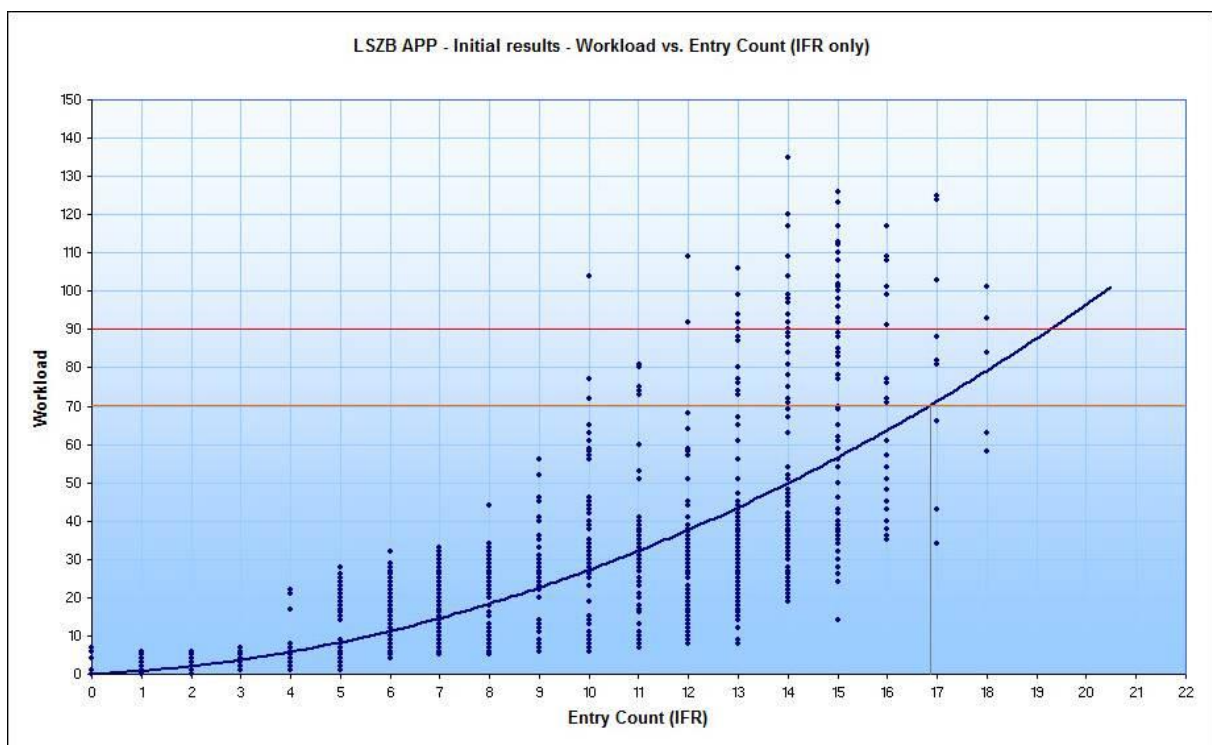
Maschine im Sektor und umso mehr Anweisungen müssen vom Lotsen erteilt werden. Ausserdem ist die Einhaltung der Abstände nach (ICAO 2007) im Zeit- und Routenablauf für den Lotsen um ein Vielfaches komplizierter und benötigt mehr Zeit.

Unvorhersehbare und aussergewöhnliche Situationen können im Flugbetrieb jederzeit entstehen. In diesen Momenten soll möglichst immer genügend Zeit für die Problemanalyse und -lösung zur Verfügung stehen. Wie auch in Tabelle 7 ersichtlich, macht dies um die 30% der Arbeitszeit aus. In der Bestimmung der Sektorkapazität wird diesem Aspekt Rechnung getragen, indem bei Bedarf von 70% der Arbeitsleistung für den ordentlichen Betrieb der Kapazitätslevel als erreicht gilt. So soll jederzeit 30% für aussergewöhnliche Situationen zur Verfügung stehen.

In der Simulation werden nun verschiedenste Verkehrssituationen generiert und deren Belastung anhand der Befragung der Fluglotsen bestimmt. In der Auswertung wird ersichtlich, ab wie vielen Flugzeugen pro Stunde in einem Sektor der zuständige Fluglotse zu 70% ausgelastet ist. Diesem Durchschnittswert entspricht die Sektorkapazität.

Für den Luftraum Bern TMA wurde folgende Simulation durchgeführt und eine Sektorkapazität von 17 Flugzeugen pro Stunde für den Anflug (Approach) errechnet.

Abbildung 12 Kapazitätssimulation Luftraum TMA Bern



Quelle: (Favey 2013)

Die so eruierten Sektorkapazitäten können stark variieren, wie Untersuchungen der Schweizer Flugsicherung SkyGuide an den Flughäfen Zürich und Genf zeigen (Favey 2013).

Tabelle 8 Simulation von Sektorkapazitäten auf den Flughäfen Zürich und Genf

	Zürich Airspace	Kapazität	Geneva Airspace	Kapazität
		Eintritte / h		Eintritte / h
Luftraum CTR Anflug	LSZH ARR	24	LSGG APP	39
Luftraum CTR Abflug	LSZH DEP	50	LSGG DEP	21
Luftraum E	EAST	39	INI EAST	35
	NORTH	36	INI NORTH	32
	SOUTH	32	INI SOUTH	33
	WEST	38		
Luftraum E total	ALL	35	INI ALL	39
Luftraum C	M1	44	L1	46
	M2	42	L2	47
	M3	38	L3	41
	M4	42	L4	41
	M5	37	L5	43
	M6	41	L6	43
Luftraum C total	M123456	44	L123456	48

Quelle: Eigene Darstellung, nach (Favey 2013)

Implementiert in die Berechnung der Sektorkapazität sind i.d.R. die Faktoren Sektorengrösse, Sektorendesign, Anzahl Routen, Routendesign (Anzahl Richtungsänderungen), Kreuzungen, Anzahl Flugzeuge, Flugzeugmix sowie Witterungsverhältnisse. Da sich die Flugüberwachung primär mit Instrumentenflügen auseinandersetzt, sind Sichtflüge nach Auskunft von Hr. Samuel Ellenberger, SkyGuide, nicht direkt in der Kapazitätsüberlegung berücksichtigt. Ebenso ist der Grad an Professionalität der Piloten nur schwer zu erfassen und daher nicht miteinberechnet. Da dies jedoch einen merklichen Einfluss auf die Arbeitsbelastung eines Flugverkehrsleiters hat, werden diese Punkte in der Kapazitätsberechnung für das vorliegende Modell mit entsprechenden Faktoren eingerechnet. Sind wie im Beispiel der TMA Bern Sektorkapazitäten nur für den Anflug (APP) oder den Abflug (DEP) einzeln gerechnet, kann das Resultat mit 2 multipliziert werden, um die Anzahl möglicher Bewegungen zu eruieren.

**Sektorkapazität TMA [FZ/h]** = Min (Sektorkapazität APP [FZ/h] + Sektorkapazität DEP [FZ/h]; Kapazität pro Lotse und Sektor C [FZ/h]; Kapazität pro Lotse und Sektor E [FZ/h])

**Kapazität Luftraum [FZ/h]** = Sektorkapazität TMA [FZ/h] / (Anteil IFR [%] + Anteil VFR [%] \* 0.5) / (Anteil prof. Aviatik [%] + Anteil Training [%] \* 1.5)

#### 2.4.1.4 An- / Abflüge

Unter dieses Kapitel fällt beim Instrumentenanflugverfahren der Endanflug zwischen dem Final Approach Fix (FAF), dem Beginn des Endanflugs, und dem Aufsetzen auf der Landebahn (siehe auch Abbildung 4). Im Abflug umfasst es den Bereich ab Erreichen einer Flughöhe von 15m bis zum Wegpunkt, welcher von allen startenden Flugzeugen im Instrumentenflug angesteuert werden muss. Existiert kein solcher Wegpunkt bzw. keine vorgegebene Abflugroute, wird beim Abflug der minimale Zeitabstand zwischen zwei startenden Flugzeugen kapazitätsbestimmend.

Im Sichtanflugverfahren ist die halbe Platzrunde bis zum Aufsetzen auf der Piste als Endanflug zu deklarieren, da diese Hälfte bei der Landung zwingend zu befliegen ist. Beim Abflug ist der Teil der Volte bis zur ersten Ausflugmöglichkeit (Korridor) einzubeziehen, da dieser von allen Maschinen befliegen werden muss.

#### Anflug

Für einen sicheren, geordneten Endanflug existieren vorgeschriebene Mindestabstände (engl. Separation) zwischen zwei Maschinen. Der Abstand ist zum einen abhängig von der Grösse bzw. dem Gewicht des führenden und des folgenden Flugzeuges, zum andern von der Art des Anflugverfahrens.

Flugzeuge sind diesbezüglich in drei Gewichtskategorien eingeteilt. Bis zu einem maximalen Startgewicht von 7t gilt eine Maschine als leicht (light), zwischen 7t und 136t als mittelschwer (medium) und ab 136t als schwer (heavy). Umso grösser und schwerer ein Luftfahrzeug ist, desto stärkere Luftverwirbelungen, die sogenannten Wirbelschleppen, hinterlässt es in der Luft. Diese unruhigen Luftmassen können nachfolgende Flugzeuge in Turbulenzen und bei einem Abreißen der Auftriebsströmung zum Absturz bringen. Besonders kritisch sind Situationen mit einem Kleinflugzeug, welches hinter einem Grossraumflugzeug fliegt. Die ICAO hat deshalb verbindliche Mindestabstandsvorschriften erlassen (ICAO 2007). Je schwerer das führende Flugzeug ist und je grösser der Unterschied zwischen führendem und folgendem Flugzeug ist, desto grösser ist der Minimalabstand. Die Distanzen sind wie in der Aviatik üblich in nautischen Meilen angegeben (siehe Tabelle 9).

Für Instrumentenflüge und Sichtflüge gelten unterschiedliche Abstandsvorschriften, was wohl auf die höhere Sicherheitsansprüche und -reserven zurückzuführen ist, welche bei Passagierflügen gelten. Solche sind grundsätzlich Instrumentenflüge. Im Sichtanflugverfahren bewegen sich die Abstände zwischen 2,4 nm (= 4'445m) und 6 nm (= 11'112m), beim Instrumentenanflug zwischen 3 nm (= 5'556m) und 6 nm (Trani 2009).

Tabelle 9      Abstandsvorschriften nach Anflugverfahren (in nm)

Sichtflug VFR				
	folgender	light	medium	heavy
führender				
light		2.4	2.4	2.4
medium		5.0	2.4	2.4
heavy		6.0	4.0	2.7
Instrumentenflug IFR				
	folgender	light	medium	heavy
führender				
light		3.0	3.0	3.0
medium		5.0	3.0	3.0
heavy		6.0	5.0	4.0

Quelle: Eigene Darstellung, nach (Trani 2009)

Jeder Flugzeugtyp hat eine eigene Endanfluggeschwindigkeit, welche vom Piloten wenn möglich eingehalten werden soll. Als Faustregel gilt: Je Grösser ein Flugzeug, desto höher ist seine Anfluggeschwindigkeit.

Segelflugzeuge fliegen mit 50 - 60 kn (90 - 110 km/h) an, Kleinflugzeuge mit 70 - 80 kn (130 - 150 km/h), mittelgrosse Maschinen mit 100 - 130 kn (180 - 240 km/h) und grosse Langstreckenflugzeuge mit 140 - 150 kn (260 - 280 km/h), wobei Propellermaschinen jeweils etwas langsamer sind als Düsenflugzeuge (Daten aus diversen Hersteller- und Betreiberangaben).

Die vorgenannten Abstandsvorschriften gelten für den gesamten Endanflug. Je nach Anfluggeschwindigkeit des führenden und des folgenden Flugzeuges können somit drei unterschiedliche Fälle eintreten (siehe auch Abbildung 13, S.45).

#### Fall 1: Schnell folgt auf Langsam (LS)

Wenn das folgende Flugzeug eine höhere Anfluggeschwindigkeit aufweist, holt dieses im Verlaufe des Endanfluges auf. Der Abstand muss so gewählt werden, dass er beim Aufsetzen des führenden Flugzeuges auf der Landebahn noch der Mindestdistanz entspricht. Bei der Staffe- lung zu Beginn des Endanfluges muss die Lücke demnach umso grösser sein, je grösser der Ge- schwindigkeitsunterschied ist.

#### Fall 2: Langsam folgt auf Schnell (SL)

Ist das folgende Flugzeug langsamer im Anflug, wächst die Lücke auf das führende mit der Zeit. Der Minimalabstand muss in diesem Fall am Beginn des Endanfluges, dem Final Approach Fix,

gewahrt sein. Umso grösser der Geschwindigkeitsunterschied der beiden Maschinen oder je länger der Endanflug ist, desto grösser wird das Zeitfenster, in welchem die Start- und Landebahn geräumt ist. Dies eröffnet die Möglichkeit, zwischen zwei Landungen einen oder mehrere Starts durchzuführen, ohne dabei die Kapazität für landende Flugzeuge zu beeinträchtigen.

#### Fall 3: Gleiche Anfluggeschwindigkeit (GG)

Befinden sich zwei ähnliche Flugzeugtypen im Anflug, bleibt der Abstand zwischen ihnen konstant. Die Staffe­lung kann am Final Approach Fix auf die Minimaldistanz zwischen den beiden Maschinen gestellt werden. Dieser Betriebszustand ist zum einen einfach zu handhaben und zu überwachen, zum andern kann die Kapazität der Landungen maximiert werden, wenn möglichst häufig ähnliche Maschinen hintereinander landen.

Der Grund dafür liegt in der Staffe­lung gleich grosser Flugzeuge, welche, wie in Tabelle 9 zu sehen, mit geringeren Abständen möglich ist als bei einem Mix. Deshalb wird dies bereits in der Flugplanausarbeitung berücksichtigt oder im Betrieb von der Flugsicherung möglichst so koordiniert, um in den Hauptlandezeiten eine maximale Leistungsfähigkeit der Luftfahrtinfrastruktur zu erreichen.

Die Berechnung der Kapazität des Anfluges für Landungen ist an sich ein theoretischer Wert, da er erstens die Pisten und Rollwege und zweitens die Tatsache, dass nicht nur gelandet wird, ausser Acht lässt. Anflug, Pisten und Rollwege bilden ein stark verstricktes System, welches sich in der Praxis gegenseitig beeinflusst. Die Konfiguration von Pisten und Rollwegen etwa beeinflusst, wie lange ein gelandetes Flugzeug eine Piste belegt und ihre Ausgestaltung beschränkt je nachdem die Betriebsdauer. Der Zusammenhang und Einfluss zwischen Starts und Landungen auf den An- und Abflug sind nachfolgend unter Kapazität im gemischten Betrieb erläutert.

Der Anflug wird aber mit steigender Wahrscheinlichkeit kapazitätsrelevant, je länger der Endanflug und umso vielfältiger der Flugzeugmix ist.

Anflugzeit SL [s]	= Länge Endanflug [m] + Minimalabstand [m] / Anfluggeschwindigkeit [m/s]
Anflugzeit LS/GG [s]	= Länge Endanflug [m] - Minimalabstand [m] / Anfluggeschwindigkeit [m/s]
Gewichtete Anflugzeit [s]	= (Anflugzeit SL [s] * W'keit SL + Anflugzeit LS / GG [s] * W'keit LS + GG) * Anteil Flugzeugkategorie
Kapazität Anflug [FZ/ h]	= 3600 / gewichtete Anflugzeit [s]

#### Abflug

Für den Abflug gelten prinzipiell dieselben Überlegungen wie beim Anflug. Auch hier sind Kleinflugzeuge langsamer als Grossflugzeuge, sie erreichen dafür i.A. eine bessere Steigleistung als schwere (vollbetankte und beladene) Passagier und Frachtmaschinen.

Für startende Luftfahrzeuge gibt es zwei Arten von Abstandsvorschriften, wobei jeweils die restriktivere von beiden gilt. Zum einen gilt ein zeitlicher Mindestabstand von 1 bis 2 Minuten,

welcher zwischen zwei Starts eingehalten werden muss, je nach Grössen des führenden und folgenden Flugzeuges. Zum andern gelten die allgemeinen Luftregeln der ICAO, welche einen Abstand von mindestens 10 nm oder 18,5 km zwischen zwei Flugzeugen auf derselben Route vorschreibt (ICAO 1996).

Der erste Fall (Zeitabstand) ist dann relevant, wenn die Abflugroute ab einem Flugplatz nicht vorgegeben, nur kurz ist ( $< 5$  km) oder mehrere Routen zur Verfügung stehen. Dies ist auf nicht kontrollierten Flugplätzen und im Sichtflug üblich. Er kommt aber auch im Instrumentenflug bzw. in kontrollierten Flugräumen zur Anwendung, wenn zwei aufeinander folgende Flugzeuge unterschiedliche Abflugrouten bzw. Wegpunkte befliegen. Der Zeitabstand darf als Regelfall bezeichnet werden. Der Abstand beträgt mindestens 60 - 120 Sekunden, wenn die führende Maschine im Steigflug schneller ist, ansonsten 300 Sekunden.

Der Distanzabstand ist primär im Instrumentenflug in kontrollierten Lufträumen relevant, wenn nur wenige oder sogar nur eine Abflugroute vorgegeben sind. In diesem Fall gilt es ein Abstand von mind. 10 nm ( $=18'520\text{m}$ ) bis sogar 20 nm ( $=37'040\text{m}$ ) einzuhalten. Das Überwachen bzw. die abzuwartende Startfreigabe ist dabei Aufgabe der Flugsicherung.

Wie bei der Kapazität des Anfluges ausgeführt, ist auch die Kapazität des Abfluges an sich theoretisch und in den seltensten Fällen für die Systemkapazität bestimmend.

Eine lange, vorgegebene Abflugroute (IFR):

Abflugzeit SL [s]  $= \text{Min} (\text{Länge Abflugroute [m]} ; 18'520\text{m}) / \text{Durchschnittsgeschwindigkeit im Steigflug [m/s]}$

Abflugzeit LS/GG [s]  $= \text{Min} (\text{Länge Abflugroute [m]} ; 37'040\text{m}) / \text{Durchschnittsgeschwindigkeit im Steigflug [m/s]}$

Mehrere, kurze oder keine vorgegebene Abflugrouten:

Abflugzeit SL [s]  $= 60 / 120$

Abflugzeit LS/GG [s]  $= 300$

Gewichtete Abflugzeit [s]  $= (\text{Anflugzeit SL [s]} * \text{W'keit SL} + \text{Anflugzeit LS / GG [s]} * \text{W'keit LS + GG}) * \text{Anteil Flugzeugkategorie}$

Kapazität Abflug [FZ/h]  $= 3600 / \text{Max} (120; \text{Abflugzeit gewichtet [s]})$

### Kapazitätseffekte im gemischten Betrieb

Eine Trennung in Starts und Landungen ist im realen Betrieb (bei nur einer Start-/ Landebahn) einer Luftfahrtinfrastruktur nur bedingt möglich, auch wenn es üblich ist, dass sich Starts und Landungen ungleichmässig verteilen und unterschiedliche Spitzenstunden aufweisen.

Landungen haben grundsätzlich immer Vorrang vor Starts. Beeinflussen lässt sich ihre Kapazität mit einer möglichst optimalen Anflugstaffelung. Gerade auf unkontrollierten Flugplätzen ist eine Ordnung der Flugzeuge jedoch nicht möglich, so dass die Anflüge zufällig verteilt erfolgen. Besonders kapazitätzehrend sind Segelflugzeuge, weil sie ihre Landung am wenigsten

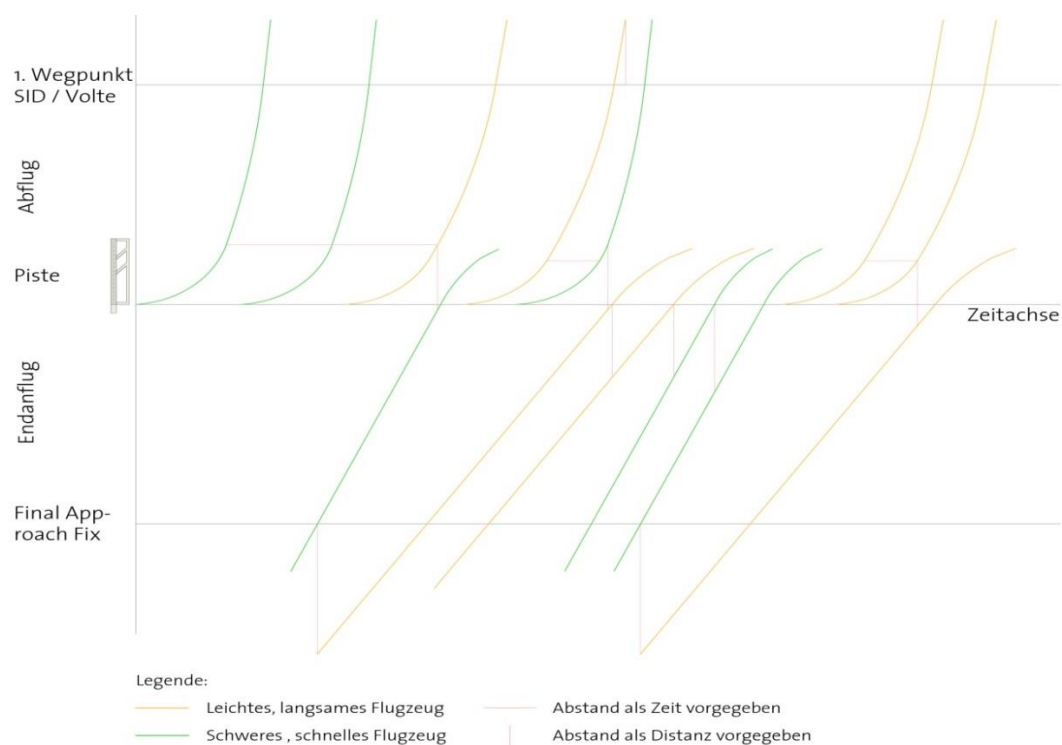
beeinflussen können und zudem die Landebahn nach dem Anhalten lange blockieren, da sie abgeschleppt werden müssen.

Eine zufällig verteilte Anordnung der landenden Flugzeuge hat den Effekt, dass sich grössere Lücken bei der Pistenbelegung auftun, wenn ein langsames auf ein schnelles Flugzeug folgt. In dieser Lücke können einen bis mehrere Starts erfolgen. Da diese die Landekapazität nicht beeinträchtigen, nennen wir sie im Folgenden „kapazitätsneutrale Starts“. Je länger der Endanflug ist, desto grössere Lücken entstehen und desto mehr kapazitätsneutrale Starts sind möglich.

Dasselbe kann auch in umgekehrter Konstellation auftreten. Kapazitätsneutrale Landungen sind diejenigen Landungen, welche zwischen zwei Starts durchgeführt werden können, ohne den zweiten Start zu verzögern. Die Häufigkeit bzw. der Anteil von kapazitätsneutralen Bewegungen steigt mit der zunehmenden Länge des Endanfluges (kapazitätsneutrale Starts) und/oder der vorgegebenen Abflugroute (kapazitätsneutrale Landungen). In der Realität sind die Abflugrouten meistens weniger lang oder nicht kapazitätsrelevant, sodass kapazitätsneutrale Landungen seltener sind als kapazitätsneutrale Starts.

In der Abbildung 13 ist ein Betrieb auf einem Flugplatz mit Endanflug und vorgegebener Abflugroute idealisiert dargestellt. Es gibt schnelle und langsame Flugzeuge und alle Kombinationen (SL, GG, LS) für Starts und Landungen sind abgebildet.

Abbildung 13 Weg-Zeit-Diagramm Flugbetrieb



Quelle: Eigene Darstellung, nach (Horonjeff and McKelvey 1983)

## **An-/ Abflug im System An-/Abflug-Piste-Rollwege**

Wie erwähnt sind die An- bzw. die Abflugkapazität im Grundsatz theoretische Grössen. Die Auswirkungen von und auf die Start- und Landebahn und von dieser wiederum von und auf die Rollwege sind umso ausgeprägter, je einfacher die Ausgestaltung der luftseitigen Infrastruktur ist. Detailliert erläutert sind diese Aspekte im Kapitel 2.4.2.1.

Allgemein gilt: Je weniger Rollwege und Abrollwege existieren, desto länger sind die Belegungen von Piste und Rollwege pro Flugzeug. Je nachdem, ob diese Belegungszeiten oder die An- und/oder Abflugzeit pro Flugzeug länger sind, wird die Kapazität des Systems von Ungünstigeren bestimmt. Eine hohe Anflugkapazität als Beispiel ist somit nutzlos, wenn die Flugzeuge auf Grund einer ungünstigen Rollwegkonfiguration lange die Start- und Landebahn belegen und deren Kapazität tiefer ist.

Das oben gezeigte Weg-Zeit-Diagramm zeigt eine Pisten-Rollwegkonfiguration, welche ein rasches Verlassen der Start- und Landebahn nach der Landung und ein rasches Erreichen der Take-Off-Position ab dem Rollweg erlaubt. Die Kapazität dieser Pisten- und Rollwegkonfiguration ist sehr hoch, wodurch die An-/Abflugkapazität leistungsbestimmend ist.

### **2.4.2 Luftseitige Infrastruktur**

Die Luftseitige Infrastruktur umfasst das Pisten- und Rollwegesystem, das Vorfeld mit den Standplätzen sowie den Flugsteig (Gebäudeteile nach Sicherheitskontrolle). Die Kapazität dieser Anlageteile kann der Betreiber einer Luftfahrtinfrastruktur durch bauliche Massnahmen direkt beeinflussen, auch wenn für diese jeweils eine Bewilligung der zuständigen Bundesbehörde, dem BAZL, eingeholt werden muss.

Bei der luftseitigen Infrastruktur gibt es Subsysteme, welche für alle Flugzeuge, und solche, die nur für kommerzielle Passagierflugzeuge kapazitätsrelevant sind.

#### **2.4.2.1 Pisten und Rollwege**

Die Start- und Landebahnen und die Rollwege haben je zwei Arten von Charakteristika, welche die Kapazität beeinflussen. Ihre Dimensionierung und Ausgestaltung beeinflusst die Kapazität, indem die Betriebsdauer oder die Grösse der Flugzeuge beschränkt ist. Die Anlagen als System betrachtet beeinflussen die Kapazität über die Komplexität des auf ihr möglichen Betriebs.

### **Dimensionierung und Ausgestaltung**

Die Dimensionierung umfasst die Länge und Breite von Pisten und Rollwegen, aber auch deren baulichen Aufbau bzw. die daraus abgeleitete Tragfähigkeit des Belages. Weiter ist die Befehuerung ein kapazitätsbeeinflussendes Element der Anlagen.



Die Länge und Breite der Start- und Landebahn bestimmt die Grösse der Flugzeuge, welche auf einer Luftfahrtinfrastruktur verkehren dürfen und damit auch, wie vielfältig der Flugzeugmix sein kann. Dasselbe gilt für die Breite der Rollwege. In erster Linie bei den Rollwegen, aber auch der Start- und Landebahn, ist die Dimensionierung des tragenden Belages mit entscheidend.

Abhängig von der Länge und Breite sowie dem erlaubten Raddruck, mit welchem die Oberfläche belastet werden darf, werden Flugzeugtypen ausgegrenzt, für welche die spezifischen Eigenschaften nicht genügen. Am Beispiel des Flugplatzes Birrfeld mit einer Pistenlänge von 727m (entspricht Längen-Code 1), einer Breite von 20m (Breiten-Code B) und einer Belastung von 1.0 MPa (Tragfähigkeits-Code Y) sind demnach nur Flugzeuge start- und landeberechtigt, welchen diese Masse genügen. Die grösstmögliche Flugzeugkategorie ist somit eine 1B mit APC Y, was einer Dornier 228 oder Pilatus PC-12 entspricht. Umso homogener die auf einem Flugplatz verkehrenden Flugzeuge sind, desto einfacher lässt sich der Betrieb gestalten und desto höher kann die Kapazität eines Flugplatzes werden.

Die Betriebsdauer beeinflussen die Pisten und Rollwege über ihre Beschaffenheit und Befeuerung. Befestigte Start- und Landebahnen sind wetterfest, d.h. sie sind auch bei starkem und anhaltendem Regen nutzbar und können bei Schneefall maschinell geräumt werden. Die Befeuerung erlaubt zudem den Betrieb über die Dämmerungszeiten hinaus.

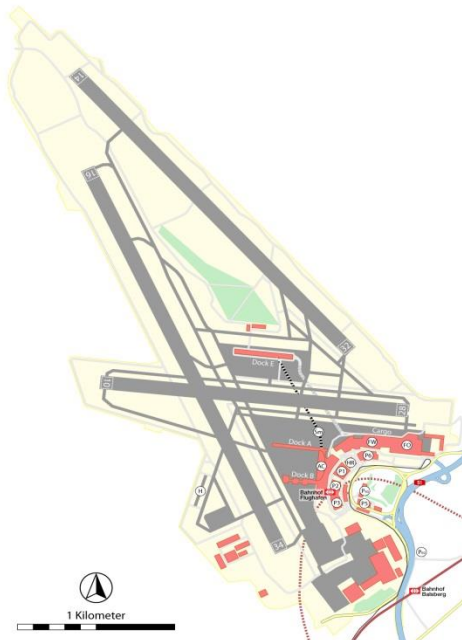
Betriebstage (befestigt) [d] = 365 - Tage mit schlechten Sichtverhältnissen[d]  
Betriebstage (mit ILS) [d] = 365

## System

Die Pisten und Rollwege sind als System zu betrachten, im welchem sie sich gegenseitig beeinflussen. Das Layout der Anlagen beeinflusst die Belegungszeiten der einzelnen Teile, die möglichen Betriebsformen und deren Komplexität, welche wiederum die Kapazität bestimmen. Grundsätzlich geht es um die Frage, wie lange ein startendes oder landendes Flugzeug die Rollwege und Pisten belegt. Die Dauer der Belegung plus der vorgeschriebene Mindestabstand zwischen zwei Maschinen bildet den Zeitbedarf eines Flugzeuges im System.

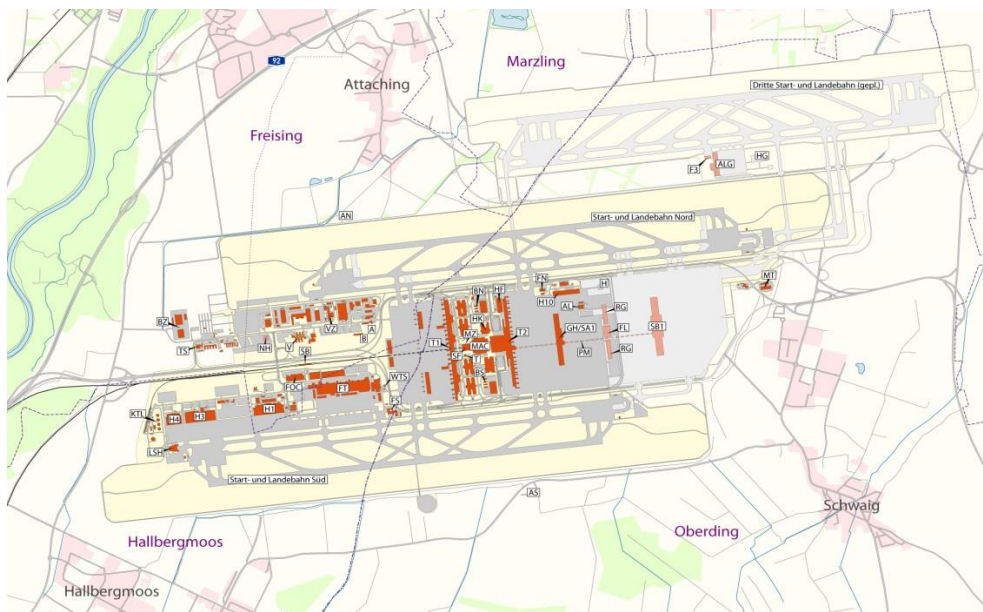
Als erstes ist es das Pistensystem, d.h. die Anordnung der Pisten, welche die Kapazität massgeblich beeinflusst. Befinden sich zwei Start- und Landebahnen in einem Abstand von mindestens 1,5 km parallel zueinander, können diese unabhängig betrieben werden. Befinden sich solche in einem Unterabstand oder sind sie gar nicht parallel zueinander, beeinflussen sich die Pistenbetriebe und können z.B. nicht gleichzeitig angeflogen werden. Mit dem Flughafen Zürich besteht in der Schweiz ein Paradebeispiel für ein höchstkomplexes Pistensystem, im welchem sich alle Operationen auf allen Pisten gegenseitig beeinflussen (siehe Abbildung 14). Obwohl Zürich über drei Start- und Landebahnen verfügt, ist die Kapazität des Pistensystems geringer (rund 345'000 Bewegungen pro Jahr) (BAZL 2010) als beispielsweise dasjenige der Flughäfen München (siehe Abbildung 15) oder London-Heathrow mit je zwei, aber parallelen Pisten (rund 480'000 Bewegungen pro Jahr)(Wikipedia).

Abbildung 14 Pistensystem Flughafen Zürich



Quelle: [www.wikipedia.org/Flughafen\\_Zuerich](http://www.wikipedia.org/Flughafen_Zuerich)

Abbildung 15 Pistensystem Flughafen München



Quelle: [www.wikipedia.org/Flughafen\\_Muenchen](http://www.wikipedia.org/Flughafen_Muenchen)

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich primär auf Luftfahrtinfrastrukturen für die General Aviation, welche in aller Regel kleinere Anlagen mit nur einer Start- und Landebahn oder mit sehr eng beieinander liegenden Start- und Landebahnen sind, die also nicht unabhängig voneinander betrieben werden können. Daher soll der Fokus im Folgenden auf Anlagen mit einer Hauptpiste und deren Eigenschaften liegen.

Entscheidenden Einfluss auf die Kapazität hat in diesen Fällen die Existenz eines Parallelrollweges zur Start-/ Landebahn. Ist ein solcher vorhanden, können landende Flugzeuge die Piste nach dem Abbremsen verlassen und auf dem Rollweg zum Standplatz fahren und belegen dabei die Piste nicht mehr. Startende Flugzeuge können über einen Parallelrollweg bis an den Pistenanfang rollen und dort warten, bis die Start- und Landebahn frei ist. Die Startposition ist von dort in aller Regel innert 30 Sekunden erreicht. Existiert kein Parallelrollweg, muss die Start- und Landebahn als Rollweg genutzt werden um zum oder vom Vorfeld ans Pistenende zu gelangen. Diese Belegung der Piste reduziert ihre Kapazität um ein Mehrfaches.

Die Belegung der Start- und Landebahn kann noch weiter verkürzt werden, wenn Zwischenabrollwege das Verlassen der Piste ermöglichen, sobald die Maschine abgebremst hat und sie nicht bis ans Ende der Piste rollen muss. Zwischenabrollwege sind in der Regel rechtwinklig zur Piste angelegt, damit sie in beide Richtungen genutzt werden können. Um den nötigen 90°-Winkel sicher zu befahren, muss ein Flugzeug auf 20 km/h abgebremst werden. Die entstehende Bremszeit verlängert die Belegung der Start- und Landebahn. Die Spezialform des Schnellabrollweges (Ablenkwinkel 25° - 45°) erlaubt das Abrollen von der Piste mit bis zu 50 kn (93 km/h) und verringert die Belegung der Start- und Landebahn zusätzlich, jedoch nur in die entsprechende Richtung.

Als letzter Punkt kann entscheidend sein, ob sich zwei Flugzeuge auf den Rollwegen stellenweise kreuzen können. Dies ist an separaten Ausweichstellen oder bei Abzweigungen in Abrollwege möglich. Ist das nicht möglich, verlängert sich die Anrollzeit zur Startposition, da der Pilot warten muss bis das landende, entgegenkommende Flugzeug auf dem Rollweg bis aufs Vorfeld gelangt ist. Dies jedoch auch nur dann, wenn die Landerichtung und die Startrichtung nicht identisch sind. Die Kombination aus fehlenden Kreuzungsmöglichkeiten und ungleicher Betriebsrichtung ist sehr selten und betrifft v.a. Anlagen, welche aus topografischen Gründen nur in eine Richtung benutzt werden können.

Auf Rollwegen gilt generell eine Geschwindigkeit von max. 30 kn oder 55 km/h oder die Angabe des Flugplatzbetreibers. Der Abstand zwischen zwei Flugzeuge auf dem Rollweg ist nicht grundsätzlich vorgeschrieben und liegt in der Verantwortung des Piloten. Als Faustregel gilt es aber mindestens die doppelte Länge der eigenen Maschine einzuhalten. Die Belegung der Rollwege kann somit sehr dicht sein. Die daraus abgeleitete, isolierte Kapazität der Rollwege ist als theoretischer Wert zu betrachten.

$$\begin{aligned} \text{Belegung Landung [s]} &= \text{Bremszeit [s]} (+ \text{Wendezeit [s]}) + \text{Rollzeit bis Abrollweg [s]} \\ \text{Kapazität Landung [FZ/h]} &= 3600 / \text{Min}(\text{Belegung Landung [s]}; \text{Minimalabstand [m]}) \end{aligned}$$

Belegung Start [s]	= Anrollzeit bis Startposition [s] + Beschleunigungszeit [s] + Flugzeit bis 15m Höhe [s]
Kapazität Starts [FZ/h]	= 3600 / Min(Belegung Start [s]; Minimalabstand [m])
Belegung Rollwege [s]	= 3 * Flugzeuglänge [m] / 15.433 [m/s] (30 kt)
Kapazität Rollwege [FZ/h]	= 3600 / Belegung Rollwege [s]

### 2.4.2.2 Vorfeld-Fläche

Der Begriff des Vorfeldes begrenzt sich in diesem Abschnitt auf die Manövrierfläche zwischen Rollwegen und den Standplätzen der Flugzeuge. Auf dieser Fläche ist das Kreuzen zweier Maschinen grundsätzlich möglich. Sollte dies nicht der Fall sein, ist das Vorfeld als Teil des Rollweges zu betrachten und unterliegt derselben Kapazitätsberechnung. Auf dem Vorfeld manövrieren aber nicht nur Flugzeuge sondern auch Fahrzeuge der Flugplatzsicherung, die sogenannten „Follow me“-Fahrzeuge, Versorgungs- und Tankfahrzeuge usw.

Die Kapazität des Vorfeldes in diesem Sinne ist in seltenen Fällen kapazitätsbestimmend, nämlich dann, wenn die anschliessenden Rollwege eine höhere Kapazität aufweisen. Dies kann sein, wenn:

- mehrere Rollwege nahe beisammen in das Vorfeld münden
- der Rollweg doppelspurig angelegt ist (Summer der Kapazitäten pro Richtung)
- die Breite des Vorfeldes keine Kreuzungsmanöver zulässt, sogenannter Vorfeldrollweg (Apron-Taxiway) und die Länge des Vorfeldrollweges länger ist als der eigentliche Rollweg. Die Berechnung erfolgt analog der eines normalen Rollweges.

Auf dem Vorfeld gelten grundsätzlich die gleichen Regeln wie auf Rollwegen, eine Höchstgeschwindigkeit wird aber meist auf 10 Knoten oder rund 18 km/h festgelegt.

Belegung Vorfeld [s]	= 3 * Flugzeuglänge [m] / 5.144 [m/s] (10 kt)
Kapazität Vorfeld [FZ/h]	= 3600 / Belegung Vorfeld [s]

### 2.4.2.3 Standplätze

Je nach Zweck der Luftfahrtinfrastruktur und der verkehrenden Flugzeuge sind zwei Arten von Standplätzen zu unterscheiden, welche kapazitätsrelevant werden. Für Anlagen mit relevantem Passagierverkehr sind die Anzahl Standplätze am Gate entscheidend, also jene Stellplätze, von welchen Passagiere das Terminal direkt erreichen (über Passagierbrücke oder über Treppe zu Fuss, aber ohne Bustransport). Für Anlagen ohne relevanten Passagierverkehr sind es die Anzahl Stellplätze insgesamt, welche für das Parken zur Verfügung stehen.

#### Standplätze am Gate

Wie in Kapitel 2.1.1.6 erläutert, ist das Aus- und Einsteigen lassen mit ein limitierender Parameter dafür, wie schnell ein Flugzeug abgefertigt werden kann. Für Passagierflugzeuge bzw. deren Airlines sind Standplätze am Gate neben dem höheren Komfort für die Passagiere auch ein

Zeit- und Geldfaktor. Die Kapazität auf einem Passagierflugplatz setzt sich zusammen aus der Anzahl Standplätze für Passagierabfertigung und der Abfertigungszeit pro Passagierflugzeug. Hinzu kommt eine Wechselzeit, also die Zeit für das Wegstossen und Wegrollen des abgefertigten Flugzeuges und die Anfahrt der ankommenden Maschine (Horonjeff and McKelvey 1983).

$$\text{Kap}_{\text{PAX}} \text{ Vorfeld [PAXFZ/h]} = \frac{\text{Kapazität grösste Flugzeugkat. [PAX]} * \text{Korrekturfaktor PAX}}{3600 / \text{Anz. Standplätze} * \text{Abfertigungszeit [s]} + \text{Wechselzeit [s]}}$$

## Stellplätze

Die Anzahl Stellplätze insgesamt ist für Flugplätze relevant, welche v.a. der allgemeinen Luftfahrt (General Aviation) zur Verfügung stehen. Einerseits muss auf der Anlage stets Platz sein für die hier immatrikulierten Flugzeuge, andererseits sollen auch Gäste genügend Stellplätze vorfinden. Kapazitätskritisch auf einer Anlage sind Fliegertreffen, bei welchen sich an einem Tag oder Wochenende Piloten mit ihren Flugzeugen an einem Standort versammeln.

Die Kapazität an Stellplätzen kann nur schwer bzw. sehr ungenau in Flugbewegungen pro Jahr definiert werden, da die Umschlagzeit pro Flugzeug (in der allgemeinen Luftfahrt) ein bisher nicht ausreichend untersuchter Parameter darstellt und eine Annahme ohne die entsprechenden Kenntnisse den wissenschaftlichen Grundsätzen nicht genügt. Daher ist es zweckmässiger, die Kapazität als absoluten, Maximalwert an zur Verfügung stehenden Stellplätzen anzugeben.

$$\text{Kapazität Stellplätze [FZ]} = \text{Anzahl zur Verfügung stehenden Stellplätze}$$

### 2.4.2.4 Abfertigung

Die Abfertigung umfasst alle vom Flugplatz zu erbringenden Dienstleistungen an einem Flugzeug für dessen Rück- oder Weiterflug. Die General Aviation und die Passagierluftfahrt haben naturgemäss unterschiedliche Leitungsbedürfnisse und quantitative Anforderungen.

Es darf davon ausgegangen werden, dass Flugplätze, welche Passagierflüge entgegennehmen, eine übliche Grundversorgung aller dafür notwendigen Dienstleistungen zur Verfügung stellen kann. Sollte eine Dienstleistung nicht im grössenüblichen Umfang zur Verfügung stehen, ist selbstredend diese Dienstleistung entscheidend für die Kapazität. Unter der Annahme, dass diese Voraussetzung erfüllt ist, gilt: Kapazitätsrelevant sind bei der General Aviation die Betankung und bei der kommerziellen Luftfahrt, neben der Passagierabfertigung, die Betankung und die Kabinenreinigung (TRB 1987) (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10 Vorhandene und kapazitätsbestimmende Elemente der Abfertigung

	General Aviation	Passagierflugverkehr
Stromversorgung	x	x
Betankung	X	X
Frischwasserzufuhr	o	x
Abwasserleerung	o	x
Kabinenreinigung	o	X
Gepäckservice (Aus- und Einladen auf dem	o	x
Catering	o	x
Enteisung	x	x
i.d.R. nicht vorhanden	o	
Vorhanden	x	
Kapazitätsbestimmend	X	

Quelle: Eigene Darstellung

### Betankung

Bei der Betankung ist als erstes die Verfügbarkeit des richtigen Treibstoffes von Bedeutung. Üblich sind heute folgende Sorten (Wikipedia):

- Jet A-1      Kerosin für Turbinenstrahl- und Propellerturbinentriebwerke
- AvGas      hochoktaniges Flugbenzin für Kolbenmotor-Flugzeuge (kleine Propellermaschinen)
- MoGas      Gewöhnliches Autobenzin, kann (mit Einschränkungen) für Kolbenmotorflugzeuge verwendet werden
- Diesel      Für leichte Kolbenmotorflugzeuge

Bei mittelgrossen bis grossen Luftfahrtinfrastrukturen sind stets alle Treibstoffsorten vorhanden. Auf Flugfeldern ist Jet A-1 i.d.R. nicht verfügbar, wenn turbinenbetriebene Flugzeuge auf Grund anderer Anforderungen nicht zur Benützung zugelassen sind.

Für die Kapazität ist die Anzahl Tankanlagen sowie deren Tankleistung pro Zeiteinheit entscheidend dafür, wie schnell wie viele Flugzeuge betankt werden können. Ob eine Anlage mobil

(Tanklastwagen) oder stationär (Tanksäule) ist, ist für die Kapazität nur dann relevant, wenn die Tankgrösse des Flugzeugs dasjenige des Tanklastwagens übersteigt. Das in diesem Falle nötige Nachfüllen des LKW verlängert die Tankzeit um ein Mehrfaches. Dieser Fall ist in der Schweiz in seiner Häufigkeit vernachlässigbar. Er kommt nur dann vor, wenn eine verhältnismässig grosse Maschine ausserordentlicher Weise auf einer kleinen Luftfahrtinfrastruktur landet. In aller Regel führt das Flugzeug dann aber noch genügend Treibstoff für den Rückflug mit sich.

Allgemein ist es üblich, dass Flugzeuge mit Tankreserven für den Notfall unterwegs sind. Der Tank wird im Normalfall nie ganz geleert und auch selten ganz gefüllt, da nur so viel Treibstoff wie nötig mitgeführt werden soll. Bei der Kapazitätsberechnung wird daher angenommen, dass maximal 75% der Tankgrösse gefüllt wird.

### Kabinenreinigung

Die Kabinenreinigung ist auf den Zeitraum zwischen dem Ende des Aussteigevorgangs und Beginn des Einsteigevorgangs der Passagiere beschränkt. Sofern die Betankung schneller abgeschlossen werden kann als die Abfolge Deboarding-Kabinenreinigung-Boarding, ist die Kabinenreinigung kapazitätsrelevant, da sie die Standzeit bestimmt. Der Zeitbedarf für die Reinigung ist abhängig von der Grösse der Kabine und natürlich der Anzahl Reinigungskräfte. Da Airlines ihre Standzeit am Boden i.d.R. möglichst minimieren möchten, kann man davon ausgehen, dass sie in diesem Fall so viele Reinigungskräfte in Anspruch nehmen werden, bis der Zeitbedarf möglichst nahe oder sogar unter jenen der Betankung herankommt.

Kapazität Betankung [Fz/h] = Tankgrössen [l] \* 0.75 / Anzahl Tankanlagen \* Tankleistung [l/h]

Kap<sub>PAX</sub> Versorgung [PAXFZ/h] = Kapazität grösste Flugzeugkat. [PAX] \* Korrekturfaktor PAX  
/ Min (Kapazität Betankung [Fz/h]; Kapazität Reinigung [Fz/h])

### 2.4.2.5 Flugsteig

Der Flugsteig (engl. Gate) umfasst den luftseitigen Bereich des Terminals ab der Sicherheitskontrolle bis zur Fluggastbrücke und umgekehrt. Die Sicherheitskontrolle selbst ist im Systemteil Terminal (Kapitel 2.4.3.4) behandelt.

Der Flugsteig weist mit dem Wartebereich und dem Boarding zwei Komponenten auf, welche kapazitätsbestimmend sein können.

#### Wartebereich

Der Aufenthaltsbereich für die Fluggäste vor dem Boarding bestimmt durch seine Grösse, Einrichtung und Geometrie, wie viele Passagiere sich darin aufhalten können (TRB 1987). Grundsätzlich sind, wie auch im Teil Terminal, die Ansätze und Methoden zu Kapazitätsüberlegungen in der Fussgängermodellierung anwendbar. Der Zufluss zum Wartebereich ist durch die Sicherheitskontrolle beschränkt, der Abfluss durch das Boarding. Passagiere im Wartebereich haben üblicherweise ein Handgepäckstück auf sich und halten sich bis zu einer Stunde am Flugsteig



auf. Aus Komfortgründen sollte daher eine Dichte von 1.0 Passagieren/m<sup>2</sup> nicht überschritten werden (TRB 1987). Die verfügbare Fläche im Wartebereich in m<sup>2</sup> entspricht demnach der maximalen Anzahl Personen, welche sich gleichzeitig darin aufhalten können. Da auf Passagierflugplätzen ausgeprägte Spitzenstunden vorkommen können, sind diese kapazitätsrelevant.

## Boarding

Im Gegensatz zur Sicherheitskontrolle, welche durchgehend in Betrieb ist und somit konstant einen Zufluss generiert, ist das Boarding als Abfluss aus dem Wartebereich nur während kurzen Zeiten zum Füllen des Flugzeugs am Flugsteig aktiv. Wie in Kapitel 2.1.1.6 Abfertigung gezeigt, macht das Boarding rund 1/4 der Aufenthaltszeit einer Maschine am Flugsteig aus. Rechnet man die Wechselzeiten mit ein, bleiben rund 20% der Betriebszeit, in welcher das Boarding stattfinden kann.

Das Boarding wird durch mehrere Komponenten in seiner Kapazität bestimmt. Als erstes sind dies die Schalter vor der Fluggastbrücke, im Modell Boardingschalter genannt, an welchen die Passagiere ein letztes Mal kontrolliert und gezählt werden. Ein solcher Schalter hat gemäss (TRB 1987) eine Kapazität von 10 Passagieren / Minute. Die Fluggastbrücke als zweites ist ein Durchgang mit einer Kapazität von 40 - 50 Personen / Minute und Meter (TRB 1987) und nicht kapazitätsrelevant, da das Flugzeug als dritte Komponente ein weiterer Engpass darstellt. Für den Eintritt in ein Flugzeug kann mit einer Kapazität von rund 16 - 18 Personen / Minute und Eingang gerechnet werden (TRB 1987). Durch effizientere Boarding-Methoden wie z.B. das gezielt reihenweise Auffüllen vom Heck zum Bug oder der Fensterplätze vor den Gangplätzen oder Anpassungen an der Konfiguration der Kabine (2 Mittelgänge), kann die Kapazität zwar verbessert werden. Über einen Wert von 20 Personen / Minute ist sie, zumindest bei den heute üblichen Kabinenbauarten, jedoch nicht zu erhöhen (Janic 2000).

Kapazität Boarding [PAX/h] = Min (Kapazität Boardingschalter; 18 PAX / Minute)

Kap. Wartebereich [PAX/h] = Fläche Wartebereich [m<sup>2</sup>]

Kap<sub>-PAX</sub> Flugsteig [PAXFZ/h] = Kapazität grösste Flugzeugkat. [PAX] \* Korrekturfaktor PAX  
/ Min (Kapazität Boarding [PAX/h]; Kap. Wartebereich [PAX/h])

## 2.4.3 Landseitige Infrastruktur

Die Landseitige Infrastruktur umfasst die öffentlich zugänglichen Teile eines Flughafens oder -platzes, also die landseitige Erschliessung per Strasse und Schiene sowie die Gebäudeteile des Terminals bis zur Sicherheitskontrolle. Im Gegensatz zur Luftseite sind die Anlageteile der landseitigen Infrastruktur nur für die Kapazität von Passagierflugzeugen relevant.

### Korrekturfaktor PAX

Bei allen Kapazitätsberechnungen, welche auf Passagierflugzeuge abgestützt sind, kommt ein sogenannter Korrekturfaktor ins Spiel. Grundsätzlich muss ein Flugplatz oder Flughafen in der



Lage sein, auch mehrere der grössten Maschinen, welche auf ihm zugelassen sind, abfertigen bzw. bewältigen zu können. Diese Ausrichtung auf einige wenige Grossmaschinen auf einer Anlage mit ansonsten überwiegend kleineren Flugzeugen kann je nach Fall zu einer übermässigen Verzerrung der Resultate führen, wenn mit dem grössten Flugzeugtyp gerechnet wird. Mit dem Korrekturfaktor kann dies reduziert werden. Auf einer Luftfahrtinfrastruktur mit überwiegend ähnlich grossen Maschinen ist der Korrekturfaktor eher höher zu wählen (0.5 - 0.8), bei einem starken Mix von Klein- und Grossflugzeugen eher tiefer (0.2 - 0.5), um ein realistisches Ergebnis zu erhalten.

#### **2.4.3.1 Erschliessung allgemein**

Wie eine Luftfahrtinfrastruktur in ihrer Umgebung erreichbar und an das regionale oder nationale Verkehrsnetz angeschlossen ist, entscheidet über ihre Eignung und den Grad, als Verkehrsflughafen für Passagierflüge zu dienen. Die Erschliessung kleinerer Anlagen beschränkt sich meist auf eine normale Zufahrtsstrasse, bei mittelgrossen Anlagen kommt häufig ein Anschluss ans lokale oder regionale Busnetz hinzu. Grosse Luftfahrtinfrastrukturen verfügen i.d.R. über einen Anschluss ans nationale Autobahnnetz sowie das nationale Bahnnetz, um das Passagier- und Begleitpersonenaufkommen bewältigen zu können.

#### **2.4.3.2 Erschliessung mit öffentlichem Verkehr**

Eine Anbindung ans Netz des öffentlichen Verkehrs ist für Passagierflughäfen aus verschiedenen Gründen sinnvoll:

- Finanzen: Es muss weniger Parkraum zur Verfügung gestellt werden
- Ideologie: Umweltfreundlichkeit des ÖV gegenüber dem MIV als Argument für die Nachhaltigkeitsbestrebungen des Flugplatzbetreibers
- Komfort: Auswärtige Fluggäste sind nicht auf ein Mietwagen oder Taxi angewiesen
- Komfort: Unabhängigkeit von der Verkehrslage (Staus) bei der Anreise

Der Bus als strassengebundener ÖV ist für mittelgrosse Luftfahrtinfrastrukturen der ideale Verkehrsträger, da er auf dem (bestehenden) Strassennetz verkehrt, die Investitionskosten dadurch gering sind (Erstellung Haltestelle, ev. Fahrzeugbeschaffung und Personalrekrutierung) und das Angebot relativ kurzfristig (binnen Monaten) der Nachfrage angepasst werden kann. Die Kapazität eines Busanschlusses ergibt sich aus der Anzahl Abfahrten (Takt) multipliziert mit der Gefässgrösse. Da letztere durch die Infrastruktur oder mangels unterschiedlicher Fahrzeuge weniger variabel sein kann, ist v.a. durch Taktverdichtung oder -ausdünnung eine Optimierung des Angebotes zu erreichen.

Eine Anbindung ans Schienennetz ist zum einen für Grossflughäfen (höhere Kapazitäten als Busanbindung) und zum anderen für weit vom Stadtzentrum weg gelegene Luftfahrtinfrastrukturen (höhere Transportgeschwindigkeit) interessant. Ein (neuer) Bahnanschluss für einen Flughafen bedingt hohe Investitionskosten, welche meistens vom Bahninfrastrukturbetreiber getragen werden und nicht vom Luftfahrtinfrastrukturbetreiber. Neben dem Schienentrassee sind z.B. Bahnhöfe zu erstellen und Rollmaterial zu beschaffen. Ein Bahnanschluss und dessen Dimensionierung bedingen einen langfristigen Planungshorizont, da das Angebot nur noch un-

ter hohen Kostenfolgen und über mehrere Jahre angepasst werden kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Anschluss wie in der Schweiz in ein nationales Taktsystem eingebunden ist.

Die Kapazität eines Bahnanschlusses ergibt sich aus der Anzahl Abfahrten (Taktfolge) pro Zeiteinheit multipliziert mit der Grösse des Rollmaterials. Sie liegt i.d.R. ein mehrfaches über jener eines Busangebotes und ist daher nur für Flughäfen mit regem Passagieraufkommen (ab ca. 1 Millionen Fluggäste pro Jahr) zweckmässig.

In beiden Fällen ist zu berücksichtigen, dass für die Kapazitätsabschätzung des ÖV primär Abfahrten in die Hauptlastrichtung, meistens in Richtung Stadt, berücksichtigt werden sollten. Fahrten weg vom Stadtzentrum machen i.d.R. einen unbedeutenden Anteil aus. Ebenso ist zu beachten, dass nur der Anteil der Bahn- oder Buskapazität beansprucht werden kann, der bei der Ankunft noch nicht belegt ist. Als Beispiel sei an dieser Stelle der Bahnanschluss des Flughafens Zürich erwähnt. Die meisten Züge am Bahnhof Flughafen in Richtung Stadtzentrum kommen aus der Ostschweiz (St.Gallen, Winterthur) und sind je nach Tageszeit oft bereits stark ausgelastet, wenn sie am Flughafen eintreffen. So steht dem ÖV-Anschluss am Flughafen nur noch eine reduzierte Kapazität des Verkehrsträgers zu Verfügung.

Kapazität Bahn [PAX/h]	= Bahnabfahrten in Lastrichtung * Gefässgrösse [PAX/h] * (1 - Auslastung bei Ankunft [-])
Kapazität Bus [PAX/h]	= Busabfahrten in Lastrichtung * Gefässgrösse [PAX/h] * (1 - Auslastung bei Ankunft [-])
Kapazität ÖV [PAX/h]	= Kapazität Bahn [PAX/h] + Kapazität Bus [PAX/h]
Kapazität <sub>PAX</sub> ÖV [PAXFZ/h]	= Kapazität grösste Flugzeugkat. [PAX] * Korrekturfaktor PAX / Kapazität ÖV [PAX/h]

#### 2.4.3.3 Erschliessung für motorisierten Individualverkehr

Der motorisierte Individualverkehr bildet die Haupterschliessung praktisch aller Luftfahrtinfrastrukturen. Die unterschiedlichen Ausprägungen sind:

- Fahrt von Fluggästen im eigenen PW zum und vom Flugplatz und Parkierung während der Reise
- Begleitfahrt von Fluggästen privat oder mit Taxi zum und vom Flugplatz
- Private oder geschäftliche Besuche des Flugplatzes
- Mitarbeiter auf dem Flughafen

Die Fluggäste, welche mit dem privaten Auto anreisen sowie die Besucher des Flugplatzes belegen Parkplätze für normales und Langzeitparken, ebenso Mitarbeiter auf dem Flughafen, sofern kein separater Mitarbeiterparkplatz besteht. Begleit- und Taxifahrten hingegen werden über die Vorfahrt und gegebenenfalls Kurzzeitparkplätze abgewickelt. Der Luftfahrtinfrastrukturbetreiber kann diese Aufteilung durch bauliche und v.a. betriebliche Massnahmen beeinflussen. Um eine gleichmässige Verteilung auf die Parkräume zu erreichen, werden z.B. auf vielen Flughäfen weiter weg gelegene Parkplätze günstiger angeboten als Parkplätze nahe dem Terminal. Dass die Vorfahrt nicht als Parkplatz missbraucht wird, kann durch häufigere Kontrollen und einer beschränkten Aufenthaltsdauer auf Kurzzeitparkplätzen erreicht werden.

## Vorfahrt

Die Kapazität der Vorfahrt lässt sich berechnen aus der zur Verfügung stehenden Kantenlänge und dem Passagieranteil, welcher über die Vorfahrt abgefertigt wird.

Pro Fahrzeug wird rund 6 - 7m Vorfahrt beansprucht. Im Gegensatz zu einer normalen Längsparkierung stehen die Fahrzeuge weniger dicht aneinander, da erstens die Umschlagrate wesentlich höher ist und daher ohne zurücksetzen manövriert werden will und zweitens, da für den Gepäckein- und auslad aus dem Kofferraum genügend Raum hinter dem Fahrzeug gelassen wird. Wie in Tabelle 6 ersichtlich, resultiert aus den kurzen Verweilzeiten auf der Vorfahrt eine Umschlagrate bis zu 20 Fahrzeugen pro Platz und Stunde. Für das Modell wird mit einer konservativen Aufenthaltsdauer von 10 Minuten pro Fahrzeug oder einer Umschlagrate von 6 gerechnet, da angenommen wird, dass in der Schweiz die hohen Werte aus den USA nicht erreicht werden.

Der Besetzungsgrad eines Fahrzeuges auf der Vorfahrt wird mit 1,5 Passagieren (+ Fahrer) angenommen. Neben einer Mehrheit Alleinreisender sind auf einem Flughafen insbesondere in der Ferienzeit viele Paare und Familien unterwegs. Einen durchschnittlichen Besetzungsgrad von 1,5 über das Jahr erscheint daher realistisch. Der Anteil Flugreisender, welche die Vorfahrt benutzen, wird von (TRB 1987) mit 70% aller mit dem MIV anreisenden Personen angegeben.

## Parkierung

Die Kapazitätsberechnung der Parkierung wird nicht wie üblich pro Stunde oder Tag, sondern pro Jahr angegeben. (TAC 1980) und (Horonjeff and McKelvey 1983) empfehlen für kleinere Luftfahrtinfrastrukturen 900 – 1'200 bzw. 1'000 – 1'400 Parkplätze pro Million Fluggäste pro Jahr. Für das Modell wird ein Wert von 1'000 Parkplätzen pro Million Fluggäste verwendet.

Der vorgenannte Wert gilt für den Fall, dass die gesamte Erschliessung über den MIV erfolgt. Je höher der Anteil ÖV im Modal split ist, desto weniger Parkplätze pro Million Fluggäste sind nötig. Mit 1'000 Parkplätzen erreicht eine Luftfahrtinfrastruktur mit einem ÖV-Anteil von 50% demnach eine Jahreskapazität von 2 Millionen Fluggästen.

Der Anteil der Passagiere, welche über die Parkierung an und vom Flughafen reisen, wird nach (TRB 1987) mit 30% des MIV angenommen. Wie bei der Vorfahrt wird auch bei der Parkierung mit 1,5 Fluggästen pro Fahrzeug gerechnet. Für die Berechnung der Stundenkapazität wird im Modell die Parkierungskapazität durch die Anzahl Betriebsstunden geteilt.

$$\text{Kapazität Vorfahrt [PAX/h]} = (\text{Vorfahrtlänge [m]} / 7 * \text{Umschlagrate} * \text{Anzahl Kanten}) / (\text{Anteil MIV [-]} * 0.7 * (1 / \text{Besetzungsgrad [PAX/Fz]}))$$

$$\text{Kapazität Parkierung [PAX/h]} = (\text{Anzahl Parkplätze} / 1000) / (\text{Anteil MIV [-]} * 0.3 * (1 / \text{Besetzungsgrad [PAX/Fz]}))$$

$$\begin{aligned} \text{Kapazität MIV [PAX/h]} &= \text{Kapazität Vorfahrt [PAX/h]} + \text{Kapazität Parkierung [PAX/h]} \\ \text{Kapazität}_{\text{PAX}} \text{ MIV [PAXFZ/h]} &= \text{Kapazität grösste Flugzeugkat. [PAX]} * \text{Korrekturfaktor PAX} \\ &\quad / \text{Kapazität MIV [PAX/h]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kap. Erschliessung [PAX/h]} &= \text{Kapazität ÖV [PAX/h]} + \text{Kapazität MIV [PAX/h]} \\ \text{Kapazität}_{\text{PAX}} \text{ Erschliessung [PAXFZ/h]} &= \text{Kapazität}_{\text{PAX}} \text{ ÖV [PAXFZ/h]} + \text{Kapazität}_{\text{PAX}} \text{ MIV [PAXFZ/h]} \end{aligned}$$

#### 2.4.3.4 Terminal Abflug

An dieser Stelle werden die öffentlich zugänglichen Bereiche des Terminals betrachtet. Untersucht wird grundsätzlich der direkte Weg von der Vorfahrt bzw. der Parkierung durch das Terminal zum Check-In-Schalter-Bereich und von dort direkt zur Sicherheitskontrolle.

Von Interesse für die Kapazität sind auf diesem Pfad:

- Durchgänge (Türen, Drehtüren, Schiebetüren)
- Höhenunterschiede (Treppen, Rolltreppen)
- Check-In Schalter
- Sicherheitskontrolle

Je nach Anzahl und Ausgestaltung der erwähnten Elemente kann jedes von ihnen für die Kapazität des Terminals bestimmend sein, da der kleinste Wert die Gesamtkapazität ergibt (Prinzip der Fassdauben).

Bei den Teilen ‚Gänge und Durchgänge‘ und ‚Höhenunterschiede‘ handelt es sich bei der Kapazitätseruierung prinzipiell um Fussgängermodellierungen, für dessen detaillierte Kalkulation auf ausgewiesene Fachliteratur verwiesen wird.

Für das vorliegende Modell soll mit einer vereinfachten Form ein guter Näherungswert erreicht werden, um diese im Verhältnis zu anderen Subsystemkapazitäten einordnen zu können. Zeigen sich die Systemteile als klar kapazitätsbegrenzend, kann in einem zusätzlichen Schritt die Kapazität der Durchgänge und Höhenunterschiede verfeinert berechnet werden und dabei auch spezifische Charakteristika wie z.B. die Geschwindigkeit von Rollbändern oder -treppen, Geschwindigkeit von Fussgängern in Abhängigkeit von Zeit, Klima etc. einbezogen werden, welche im vorliegenden Modell nicht berücksichtigt sind.

#### Durchgänge (Türen, Drehtüren, Schiebetüren)

In der sehr vereinfachten Form eines Fussgängermodells wird die Durchlässigkeit eines Durchganges in Abhängigkeit seiner geringsten, hindernisfreien Breite als kapazitätsbestimmend angesehen (vereinfacht: Engpass). (Horonjeff and McKelvey 1983) rechnen an einem Flughafen für Personen mit Gepäck mit 20 - 30, (TRB 1987) mit bis zu 45 Personen pro Minute und Meter Durchgangsbreite.

## Höhenunterschiede (Treppen, Rolltreppen)

Dieselbe Überlegung soll auch für Treppen angewandt werden. (Horonjeff and McKelvey 1983) geben für Passagiere mit Gepäck einen Wert von 15 - 20 Personen pro Minute und Meter für Treppen und 20 - 60 Personen für Rolltreppen an. Für das vorliegende Modell werden 15 Personen (Treppen) und 30 Personen (Rolltreppen) pro Minute und Meter verwendet.

## Check-In-Schalter

Die Check-In-Schalter dienen der Anmeldung zum Flug und der Gepäckaufgabe. Im 20. Jahrhundert wurden das Check-In und die Gepäckannahme an einem bedienten Schalter durchgeführt. In den letzten Jahren verbreitete sich vor allem auf Grossflughäfen zunehmend das Prinzip des Self-Check-In, bei welchem der Fluggast die Anmeldung und das Ticketing (Beschriftung der Gepäckstücke) an einem Automat der Fluggesellschaften oder über das Internet selbstständig durchführt. Nur die Gepäckaufgabe erfolgt noch an einem bedienten Schalter. Das Self-Check-In reduziert die Kosten für den Flughafen bzw. die Fluggesellschaften v.a. auf Grund des verminderten Personalaufwandes.

Die Kapazität des Check-In hängt direkt von der Anzahl Schalter und Automaten ab, welche zur Verfügung stehen. Die Unterscheidung zwischen Schalter-Check-In und Self-Check-In hat heute noch einen sehr geringen Einfluss auf die Kapazität, da zum einen das Check-In übers Internet weiterhin das Ticketing am Flughafen bedingt und noch einen kleinen Anteil an allen Check-Ins ausmacht und zum andern der Zeitaufwand pro Passagier am Automaten noch mindestens gleich gross ist wie am Schalter. Dies ist primär auf die mangelnden Bedienungskenntnisse von nicht regelmässigen Flugreisenden zurückzuführen.

Allerdings können auf Grund des kleineren Platzbedarfs der Automaten mehr Check-Ins auf der gleichen Fläche im Terminal angeboten werden als wenn feste Schalter erstellt werden, was die Kapazität des Check-In durch die höhere Gesamtanzahl an Möglichkeiten erhöht.

Der Zeitbedarf am Check-In geben (Horonjeff and McKelvey 1983) mit 160 - 220 Sekunden an, an Automaten der Swiss wird mit 180 Sekunden gerechnet (Hedwiger 2008). Bei einem Durchschnittswert von 180 Sekunden ergibt dies eine Kapazität von 20 Passagieren pro Schalter oder Automat in der Stunde.

## Sicherheitskontrolle

Die Sicherheitskontrolle umfasst grundsätzlich:

- die Passkontrolle
- die Reisegepäckkontrolle
- Personen- und Handgepäckkontrolle

wobei die Passkontrolle und die Reisegepäckkontrolle i.d.R. innert Sekunden durchgeführt sind und nur in seltenen Zweifelsfällen mehr Aufwand generieren. Für die Kapazitätsbetrachtung sind sie daher nicht relevant.

Bleibt demnach die Personen- und Handgepäckkontrolle als kapazitätsbestimmendes Element. Diese wurde auf Grund terroristischer Bedrohungen in der Luftfahrt in den 1970er bis 90er-Jahren und nochmals nach den Anschlägen vom 11. September 2001 intensiviert und mittels neuen Technologien bis hin zum Ganzkörperscan ergänzt.

Die heutigen Abläufe sind nicht mit denjenigen von vor 30 Jahren vergleichbar. Dennoch zeigt der Vergleich von Untersuchungen aus den USA in den 80er-Jahren (Horonjeff and McKelvey 1983), (TRB 1987) mit heute, dass der Durchsatz der Sicherheitskontrolle sogar gesteigert werden konnte. Während erstere Werte von 1,5 bis 2,5 Personen pro Minute und Kontrollposten angeben, werden von der TSA, der US-amerikanischen Transportsicherheitsbehörde, welche für die Sicherheitskontrollen an Flughäfen zuständig ist, heute Werte von 2,5 bis 4 Personen pro Minute erreicht (Airport Dallas 2006, Homeland Security Research 2009, Quick 2012). Dies ist auf die technologische Entwicklung, insbesondere im Bereich der Scanner zurückzuführen, welche das aufwändige Kontrollieren von Hand bei Gepäckstücken aber auch Personen hinfällig werden lässt. Selbst aufwändige Untersuchungen wie Bodyscanner erreichen einen Durchsatz von bis zu 3,5 Personen pro Minute (Homeland Security Research 2009).

Die Kapazität der Sicherheitskontrolle ergibt sich somit aus der Anzahl der Kontrollstellen multipliziert mit dem Durchsatz.

Kapazität Durchgänge [PAX/h] = Kleinste Durchgangsbreite [m] \* 30 PAX/Min

Kapazität Treppen [PAX/h] = Kleinste Durchgangsbreite [m] \* 15 PAX/Min

Kapazität Rolltreppen [PAX/h] = Kleinste Durchgangsbreite [m] \* 20 PAX/Min

Kapazität Check-In [PAX/h] = Anzahl Check-In \* 0.33 PAX/Min

Kap. Sicherheitskontrolle [PAX/h] = Anzahl Kontrollstellen \* 3 PAX/Min

Kapazität Terminal [PAX / h] = Min (Kapazität Durchgänge [PAX/h]; Kapazität Treppen [PAX/h] + Kapazität Rolltreppen [PAX/h]; Kapazität Check-In [PAX/h]; Kapazität Sicherheitskontrolle [PAX/h])

Kapazität<sub>PAX</sub> Terminal [PAXFZ/h] = Kapazität grösste Flugzeugkat. [PAX]  
\* Korrekturfaktor PAX / Kapazität Terminal [PAX/h]

#### 2.4.3.5 Terminal Ankunft

Ebenfalls im Terminal findet die Ankunft von gelandeten Passagieren statt. Dieser Bereich ist nicht öffentlich zugänglich und umfasst als kapazitätsrelevantes Element die Gepäckausgabe. Durchgänge und Höhenunterschiede sind hierbei nicht von Bedeutung, da der Menschenstrom aus dem Flugzeug heraus in die Länge gezogen ist und die meisten Passagiere ohne grösseres Gepäck unterwegs sind. Ausserdem führt von jedem Standplatz am Gate ein eigener (direkter) Weg zur Gepäckausgabe, so dass Kumulationen von Passagieren aus mehreren Flugzeugen erst nahe der Gepäckausgabe auftreten.

Die Kapazität der Gepäckausgabe in Passagieren oder Flugzeugen ist bestimmt durch die Anzahl Gepäckstücke pro Fluggast bzw. Flugzeug sowie der Ausgabekapazität seitens der Gepäckverarbeitung. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen einer manuellen Gepäckausgabe an einem Schalter oder auf kleinen Luftfahrtinfrastrukturen sogar am Flugzeug direkt und einer automatischen Gepäckausgabe. Letztere erfolgt über Gepäckbänder und wird üblicherweise an allen Passagierflughäfen angewandt. Die Länge der Gepäckbänder in einem Terminal ist i.d.R. einheitlich, da das Gepäck aller Flugzeuggrößen über die Gepäckbänder ausgegeben werden können soll. Daher ist primär die Anzahl Gepäckbänder bzw. auch Anzahl manueller Gepäckausgaben von Bedeutung.

(Horonjeff and McKelvey 1983) spricht bei Gepäckbändern von einer Ausgaberate von 6 – 12 Gepäckstücken pro Minute, (TRB 1987) eine solche von 15. Da in der Schweiz die Gepäckabfertigung verhältnismässig speditiv erfolgt, kann im Modell mit 15 Gepäckstücken pro Minute gerechnet werden. Bei manueller Gepäckausgabe muss mit einer wesentlich geringeren Rate gerechnet werden, wobei hierfür 2 Gepäckstücke pro Minute realistisch erscheinen.

Die Anzahl Gepäckstücke pro Fluggast wird von (TRB 1987) wie folgt kalkuliert, wobei es sich dabei um eine Durchschnittsberechnung handelt, welche im Einzelfall auch stark abweichen kann (Bsp. Flug mit überwiegend Businessreisenden ohne Gepäck):

Passagierzahl \* 0.9 (da rund 10% nur mit Handgepäck reisen) \* 1.3 (durchschnittliche Gepäckstückzahl pro Passagier mit Gepäck)

Kap.Gepäckausgabe Band [PAX/h] = Anzahl Gepäckbänder \* 15 / 0.9 \* 1.3

Kap.Gepäckausgabe manuell [PAX/h] = Anzahl Ausgabestellen \* 2 / 0.9 \* 1.3

Kapazität<sub>PAX</sub> Terminal Ankunft [PAXFZ/h] = Kapazität grösste Flugzeugkat. [PAX] \* Korrekturfaktor PAX / Kapazität<sub>PAX</sub> Gepäckausgabe [PAX/h]

## 2.4.4 Zusammensetzung Luftverkehr

Die Zusammensetzung des Luftverkehrs auf einer Luftfahrtinfrastruktur ist ein weiterer kapazitätsbeeinflussender Faktor. Die gängigen Luftverkehrsfahrzeuge können dabei grundsätzlich drei Typen unterschieden werden. Motorlose Flächenflugzeuge (Segelflieger), Motorflächenflugzeuge sowie Hubschrauber. Der Einfluss auf die Kapazität eines Flugplatzes ergibt sich dabei aus den Eigenschaften v.a. der Leistung der Flugzeuge, welche die Belegungszeit von Anflug, Abflug, Pisten bzw. Landeplätzen und Rollwegen bestimmt.

### 2.4.4.1 An-/Abflug

Kapazitätsmässig hat der Flugzeugmix im An- und Abflug den grössten Effekt.

Wie in Kapitel 2.4.1.4 bzw. in Abbildung 13 gezeigt, ergibt sich bei einer starken Mischung von Flugzeugtypen mit verschiedenen Leistungseigenschaften ein uneinheitlicheres Bild von An-

und Abflügen, was zu einer Reduktion der Kapazität führt, wenn die Lücken nicht passend genutzt werden können. Der Betrieb mit einheitlichen Maschinen erleichtert zudem den Aufwand für die Flugsicherung erheblich, wenn die Abstände zwischen zwei Flugzeugen konstant bleiben und vorhersehbarer sind.

Für die Kapazität lässt sich daraus ableiten, dass die Kapazität einer Anlage mit der Einheitlichkeit der Flugzeuge zunimmt. Eine allgemeine Formulierung und Quantifizierung dieses Effektes existiert für kleine Anlagen bis heute nicht. Untersuchungen in den USA wie (Hansen 2001) am Beispiel des Flughafens Los Angeles zeigen aber, dass der Effekt nicht linear ist.

Die Resultate der Untersuchung von (Hansen 2001) zeigen, dass der Effekt der Einheitlichkeit bei Grossflugzeugen stärker ist als bei Kleinflugzeugen. Bereits ein bestimmter, kleiner Anteil kleiner Maschinen auf einem Grossflughafen reduziert die Kapazität von An- und Abflügen im zweistelligen Prozentbereich.

#### **2.4.4.2 Infrastruktur und Einrichtung**

Auch die Leistungsfähigkeit der Bodeninfrastruktur ist abhängig vom Flugzeugmix.

Betankungsanlagen für Kleinflugzeuge und Grossraumflugzeuge etwa sind so verschieden, dass sie aus folgenden Gründen nicht für beides genutzt werden können.

- Treibstoffart (MOGAS, AVGAS für Kleinflugzeuge / JET A-1-Kerosin für Düsenflugzeuge)
- Tankstutzen
- Tankleistung / -leitungsdruck (60 - 100l/min. / 1'000l/min.)

Auf einer Anlage mit breitem Flugzeugmix wird es häufig vorkommen, dass für den aktuellen Flugzeugmix zu wenige Betankungsfahrzeuge für den einen Typ und dafür überzählige Fahrzeuge für den anderen Typ vorhanden sind. Durch das nicht volle Auslasten der Bodeninfrastruktur verringert sich deren effektive Kapazität.

Dasselbe Problem kann sich auch bei den Stellplätzen ergeben, welche üblicherweise für eine gewisse Flugzeuggrösse dimensioniert wurden. Stellplätze können auch von kleineren Flugzeugen genutzt werden, wobei dann aber die Infrastruktur zu gross dimensioniert ist und die theoretische Kapazität nicht effektiv genutzt werden kann.

#### **2.4.4.3 Motorflächenflugzeuge**

Motorflugzeuge unterscheiden sich in ihrer Leistungsfähigkeit primär entsprechend ihrer Grösse. Im Allgemeinen gilt, je grösser ein Flugzeug, desto schneller fliegt es an und ist es im Steigflug. Die Differenz zwischen Propeller- oder Düsentriebwerkantrieb ist nicht einheitlich. Tendenziell sind Propellermaschinen langsamer als vergleichbare Jets, wobei der Unterschied im An- und Abflug aber nicht annähernd so ausgeprägt ist wie im Normalflug.

Das Spektrum reicht bei Anfluggeschwindigkeiten von 65kn (120km/h) bis 145kn (270km/h). Bei der Geschwindigkeit im geraden Steigflug (nicht die Abfluggeschwindigkeit) liegt die Bandbrei-



te zwischen 80kn (150km/h) und 250kn (460km/h). Ein Grossraumflugzeug legt den Endanflug also in knapp der Hälfte und den Abflug in rund einem Drittel der Zeit eines Kleinflugzeuges zurück. Die Optimierung von Abläufen ist selbst bei vorhandener Planungszeit eine Herausforderung. Eine Durchmischung, d.h. zufallsverteilte Gross- und Kleinflugzeuge führt wie im Bahnverkehr beim Mix von Schnell- und Güterzügen zu einer Beeinträchtigung der Kapazität.

#### 2.4.4.4 Segelflugzeuge

Segelflugzeuge oder allgemein motorlose Flächenflugzeuge fallen im Flugzeugmix besonders auf, da sie die Start- und Landebahn um ein mehrfaches länger belegen als Motorflugzeuge. Für den Start muss der Segler auf die Piste geschoben und am Schleppflugzeug oder einer Winde eingeklinkt werden. Nach der Landung müssen Helfer zuerst zum Segelflugzeug gelangen und dieses dann von der Piste schieben oder ziehen. Diese Vorgänge brauchen selbst bei schneller Abwicklung mehrere Minuten. Nach Auskunft von erfahrenen Segelflugpiloten vom Flugplatz Birrfeld muss für einen Start mit 3 - 4 Minuten Belegungszeit gerechnet werden, für eine Landung mit rund 2 - 3 Minuten.

Segelflugzeuge beeinflussen die Kapazität eines Flugplatzes durch die Pistenbelegung damit im Vergleich mit motorisierten Kleinflugzeugen überproportional stark negativ.

#### 2.4.4.5 Hubschrauber

Flüge von Hubschraubern oder auch Helikopter genannt werden bei Zählungen als normale Flugbewegungen erfasst. Da die Landeplätze für Hubschrauber auf Luftfahrtinfrastruktur in aller Regel separat ausgewiesen sind, ist die Kapazität durch die Anzahl Lande- und Stellplätze gegeben und unabhängig von den Infrastrukturen für Flächenflugzeuge (Piste, Rollwege, Vorfeld, Terminal). Je nach Konfiguration von An- und Abflügen sowie der Lage der Landeflächen beeinflussen sie aber das System An-/ Abflug-Piste-Rollwegen für Flächenflugzeuge.

Nicht beeinflussend sind Hubschrauberbewegungen, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Auf der Sichtanflugkarte (VAC) sind An- und Abflugrouten für Hubschrauber festgelegt
- Diese Routen schneiden keine An- oder Abflugrouten für Flächenflugzeuge
- Der/ die Landeplätze für Hubschrauber schränken die Bewegungsfreiheit für Flächenflugzeuge auf dem Vorfeld nicht ein.

In diesem Fall ist der Helikopterbetrieb als unabhängig und wie eine separate Infrastruktur zu betrachten und die Flugbewegungen von Hubschraubern abzuziehen.

Wenn die genannten Bedingungen nicht erfüllt sind, sind Helikopter auf Grund ihrer ähnlichen Geschwindigkeit wie Kleinflugzeuge anzusehen, welche einen Anflug- und Abflugslot benötigen und die Anflug- und Abflugrouten belegen. Ihre Anzahl Flugbewegungen fällt in die Kapazitätsnachfrage bzw. den Kapazitätsbedarf.

### 3 Praktische Umsetzung

In Kapitel 2 haben wir das Gesamtsystem Luftfahrtinfrastruktur und seine Subsysteme analysiert und die methodisch-wissenschaftlichen Ansätze für die Abschätzung der Kapazität anhand der kapazitätsbestimmenden Teile zusammengetragen oder wo nötig entwickelt. Die vorliegende Arbeit beinhaltet als wichtige Zielsetzung, dass diese Erkenntnisse so aufgearbeitet werden sollen, dass sie in der Praxis von Aviatikexperten aber auch von fachlich interessierten Laien angewandt und eine Kapazitätsabschätzung einer Luftfahrtinfrastruktur durchgeführt werden kann.

Dies umfasst die Adaption und Anpassung von Berechnungen, Kennzahlen, Prinzipien von rechtlichen und betrieblichen Aspekten etc. auf schweizerische Verhältnisse und die Umsetzung in ein logisches, praxisnahes Modell für die einfache Anwendung zur Kapazitätsabschätzung.

#### 3.1 Grundlagen

Für die Erstellung eines Modelles und die Umsetzung in eine Anwendung sind verschiedenen Grundlagen nötig.

##### **Systemdefinition und -abgrenzungen**

Es ist festzulegen, welchen Umfang das Gesamtmodell haben soll und welche Detailtiefe notwendig ist, um zweckmässig genaue Resultate zu erhalten. Weiter sind die Subsysteme zu definieren, wo nötig und sinnvoll abzugrenzen und die Brücken bzw. Übergaben von Werten festzulegen. Diese Arbeiten sind im Kapitel 2 behandelt.

##### **Modellarchitektur / Konzept des Modellaufbaus**

Die Architektur des Modelles ergibt sich aus der Grösse, Anzahl und den Zusammenhängen der Subsysteme. Wie sich gezeigt hat, sind nicht alle Subsysteme auf allen Typen von Luftfahrtinfrastrukturen von Bedeutung. Dies ist konzeptionell so zu berücksichtigen, dass nur Modellteile, welche für die Analyse tatsächlich gebraucht werden, zur Anwendung kommen bzw. keine unnötiger Aufwand für irrelevante Teilgebiete betrieben wird.

##### **Theoretische Berechnungsmethoden**

Als Grundlage für die Kapazitätsberechnungen und -abschätzungen dienen die in der einschlägigen Literatur hergeleiteten Formeln. Diese sind nicht immer direkt im auszuarbeitenden Modell anwendbar, da sie den lokalen und zeitlichen Begebenheiten nicht mehr entsprechen. Die

Berechnungsmethoden wurden im Kapitel 2 auf die schweizerischen Verhältnisse der 2010er-Jahr adaptiert und wo nötig angepasst.

### **Software für die praktische Modellanwendung**

Da die Arbeit am Ende ein computergestütztes Anwendungsmodell hervorbringen soll, welches von einem breiteren Anwenderkreis genutzt werden kann, stellt sich die Frage nach der passenden Software, auf welcher das Modell laufen soll. Nötig ist ein Programm zur numerischen Datenverarbeitung, -analyse und -simulation sowie grafischen Resultatdarstellung.

Für die Modellierung nötig ist eine imperative Programmierung, da u.a. iterative und zufallsbasierte Algorithmen zur Anwendung kommen. Programme basierend auf Sprachen wie Java, C++ oder z.B. MATLAB eignen sich am besten für die Programmierung, bedingen beim Anwender jedoch das Vorhandensein der spezifischen Software sowie grundlegende Programmierungskenntnisse, um das Modell wenn nötig zu modifizieren.

Als geeignetste Software erweist sich in diesem Fall Excel in Verbindung mit Visual Basic-Programmierung (VBA). Das Programm ist weit verbreitet (Office-Standard) und den meisten Computeranwendern gut bekannt, sodass Anpassungen am Modell vom geübten Benutzer möglich sind. Die notwendigen Algorithmen sind in Excel als VBA-Makros programmierbar.

### **Datengrundlagen als Eingabeparameter**

Für eine Auswertung mit einem Modell sind Eingabeparameter notwendig, welche mit den hinterlegten Formeln zum gewünschten Resultat verrechnet werden. Für die Kapazitätsmodellierung eines Flugplatzes sind zum einen die anlagespezifischen Parameter (Charakteristik) nötig, welche gesammelt und manuell eingegeben werden müssen. Darüber hinaus sind jedoch auch Daten notwendig, welche dem Modellanwender nicht oder nur unter grossem Zeitaufwand zugänglich sind. Darunter fallen etwa detaillierte Angaben und Leistungsdaten verschiedenster Flugzeugtypen oder auch meteorologische Daten. Dem Modell sind daher idealerweise Datenbanken zu hinterlegen, damit die Modellanwendung innerhalb eines nützlichen Zeitrahmens zu brauchbaren Resultaten führt.

#### **3.1.1 Flugzeugdatenbank**

Um die Eignung einer Luftfahrtinfrastruktur zu bestimmen und um die Belegungszeiten und damit die Kapazität einzelner Anlageteile zu berechnen, sind Daten zu den auf dem Platz verkehrenden Flugzeugen nötig. Für eine übersichtliche Modellierung und eine pragmatische Anwendung werden die gängigsten Flugzeugtypen und -grössen in 26 Klassen kategorisiert, welche im Modell dann angewählt werden können. Jeder Kategorie sind die Dimensionen und Leistungsdaten eines typischen Referenzflugzeuges dieser Kategorie zugewiesen, mit welchen das Modell rechnet. Die Namen der Kategorien orientieren sich an der Codierung der ICAO für Flugzeuge für die jeweiligen Attribute, wobei:

- Die erste Stelle (Ziffer 1 - 4) die Codierung der nötigen Pistenlänge für den Flugzeugtyp bezeichnet.
- Die zweite Stelle (Buchstaben A - F) die nötige Pistenbreite bezeichnet.
- Die dritte Stelle (Ziffer 1 - 10) für die Rumpflänge steht, deren Codierung entscheidend dafür ist, was an Feuerwehr und Rettungswesen nötig ist.
- Die vierte Stelle (Kleinbuchstaben a - e, s) der Einteilung in Anfluggeschwindigkeiten entspricht.

Tabelle 11 Kombinierte Flugzeug-Codierung nach Kategorisierungsraster der ICAO

Längen-Code	Referenzstartstrecke	Breiten-Code	Max. Spannweite	Max. Radstandbreite	Rescue-Code	max. Flugzeuglänge	Anflug-Code	Anfluggeschwindigkeit
	m		m	m		m		kn
1	0 - 799	A	0 - 14.99	0 - 4.49	1	0 - 8.99	s	< 70
2	800 - 1199	B	15 - 23.99	4.50 - 5.99	2	09.11.1999	a	70 - 90
3	1200 - 1799	C	24 - 35.99	6.00 - 8.99	3	12 - 17.99	b	91 - 120
4	> 1800	D	36 - 51.99	9.00 - 13.99	4	18 - 23.99	c	121 - 140
		E	52 - 64.99	9.00 - 13.99	5	24 - 27.99	d	141 - 165
		F	65 - 79.99	14.00 - 15.99	6	28 - 38.99	e	> 165
					7	39 - 48.99		
					8	49 - 60.99		
					9	61 - 75.99		
					10	76 - 99.99		

Quelle: Eigene Darstellung

Die Codierung und Auflistung der Flugzeuge sind im Excel-File des Kapazitätsmodells im Tabellenblatt Flugzeugklassifizierung hinterlegt. Die Angaben darin sind hauptsächlich Herstellerangaben der Flugzeughersteller oder direkt aus den Handbüchern des konkreten Typs entnommen.

### 3.1.2 Meteorologische Daten

Daten zu Regentagen, Schneetagen, Tage mit reduzierter Sicht sowie die Berechnung der Dämmerungszeiten werden benötigt, um zu kalkulieren, wie viele Betriebstage und Betriebs-

stunden auf eine Anlage je nach Ausstattung möglich. Anhand von konkreten Temperatur-, Wind- und Luftdruckdaten wird zudem die Startstrecke und das Steigvermögen eines Flugzeuges bzw. die Differenz zur Referenzstartstrecke bei Standardbedingungen berechnet.

Diese Daten werden in der Schweiz vom Bundesamt für Meteorologie u.a. an Flughafenstandorten erfasst und in langjährigen Messreihen zusammengefasst. Für das Modell sind die Daten zu Dämmerungszeiten, Temperatur, Witterung, Winde und Höhenlage für sechs repräsentative Standorte (Bern, Genf, Lugano, Sion, St.Gallen, Zürich) über ein Zeitraum von 20 Jahren (1990 - 2010) in das Excel-File übertragen und in den Tabellenblätter mit den Stadtnamen aufbereitet worden.

### 3.2 Modellkonzept

In der Systemanalyse hat sich gezeigt, dass einige Subsysteme nur unter gewissen Umständen einen Einfluss auf die Kapazität einer Luftfahrtinfrastruktur ausüben. Dies betrifft v.a. den landseitigen Teil einer Anlage, wenn diese Passagierverkehr abwickeln können soll. Auf die Konzeption des Modelles wirkt sich dies dahingehend aus, dass gewisse Funktionen zur Kapazitätsberechnung nur aktiv werden sollen, wenn diese bedingenden Umstände gegeben sind.

Der konzeptionelle Aufbau des Kapazitätsmodells ist grafisch in Anhang B-1 aufbereitet. Die Illustration dient dem Verständnis der komplexen Zusammenhänge der verschiedenen Teile des Modells.

Betrachtet man die funktional wichtigen Beziehungen auf die Kapazitäten einer Luftfahrtinfrastruktur, d.h. welche bei der Berechnung einen relevanten Einfluss ausüben, lässt sich das Kapazitätsmodells lässt in 3 Teile gliedern, welche im Folgenden genauer erläutert sind:

- Modellteil Charakteristik / Eignung
- Modellteil Kapazität Luftseitig
- Modellteil Kapazität Landseitig

In den Anhängen B-2, B-3 und B-4 sind die einzelnen Modellteile im Detail illustriert. Die verschiedenen Einträge sind wie folgt zu interpretieren:

Abbildung 16      Ausschnitt der grafischen Modelldarstellung (siehe Anhänge B-2, B-3 und B-4)

Start-/Landebahn (Runway)	
Belag [befestigt (Beton, Asphalt)]	
Belagsfaktor trocken 1.0 nass 0.6	
Erlaubter Raddruck? {X.X mPa}	
0.0 - 0.5 Belagscode Z	
0.6 - 1.0 Belagscode Y	
1.1 - 1.5 Belagscode X	
1.6 - 9.9 Belagscode W	
[unbefestigt (Gras, Schotter)]	
Belagsfaktor trocken 0.75 nass 0.5	
0.5 Belagscode Z	
Pistenlänge {XXXX m}	
0000 - 0799 Codenummer 1	
0800 - 1199 Codenummer 2	
1200 - 1799 Codenummer 3	

Legende	
Schrift	Bedeutung
Schwarz	Titel / Frage, die im Modell erscheint
[Blau]	diskrete Auswahl
{Rot}	Manuell einzugebender Wert mit gegebenem Format und Einheit
Rot	Wertbereiche für Modellberechnung
Grün	Modellgenerierte Werte / Codierung

Quelle: Eigene Darstellung

### 3.2.1 Modellteil Charakteristik / Eignung

*Die grafische Modelldarstellung finden Sie in Anhang B-2*

In diesem Teil findet anhand der Dimensionierung der Start- und Landebahn sowie der vorhandenen Sicherheitseinrichtungen die Eignungsprüfung einer Luftfahrtinfrastruktur bezüglich Flugzeuggrössen statt. Weiter werden die möglichen Betriebstage und Betriebsstunden der Anlage berechnet. Diese ergibt sich aus der Ausstattung der Start- und Landebahn (Befestigung der Piste, ILS, Befeuerung) sowie den Umweltbedingungen bestehend aus den meteorologischen Fakten sowie den betriebsrechtlichen Festlegungen in der nationalen, kantonalen und kommunalen Rechtssetzung.

Der Modellteil Charakteristik / Eignung ist für alle Flughäfen und Flugplätze zwingend notwendig.

### 3.2.2 Modellteil Kapazität Luftseitig

*Die grafische Modelldarstellung finden Sie in Anhang B-3*

Der Modellteil berechnet die Kapazitäten der Subsysteme, welche von allen Luftfahrzeugen benutzt und benötigt werden. Er ist daher auch für alle Anlagen zwingend auszufüllen. Die Einheit der Kapazität Luftseitig ist Flugbewegungen pro Stunde.

Der Luftraum, welcher sich über und um eine Luftfahrtinfrastruktur befindet, kann nur dann kapazitätsrelevant werden, wenn er kontrolliert ist. Dieses Subsystem ist deshalb nur aktiv und fliesst in die Kapazitätsabschätzung ein, wenn der Luftraum von einer Flugsicherung überwacht und organisiert wird.

Der Teil Anflug berechnet die Kapazität des Subsystems Endanflug anhand der Anteile der auf der Anlage verkehrenden Flugzeuge und der daraus vorgegebenen Separationen und Anfluggeschwindigkeiten. Wahrscheinlichkeitstheoretisch werden Anflugszenarien berechnet und die durchschnittliche Belegungszeit und daraus folgend die Kapazität berechnet. Dasselbe Prinzip gilt für den Teil Abflug, wobei dieser nur dann kapazitätsmässig relevant werden kann, wenn eine Abflugroute ähnlich dem Endanflug vorgegeben ist.

Die Kapazität von Piste + Rollwegen wird kombiniert modelliert, da die Wechselwirkungen zwischen den beiden Teilen sehr gross sind. Im Modell werden Start- und Landevorgänge einzeln berechnet und die Wahrscheinlichkeit von kapazitätsneutralen Bewegungen evaluiert. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Belegungszeit und eine stündliche Kapazität von Piste und Rollwegen.

Der Bereich Vorfeld ist unterteilt in das Vorfeld als Manövrier- und Stellfläche und die Abfertigung. Im Teil Vorfeld ist dessen Grösse entscheidend für die Bewegungsfreiheit von Flugzeugen. Ist das Kreuzen zweier Maschinen nicht unabhängig möglich, funktioniert das Vorfeld als Rollweg.

Die Abfertigung ist wie der ganze Modellteil Kapazität Luftseitig unabhängig von der Funktion bzw. dem Zweck der Flugzeuge und bezieht sich daher nur auf die Betankung. Abfertigungen im Zusammenhang mit Passagierflügen sind im Modellteil Kapazität Landseitig zu finden.

Aus allen Teilkapazitäten ist die jeweils kleinste die limitierende Grösse für die Gesamtkapazität der Luftseite. Multipliziert man die Kapazitäten pro Stunde mit der Anzahl Betriebsstunden aus dem Modellteil Charakteristik / Eignung erhält man die theoretische Jahreskapazität, wenn alle Betriebsstunden ausgenutzt würden.

### 3.2.3 Modellteil Kapazität Landseitig

*Die grafische Modelldarstellung finden Sie in Anhang B-4*

Die landseitige Kapazität ist gemäss Systemanalyse nur für Luftfahrtinfrastruktur relevant, welche Passagierverkehr inkl. Geschäftsreiseverkehr (Business Aviation) abwickeln. Der Modellteil ist daher nur für Flughäfen im Sinne des LFG Art. 2 auszufüllen. Die Einheit ist grundsätzlich Passagiere / h (PAX/h) bzw. Passagierflugzeuge / h (PAXFZ/h), wobei jeweils die Anzahl Sitzplätze des grössten Passagierflugzeuges auf einem Flughafen relevant ist. Als Korrekturfaktor, dass auf einer Anlage nie alle verkehrenden Flugzeuge der grössten Kategorie angehören, wird als Standardwert 0,5 angenommen. Ist also z.B. ein Airbus A330 mit max. 350 Plätzen das grösste Passagierflugzeug, entspricht das Kapazitätsverhältnis:  $175 \text{ PAX/h} = 1 \text{ PAXFZ/h}$ .

Die Kapazität der landseitigen Erschliessung ergibt sich aus der Summe von ÖV- und MIV-Erschliessung. Die Kapazität ÖV wiederum ist die Summe der Kapazitäten von Bahn- und Busanschlüssen, die Kapazität MIV die Summe der Kapazitäten der Vorfahrt und der Parkierung.

Beim Terminal wird unterschieden zwischen dem Teil Abflug und Ankunft, wobei zu erwähnen ist, dass die Gesamtkapazität des Terminals der Summe der beiden Teilkapazitäten entspricht. Beim Abflug bildet die geringste Kapazität der einzelnen Anlageteile wie Durchgänge oder Check-In die relevante Kapazität.

In den Teilen Flugsteig und Vorfeld im landseitigen Bereich dreht sich die Kapazität um die Anzahl Passagiere bzw. Passagierflugzeuge, welche bei den benötigten Zeiten für Boarding, Kabinenreinigung etc. abgefertigt werden können.

Wie bei der Luftseite ist die jeweils kleinste Teilkapazität die limitierende Grösse für die Gesamtkapazität der Landseite. Multipliziert man die Kapazität in PAX bzw. PAXFZ pro Stunde mit der Anzahl Betriebsstunden aus dem Modellteil Charakteristik / Eignung, erhält man die theoretische Jahreskapazität, welche eine Anlage an Passagieren und Passagierflugzeugen abfertigen könnte.

*Eine detaillierte Bedienungsanleitung zum Kapazitätsmodell ist in Anhang A zu finden.*



## 4 Untersuchung von Fallbeispielen

In den Fallbeispielen soll die Anwendbarkeit und Validität des Modell geprüft. Gleichzeitig sollen aber auch die Kapazität der Luftfahrtinfrastrukturen evaluiert und deren Auslastung und zukünftiges Potenzial abgeschätzt werden.

### Begriff der Auslastung

Wie bei allen Infrastrukturen ist auch bei Flugplätzen die Zeitdauer entscheidend, über welche die Auslastung betrachtet wird. Üblicherweise wird diese für die Spitzenstunde, einen Spitzentag oder über ein ganzes Jahr bestimmt. In der Beurteilung der Kapazitätsabschätzung und der Reserven ist daher wichtig zu betonen, welche Art der Auslastung berechnet wird.

Im nachfolgenden Kapitel werden zum einen die Stunden- und Tageskapazitäten betrachtet, da im Luftverkehr Häufungen in Spitzenstunden und -tagen (z.B. Ferienbeginn auf Passagierflughäfen, schöne Wochenenden für Sichtflüge und Privataviatik auf Kleinflugplätzen) häufig auftreten. Zum andern interessiert aber auch die Auslastung über das Jahr betrachtet um daraus abzuleiten, wo mit gezieltem Verkehrsmanagement noch Reserven vorhanden wären.

Verschiedene empirische Untersuchungen wie z.B. (Intraplan Consult 2003) evaluierten den Anteil der Spitzenstunden bzw. des Spitzentages an kleinen bis mittelgrossen Flughäfen mit Passagierverkehr in Mitteleuropa in Abhängigkeit zum Jahresaufkommen. Für Flugplätze ohne Passagieraufkommen kann der Effekt der Häufung noch etwas ausgeprägter sein. In Anlehnung an (Intraplan Consult 2003) wird für die nachfolgende Betrachtung mit einem Anteil an den Jahresbewegungen von 0,06% für die Spitzenstunde und 0,4% für den Spitzentag gerechnet. Auf die Spitzenstunde entfällt damit ein Anteil von 15% des Spitzentages, was mit anderen Verkehrsträgern vergleichbar ist.

Die Auslastung wird für die Spitzenstunden, die Spitzentage und im Jahresschnitt bestimmt.

### 4.1 Flughafen Bern-Belp

Die Luftfahrtinfrastruktur Bern-Belp nennt sich Flughafen, obwohl sie gemäss SIL kein Landesflughafen sondern eine Regionalflugplatz ist. Sie liegt 6km südöstlich der Hauptstadt und wurde bereits 1929 eröffnet. Betrieben wird der Flughafen von der Alpar Flug- und Flugplatzgesellschaft AG. Er umfasst eine 1730m lange und 30m breite Asphaltpiste sowie eine 650m lange Graspiste für den Segelflugausbetrieb rund 150m daneben. Die beiden Start- und Landebahn dürfen nicht unabhängig voneinander betrieben werden.

Abbildung 17      Luftbild des Flughafens Bern-Belp



Quelle: Google Earth

#### 4.1.1 Heutige Nutzung

Der Flughafen Bern-Belp wird von allen Arten der Luftfahrt genutzt. Linien- und Charterverkehr, Business Aviation, Staats- und Arbeitsflüge, Schulungen, kommerzielle und private Kleinaviatik bis hin zu Segelflügen ist alles in relevanten Anteilen vorhanden. 2012 zählte man 59'605 Flugbewegungen, bis 2008 waren es durchschnittlich rund 50'000 pro Jahr. Dies ist u.a. auf das verstärkte Linienflugangebot der Airline Skywork ab Bern-Belp sowie das neu installierte ILS (2008) zurückzuführen.

Mit rund 18'000 Flugbewegungen macht der Linien- und Charterverkehr rund 30% der Flugbewegungen aus. Knapp 8% (4800 Bewegungen im Jahr) sind in die Business Aviation inkl. Staatsflüge im Zusammenhang mit Bundesbern einzureihen. Total ergibt dies einen IFR-Anteil von 38%, Tendenz steigend. Die Segelfliegerei registrierte 2012 2'250 Bewegungen und einen Anteil von 4%, der Helikopterverkehr 15'222 Starts und Landungen, was 25% aller Flugbewegungen entspricht. Das restliche Drittel setzt sich zusammen aus kommerzieller (Ausbildungs-, Rundflüge) und privater Kleinaviatik.

#### 4.1.2 Potenzial

In der Hauptstadtregion betrachtet man den Flughafen Bern-Belp als einen wichtigen Vorteil des Wirtschaftsstandorts und ist grundsätzlich an einem weiteren Angebotsausbau interessiert, was sich etwa an der Unterstützung für den Infrastrukturausbau der Anlage in der Abstimmung vom 26. November 2006 (63,7% Zustimmung) oder der Verbesserung der landseitigen Anbindung (Busangebot, Bewilligung Ausbau Parkplätze) zeigte.

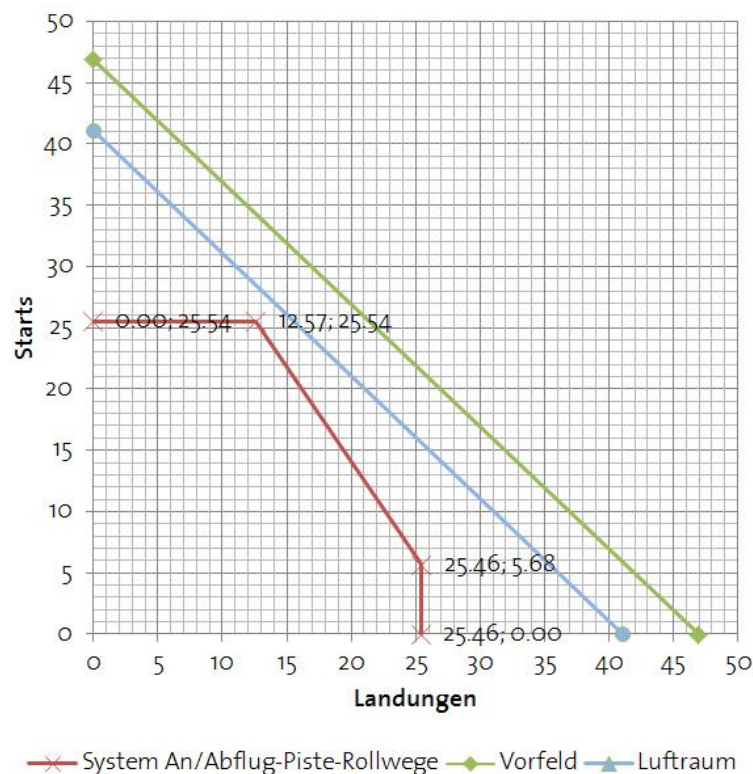
Der Flughafen weist einen ausserordentlich stark durchmischten Flugzeugmix auf, welcher sich in den nächsten Jahren akzentuieren könnte, wenn der Linienflug- und Charterbetrieb sogar noch ausgebaut werden sollte.

### Modellberechnung Luftseitig

Die Auswertung mit dem Modell zeigt, dass der Flughafen Bern-Belp für Flugzeuge bis zur Grösse einer Fokker 100 oder eines Airbus A319 geeignet ist. Diese Maschinen verkehren heute bereits ab Bern-Belp, ein weiterer Ausbau durch grössere Flugzeuge ist demnach mit der heutigen Infrastruktur nicht möglich.

Betrachtet man die Kapazität der Anlage, so ist das System Anflug-Piste-Rollwege-Abflug der beschränkende Faktor. Es erlaubt 25,5 Landungen oder 24,5 Starts pro Stunde mit einem Maximum von 37 Bewegungen pro Stunde bei optimaler Abfolge. Der Luftraum könnte rund 10% mehr bewältigen (41 Bewegungen pro Stunde), das Vorfeld gar bis 47 Bewegungen pro Stunde, was 27% Mehrleistung entspräche (siehe Abbildung 18).

Abbildung 18 Modellauswertung der Kapazität Luftseitig Flughafen Bern-Belp



Quelle: Eigene Darstellung

Dank Befeuerung, ILS und beschränkten Einschränkungen für Feiertage hat der Flughafen grundsätzlich 365 Betriebstage und rund 5'400 Betriebsstunden. Würden diese konsequent genutzt, ergäbe sich eine Jahreskapazität von 200'000 Bewegungen (entspricht dem Aufkommen am Flughafen Genf mit 193'000 Flugbewegungen 2012). Der SIL beziffert die Kapazität heute auf 75'000 Bewegungen pro Jahr.

### **Modellberechnung Landseitig**

Der Passagierverkehr nimmt in Bern-Belp seit einigen Jahren einen immer grösseren Anteil des Gesamtaufkommens ein. Die landseitige Infrastruktur sowie der Flugsteig weisen eine Kapazität von 4,7 Passagiermaschinen pro Stunde auf. Hierbei limitiert die landseitige Erschliessung die Gesamtleistungsfähigkeit. Im Modell zeigt sich jedoch, dass der Abflug mit 1 Grossflugzeug pro Stunde eine tiefere Kapazität als die Ankunft mit 4 pro Stunde aufweist.

Mit dem heutigen Flugplan von Bern-Belp werden in der Spitzenstunde am Morgen bis 6 Maschinen pro Stunde abgefertigt. Mutmasslich ist dies nur möglich, da viele dieser Flüge mit kleinen Dornier 328 (max. 31 Plätze) oder nicht ausgebucht durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang muss jedoch auch die Berechnung der Leistungsfähigkeit des Check-Ins hinterfragt werden, welche dem Modell zu Grunde liegt. Insgesamt sind gemäss Modellberechnung mit der heutigen Infrastruktur rund 27'000 Passagierflugzeugbewegungen der grössten Kategorien im Jahr zu bewältigen.

#### **4.1.3 Fazit**

Der Flughafen weist heute eine Durchschnittsauslastung von 30% über Jahr auf. Wichtiger als die Gesamtkapazität resp. die Durchschnittsauslastung sind die kapazitätskritischen Spitzenstunden und -tage. Anlehnend an die Analysen von (Intraplan Consult 2003) wird in Bern-Belp an den Spitzentagen ein Aufkommen von rund 240 Bewegungen erreicht. Die Spitzenstunde mit einem Anteil von 15% kommt auf 36 Flugbewegungen.

Es wird ersichtlich, dass der Flughafen mit den heutigen Eigenschaften in den Spitzenstunden an seine Kapazitätsgrenze (37 Bewegungen) kommt. Reserven bestehen fast nur noch ausserhalb der Spitzenstunden und -tage.

Für einen Flugplatz dieser Grösse unüblich ist das Fehlen eines durchgehenden Parallelrollwegs zur Piste. Dies schränkt die Leistungsfähigkeit ein, da die Start- und Landebahn als Rollstrecke zur Startposition genutzt werden muss. Durch die Erweiterung des Rollweges bis an die beiden Pistenenden könnte die Kapazität des Flughafens um 6% gesteigert werden. Würden dazu Schnellabrollwege gebaut, würde die Kapazität gar um bis zu 13% erhöht werden können, was in den Spitzenzeiten zu einer spürbaren Entschärfung der Engpässe führen würde.

Landseitig ist der Kapazität des Check-In sowie des Flugsteigs (Grösse der Wartehalle) Beachtung zu schenken, da diese heute in den Spitzenstunden an ihrer Leistungsgrenze funktionieren.

## 4.2 Flugplatz St.Gallen-Altenrhein

Der Flugplatz St.Gallen-Altenrhein liegt an der Rheinmündung am Bodensee direkt an der österreichisch-schweizerischen Grenze. 1926 eröffnet, ist er die älteste Luftfahrtinfrastruktur der Deutschschweiz nach dem ehemaligen Militärflugfeld Thun. Die heutige Flugplatzbetreiberin „Peoples Business Airport AG“ ist im Privatbesitz und betreibt eine eigene Fluglinie, welche Linienvflüge nach Wien und Charterflüge nach Italien anbietet. Die Anlage verfügt über eine 1500m lange und 30m breite Asphaltpiste sowie 100m daneben über eine Graspiste mit 600m Länge, welche vorwiegend für den Segelflugaetrieb genutzt wird.

Abbildung 19      Luftbild des Flugplatzes St.Gallen-Altenrhein



Quelle: Google Earth

### 4.2.1 Heutige Nutzung

Auf St.Gallen-Altenrhein wurden 2012 29'522 Flugbewegungen registriert. Mit 3'146 Starts und Landungen machen die Linienvflüge rund 11%, Schulungsvflüge 28% (8'187 Bewegungen) und die Business Aviation 20% (6'131 Bewegungen) aus. Die übrige allgemeine Luftfahrt macht 41% aller Flugbewegungen aus. 1% davon sind Segelflugazeuge (380 Bewegungen) und 11% Helikopter (3'252 Bewegungen).

Die Nutzung ist ähnlich wie in Bern-Belp somit stark durchmischt, was sich auch in Flugzeugmix widerspiegelt. Kleine Propellermaschinen machen rund 60% aus, kleine bis mittelgrosse Businessjets ca. 20%, grosse Propellerflugzeuge ca. 12% und grosse Passagierjets rund 8%.



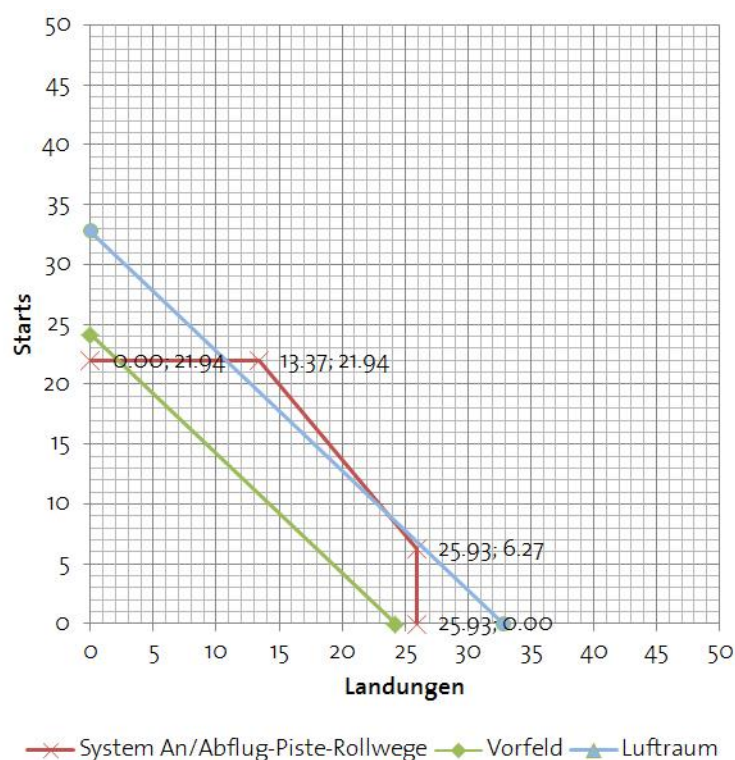
#### 4.2.2 Potenzial

Die Flugplatzbetreiberin von St.Gallen-Altenrhein möchte gemäss ihrer Vision ihre Position als Tor zur Welt für den Geschäftsreiseverkehr im Rheintal und die Anbindung nach Wien stärken (Peoples 2013). Im Geschäftsreiseverkehr hat der Flugplatz mit Zürich-Kloten und insbesondere Friedrichshafen Konkurrenz in der Region. Der Linienverkehr nach Wien ist nach Auskunft des Flugplatzleiters Michael Felder zwar rentabel, ein weiterer Ausbau der Aktivitäten ist jedoch in naher Zukunft unwahrscheinlich, weil sich Österreich gegen einen infrastrukturellen und betrieblichen Ausbau wehrt. So wurde der Bau eines ILS auf Piste 10 mit Anflug über Vorarlberg schubladisiert und im SIL festgesetzt, dass St.Gallen-Altenrhein Flugfeldstatus behält und keine Konzessionierung mit Betriebsbewilligung als Flughafen für öffentlichen Flugverkehr erhält.

#### Modellberechnung Luftseitig

Unabhängig von den politisch-rechtlichen Aspekten zeigt die Auswertung der Parameter, dass der Flugplatz für Flugzeuge bis zur Grösse eines Bombardier CRJ oder Embraer 145 geeignet ist. Diese Grössenkategorien verkehren heute bereits regelmässig ab St.Gallen-Altenrhein. Der nach Wien eingesetzte Embraer 170 darf von seiner Grösse her nur unter bestimmten Bedingungen (z.B. nicht mit maximalem Startgewicht) starten.

Abbildung 20 Modellauswertung der Kapazität Luftseitig Flugplatz St.Gallen-Altenrhein



Quelle: Eigene Darstellung

Die Kapazität Luftseitig wird begrenzt durch das Vorfeld mit der Kapazität der Betankungsanlagen als limitierendem Faktor. Beim vorherrschenden Flugzeugmix erreichen die Zapfsäulen und der Tankwagen eine Abfertigungsrate von rund 24 Flugzeugen pro Stunde. Das System Anflug-Piste-Rollwege-Abflug erreicht eine 46% höhere Kapazität mit maximal 26 Landungen oder 22 Starts und einem Total von 35,3 Bewegungen pro Stunde bei optimaler Betriebsabfolge. Der Luftraum bzw. die zuständige Flugsicherung kann rund 32 Bewegungen pro Stunde verarbeiten (Sektorkapazität). Sie ermöglicht eine rund 35% grössere Leistungsfähigkeit als das Vorfeld.

Trotz starken Einschränkungen der Betriebszeiten mit einer 90-minütigen Mittagspause und Betriebsschluss um 20.00 Uhr ermöglichen die Befeuerung und das ILS gegen 4'000 Betriebsstunden im Jahr. Würden alle Betriebsstunden optimal genutzt, wären um die 95'000 Flugbewegungen pro Jahr möglich (theoretische Maximalkapazität). Der SIL beziffert die Kapazität heute auf 36'500 Bewegungen pro Jahr.

### **Modellberechnung Landseitig**

Ab dem Flugplatz St.Gallen-Altenrhein verkehren seit über 20 Jahren Linienflüge nach Wien. Kapazitätsbestimmend ist bei der Passagierabfertigung der Flugsteig bzw. die Grösse der Warthalle in diesem. Mit knapp 90m<sup>2</sup> können unter Einhaltung eines Mindestkomforts 0,6 Passagierflugzeuge abgefertigt werden. Zusammen mit der Ankunft erreicht die landseitige Kapazität 2 Passagiermaschinenbewegungen pro Stunde, was im Jahr knapp 8'000 Bewegungen bzw. 4'000 Flugzeugen entspricht. Die Erschliessung des Flugplatzes würde für rund die doppelte Anzahl Bewegungen (ca. 18'000) ausreichen und ist damit nicht kapazitätsbestimmend.

### **4.2.3 Fazit**

Über die gesamte Betriebsdauer ist der Flugplatz St.Gallen-Altenrhein heute zu 27% ausgelastet. An Spitzentagen wären gemäss (Intraplan Consult 2003) rund 120 Bewegungen zu erwarten, was in der Spitzenstunde etwa 18 Bewegungen ergibt. In diesen Stunden wäre die Anlage zu 64% ausgelastet. Nach Auskunft von Flugplatzleiter Michael Felder sind diese Umrechnungsfaktoren in St.Gallen-Altenrhein nicht anwendbar, da die Spitzentage Ende Januar während des WEF in Davos höhere Werte von gegen 300 Bewegungen erreichen. Während diesen ausserordentlichen Spitzen wird der Flugplatz an seiner Leistungsgrenze betrieben.

Der Flugplatz-St.Gallen Altenrhein weist neben den Spitzentagen noch theoretische Kapazitätsreserven von rund 70'000 Flugbewegungen auf. Aufgrund seiner Lage und der infrastrukturellen Ausstattung wäre eine verstärkte Nutzung als Business Airport, auch als Entlastung von Zürich-Kloten grundsätzlich möglich und prüfenswert. Für den Ausbau von Linienverkehr ab Altenrhein ist das Potenzial als gering einzuschätzen, da, neben der Antipathie aus Österreich zu diesem Vorhaben, auch ein Bestehen neben Zürich-Kloten als Passagierflughafen wirtschaftlich schwierig sein dürfte.

### 4.3 Flugplatz Birrfeld

Der Flugplatz Birrfeld ist ein Regionalflugplatz in der Gemeinde Lupfig nahe Brugg im Kanton Aargau. Von regionalen Segelfluggruppen gegründet, wurde der Flugplatz 1937 in Betrieb genommen. Er umfasst eine 727m lange Hartbelagpiste und eine ebenso lange Graspiste rund 20m daneben. 6 Hangar- sowie das Betriebsgebäude mit Restaurant sind um das Vorfeld angeordnet.

Abbildung 21      Luftbild des Flugplatzes Birrfeld



Quelle: Google Earth

#### 4.3.1 Heutige Nutzung

Der Flugplatz dient primär der Ausbildungs- und Freizeitfliegerei von Motor- und Segelfluggpiloten im zentralen Mittelland. 2012 wurden 68'963 Flugbewegungen gezählt, was gegenüber den Vorjahren (2011: 76'254) eine deutliche Reduktion darstellt. Der gewerbsmässige Verkehr ist mit einem Anteil von gerade mal 2% (1'354 Flugbewegungen) ebenso wenig von Bedeutung wie die 670 Bewegungen (1%) von Helikoptern. Die Segelfliegerei nimmt in Birrfeld, wie weltweit, seit Jahren ab. Mit 6'911 Bewegungen macht sie trotzdem noch 10% aller Bewegungen auf dem Platz aus.

#### 4.3.2 Potenzial

Der Flugplatz Birrfeld ist im Grossraum Zürich, neben dem Flughafen Zürich-Kloten, die einzige Luftfahrtinfrastruktur für grössere Maschinen der Privataviatik (genügend lange Hartbelagpiste).



te). Der Druck auf diese Art der Fliegerei auf Grossflughäfen nimmt seit Jahren zu und wird mit den knapper werdenden Kapazitätsreserven in Zürich-Kloten je länger je mehr verdrängt, da die Slots für rentablere Passagierflugzeuge verwendet werden wollen. Es muss damit gerechnet werden, dass sich in Zukunft auch Organisationen wie Flugschulen, Rundflughanbieter oder Rettungsdienste vom Flughafen Zürich auf andere Flugplätze verlagern werden.

### **Modellberechnung Luftseitig**

Die Modellresultate für den Flugplatz Birrfeld zeigen, dass dieser mit der heutigen Konfiguration für Flugzeuge bis zu einer Grösse einer Dornier 228 oder Pilatus PC-12 geeignet ist. Die Kapazität Luftseitig wird begrenzt durch die Kapazität des Systems Anflug-Piste-Rollwege-Abflug. Auf diesem sind unter Einhaltung der einschlägigen Abstandsvorschriften 30 Starts oder 23 Landungen pro Stunde möglich. Unter optimaler Ausnützung aller Lücken für kapazitätsneutrale Starts und Landungen wären bis zu 40 Bewegungen pro Stunde möglich (siehe Anhang C-4).

Das Vorfeld mit den Abfertigungseinrichtungen könnte rund 20% mehr Flugzeuge der erlaubten Kategorien aufnehmen (Kapazität von rund 49 Bewegungen pro Stunde). Nicht direkt kapazitätsbeeinflussend ist im Birrfeld der Luftraum, da dieser nicht kontrolliert ist und kein Instrumentenflug auf den Flugplatz existiert. Indirekt sind aber Auswirkungen der nahe an die Anlage reichenden Lufträume der TMA Zürich-Kloten zu spüren. Der Luftraum ist im Osten ab einer Höhe von 3000ft (rund 1'000m.ü.M.) und im Süden ab 4'500ft (rund 1'500m.ü.M.) kontrolliert bzw. nur mit Erlaubnis der Flugsicherung befliegbare (Luftraum C, TMA Zürich 1/4C). Dies schränkt die Flexibilität der Anflüge und Abflüge auf Piste 26 bzw. von Piste 08 ein. Dieser indirekte Einfluss auf die Kapazität ist im Modell nicht quantifizierbar, ist aber mit hoher Wahrscheinlichkeit zu gering, um die Kapazität der Gesamtanlage zu beeinflussen.

Der Flugplatz Birrfeld weist, unter den gegebenen Umweltbedingungen Meteorologie und Betriebszeiten (Einschränkung morgens zwischen 06.00 Uhr und 08.00 Uhr bzw. 10.00 Uhr an Sonn- und Feiertagen), rund 3'500 Betriebsstunden pro Jahr auf. Werden diese Betriebsstunden konsequent genutzt, erreicht der Flugplatz Birrfeld eine theoretische Kapazität von rund 140'000 Flugbewegungen pro Jahr. Der SIL beziffert die Kapazität heute auf 90'000 Bewegungen pro Jahr.

### **Modellberechnung Landseitig**

Die landseitige Infrastruktur des Flugplatzes Birrfeld wurde nicht für die Abfertigung von Passagierflügen oder Geschäftsflugzeugen ausgelegt. Die vorhandenen Einrichtungen würden trotzdem ausreichen, um solche Flüge im Umfang von knapp 2 Maschinen pro Stunde (3,75 mögliche Bewegungen/h) oder 13'000 Bewegungen im Jahr abzufertigen. Limitierend ist dabei der Abflug bestehend aus „Terminal“ und „Flugsteig“, da Kontrollen und Gepäcktransport von Hand gemacht werden müssen. Die Erschliessung weist in Birrfeld eine sehr hohe Kapazität auf, bedingt durch die grosse Anzahl von Parkplätzen (400). Diese werden öfters von den vielen Besuchern belegt, was aber angesichts der grossen Überkapazität nicht ins Gewicht fällt. Die Anbindung des Flugplatzes mit einer Buslinie an die Bahnhöfe der Umgebung wurde vor eini-

gen Jahren geprüft, wird aber nach Aussage des Flugplatzleiters Roger Trüb erst bei einem verstärkten Verkehrs- und Besucheraufkommen wieder zur Diskussion stehen.

#### 4.3.3 Fazit

Der Flugplatz Birrfeld ist heute (2012) über die gesamte Betriebszeit zu 50% ausgelastet, was eine hohe Durchschnittsauslastung ist. Gemäss den Anteilschätzungen nach (Intraplan Consult 2003) entfallen rund 276 Flugbewegungen auf die Spitzentage und 41,4 Bewegungen auf die Spitzenstunden. Bei einer berechneten Stundenkapazität von 40 Bewegungen kann gesagt werden, dass die Anlage in den Hauptzeiten der Spitzentage, vornehmlich an schönen Wochenenden, an ihrer Kapazitätsgrenze betrieben wird. Dass eine Luftfahrtinfrastruktur wie Birrfeld auch über ihrer Kapazitätsgrenze betrieben werden kann, ist dank einer engeren Staffe- lung der Flugzeuge durch die Piloten im Sichtflug möglich. Insbesondere in den Spitzenstunden kann dies auf unkontrollierten Flugplätzen vorkommen. Die Kapazitätsreserven von rund 70'000 Bewegungen pro Jahr liegen unter der Woche und/oder in wettermässig durchzoge- nen, aber für den Sichtflug noch ausreichenden Betriebszeiten.

Der Flugplatz Birrfeld weist mit seiner Lage zentral im Mittelland und seiner Infrastruktur wich- tige Voraussetzungen auf, um in Zukunft ein bedeutender Standort für die General Aviation mit grösseren Maschinen und allenfalls sogar Business Aviation zu bilden, auch wenn für letz- teres Ausbauten v.a. der Piste (Länge) nötig wären. In der Entwicklung des Flugplatzes sollten die Kapazitätsreserven aber genutzt werden.

## 4.4 Flugplatz Buttwil

Der Flugplatz Buttwil im aargauischen Freiamt ist gemäss SIL ein Flugfeld (kleinste Flugplatzkategorie), wurde 1968 von den Gebrüdern Eichenberger errichtet und ist bis heute im Familienbesitz. Die Anlage liegt auf einem Hügelpateau oberhalb der Gemeinde Buttwil bei Muri AG und verfügt über eine 675m lange Graspiste sowie ein kleines Vorfeld mit zwei Hangars.

Abbildung 22      Luftbild des Flugplatzes Buttwil



Quelle: Google Earth

### 4.4.1 Heutige Nutzung

Die Besitzerfamilie betreibt seit der Inbetriebnahme eine eigene Motor- und Helikopterflugschule auf dem Flugplatz Buttwil. Neben dem Ausbildungsbetrieb sind zudem mehrere Segelfluggruppen auf der Anlage aktiv. Nach einem starken Einbruch in Folge des Swissair-Groundings 2001 haben sich die Zahlen der Flugschüler und damit der Flugbewegungen auf dem Flugplatz wieder etwas erholt. 2012 wurden insgesamt 20'921 Flugbewegungen registriert, wovon 4386 oder 21% auf den Helikopterbetrieb entfielen. 1'039 Bewegungen wurden von Segelfliegern registriert, was einem Anteil von 5% entspricht. Die übrigen 74% werden mit Motorflächenflugzeugen absolviert.

### 4.4.2 Potenzial

Der Flugplatz Buttwil ist einer von mehreren Flugfeldern im Grossraum Zürich. Durch seine Lage auf einem Plateau des Lindbergs über dem Reusstal und der im mittelländischen Vergleich gering besiedelten Umgebung stört der Flugbetrieb auf und um die Anlage (Volten flie-

gen) kaum. Er hat nur minimalste Einschränkungen in den Betriebszeiten (Geschlossen an Weihnachten und an drei Feiertagen Betrieb erst ab 10 Uhr)

### **Modellberechnung Luftseitig**

Der Flugplatz Buttwil ist in seiner heutigen Konfiguration nur für Segelflugzeuge und die kleinste Motorflugzeugkategorie, einmotorige Kleinflugzeuge wie Cessna 172/182 oder Piper PA-28 geeignet. Kapazitätslimitierend wirkt das System Anflug-Piste-Rollwege-Abflug, welches um die 18 Starts und 29 Landungen pro Stunde zulässt. Dank kapazitätsneutralen Starts und Landungen könnte eine Stundenleistung bis 35 Bewegungen erreicht werden. Das Vorfeld und die Abfertigung weisen eine rund 25% höhere Kapazität auf und könnten 43,5 Bewegungen bewältigen. Ähnlich wie auf dem Flugplatz Birrfeld ist der Luftraum Buttwil zwar nicht kontrolliert, aber durch die An- und Abflugsektoren von Zürich-Kloten und dessen TMA-Lufträumen gegen Norden und Nordosten hin teilweise eingeschränkt. Eine entscheidende Kapazitätseinschränkung dadurch ist jedoch fast sicher auszuschliessen.

Der Flugplatz Buttwil kommt trotz Graspiste, aber dank der grosszügigen Betriebszeiten auf ca. 3'200 Betriebsstunden im Jahr, verteilt auf rund 240 Tage. Dies ergibt eine Gesamtkapazität der Anlage von rund 110'000 Bewegungen pro Jahr. Der SIL beziffert die Kapazität heute auf 40'000 Bewegungen pro Jahr.

Eine Berechnung der landseitigen Kapazität macht auf kleinen Anlagen und insbesondere Flugfeldern ohne befestigte Start- und Landebahn keinen Sinn, da diese nicht für Passagierflüge oder die Business Aviation in Frage kommen.

### **4.4.3 Fazit**

Der Flugplatz Buttwil weist heute (2012) eine durchschnittliche Auslastung von 19% über die gesamte Betriebszeit auf. Bei dem heutigen Verkehrsaufkommen sind an Spitzentagen um die 84 und in der Spitzenstunde rund 12,5 Flugbewegungen anzunehmen. Bei einer Stundenkapazität von 35 Manövern hat der Flugplatz Buttwil demnach auch an Spitzentagen mit einer Auslastung von 36% noch grosse Reserven.

Auf Grund ihrer Lage und der dadurch geringen Anzahl lärm betroffener Personen könnte es sinnvoll sein, die Kapazitätsreserven der Anlage für die Ausbildungs- und/oder Privatfliegerei mit Kleinflugzeugen in der Zukunft zu nutzen, zumal auch von der Erschliessung her genügend Platz vorhanden ist.

## 4.5 Flugplatz Speck-Fehraltorf

Der Flugplatz Speck-Fehraltorf liegt im Westen von Pfäffikon ZH im Zürcher Oberland. Er ist gemäss SIL ein Flugfeld und wurde 1957 in Betrieb genommen. Die Anlage besteht aus einer 600m lange Graspiste sowie einem kleinen Vorfeld mit zwei Hangars am östlichen Ende der Start- und Landebahn. Sie wird von der Flugsportgruppe Zürcher Oberland (FGZO) betrieben, deren auch mehrere professionelle Piloten (Nähe zu Zürich/Dübendorf) angehören.

Abbildung 23      Luftbild des Flugplatzes Speck-Fehraltorf



Quelle: Google Earth

### 4.5.1 Heutige Nutzung

Der Flugplatz dient praktisch ausschliesslich der nichtgewerblichen Fliegerei bestehend aus Freizeit- und etwas Schulungsaviatik. 17884 Motorflugbewegungen (Anteil 96%), 452 Helikopterflüge (2%) und 362 Segelflüge (2%) ergaben 2012 18'698 Flugbewegungen. Dies sind etwas weniger als in den Vorjahren, als die 20'000er-Marke regelmässig überschritten wurde. Speziell in Speck-Fehraltorf ist der Betrieb von bzw. für Fallschirmspringer; mit eigenen Flugzeugen, Landeflächen und Trainingszeiten.

Die Betriebszeiten des Flugplatzes sind stark eingeschränkt, indem zum einen erst ab 08.00 Uhr bis max. 21.30 Uhr oder bis zur bürgerlichen Abenddämmerung (im Winter sogar 30 Min. vor bürgerlicher Dämmerung) geflogen werden darf und zum andern eine anderthalb stündige Mittagspause gilt. An Karfreitag, Bettag und Weihnachten bleibt der Flugplatz geschlossen.

#### 4.5.2 Potenzial

Speck-Fehraltorf liegt heute innerhalb des kontrollierten Luftraumes CTR des Militärflugplatzes Dübendorf und unmittelbar an der Grenze zum CTR vom Zürich-Kloten. Diese Luftraumkonstellation bedingt das Befliegen der Platzrunde aus Osten – Süden und schränkt die Bewegungsfreiheit stark ein (ausser mit Erlaubnis der Flugsicherung für das Befliegen des CTR). Mit der Aufhebung des Militärflugbetriebs in Dübendorf könnte sich die Luftraumkonfiguration über Speck-Fehraltorf in Zukunft vereinfachen und die Flexibilität und Kapazität erhöhen. Die genaue Ausgestaltung der künftigen Situation kann jedoch noch nicht vorhergesagt werden.

#### Modellberechnung Luftseitig

Die Modellberechnung für Speck-Fehraltorf zeigt, dass auf der Anlage heute nicht das System Anflug-Piste-Rollwege-Abflug sondern das Vorfeld kapazitätsbestimmend ist. Dies ist insbesondere auf die Tankanlage und die wenigen zur Verfügung stehenden Abstellplätze zurückzuführen, welche die von der Anflug-/ Pistenkonfiguration möglichen 30 Landungen bis 17 Starts pro Stunde nicht bewältigen können. Die Kapazität des Systems Anflug-Piste-Rollwege-Abflug ist rund 24% höher. Auch die Erschliessung bzw. die zur Verfügung stehenden Parkplätze auf dem Flugplatz sind sehr knapp bemessen und gelangen an Spitzentagen an ihre Grenzen.

Der Flugplatz Speck-Fehraltorf hat ähnlich wie Buttwil rund 240 normale Betriebstage im Jahr, auf Grund der Betriebszeiteinschränkungen ergeben sich darin jedoch nur rund 2'500 Betriebsstunden jährlich. Als Kapazität der Anlage resultiert damit ein Wert von rund 68'000 Bewegungen pro Jahr, wenn die Betriebszeiten voll ausgenutzt würden. Der SIL begrenzt die Kapazität heute auf 30'000 Bewegungen pro Jahr.

#### 4.5.3 Fazit

Mit den 18'698 Bewegungen 2012 war der Flugplatz im Schnitt zu 27% der theoretischen Kapazität ausgelastet. An Spitzentagen ist mit 75 Flugbewegungen zu rechnen, in der Spitzenstunde mit 11,2 Starts- und Landungen. Auch in Speck-Fehraltorf bestünde also noch erhebliches Potenzial für die Kleinaviatik von Privaten und für die Ausbildung. Allerdings muss sich die Anlage mit erheblichem Widerstand aus der Bevölkerung der dichter besiedelten Umgebung auseinandersetzen. Der Schutzverband Flugplatz Speck wurde eigens dazu gegründet, „den weiteren Ausbau des Flugverkehrs und der Infrastruktur auf dem Flugplatz Speck mit demokratischen Mitteln zu bekämpfen“ und „sich gegen die Lärmbelästigung und die schädlichen Emissionen der Fliegerei zu wehren“ (aus „Unsere Ziele“, Verein Schutzverband Flugplatz Speck).

Es muss demnach davon Ausgegangen werden, dass eine Erhöhung der heute vom BAZL erlaubten 30'000 Flugbewegungen im Jahr in Speck-Fehraltorf auf massiven Widerstand stossen und langwierige Verfahren ausgelöst würden. Die Betreiberin des Flugplatzes ist bestrebt, ein gutes Verhältnis zu Ihrer Nachbarschaft zu pflegen und möchte daher in den nächsten Jahren keinen Ausbau der Flugbewegungen. Die Kapazität des Flugplatzes ist aus regionalpolitischen Gründen daher längerfristig mit 30'000 Flugbewegungen anzunehmen.

## 4.6 Gesamtbeurteilung der Fallbeispiele

### 4.6.1 Reserven

In der Gesamtbetrachtung der fünf untersuchten Fallbeispiele zeigt sich, dass die Luftfahrtinfrastrukturen in der Schweiz über grosse theoretische Reserven verfügen, was die Anzahl Bewegungen pro Jahr betrifft. Die Restkapazität liegt zwischen 50'000 und 90'000 Bewegungen und kann im Extremfall von Bern-Belp bis zu 140'000 Bewegungen ausmachen. Wie sich gezeigt hat, haben die Reserven keinen direkten sprich linearen Zusammenhang zur Auslastung. Der Unterschied wird umso grösser, je ausgedehnter die Betriebszeiten sind.

An dieser Stelle soll auch ein Blick auf den SIL und die in den dazugehörigen Objektblättern festgelegten Kapazitäten, Potential SIL genannt, geworfen werden. Dies ist die „Zahl der jährlichen Flugbewegungen, die im Koordinationsprozess als Richtwert für die künftige Entwicklung vereinbart wurde. Sie dient als Basis für die Berechnung der Lärmbelastungskurve.“ (BAZL 2013). Für jede Luftfahrtinfrastruktur der Schweiz ist so die Anzahl Flugbewegungen festgesetzt, welche ab einem Flugplatz im Jahr verkehren dürfen. Nach dem Vergleich mit der Modellierung lässt sich sagen, dass die Festlegungen im SIL keinen rechnerischen oder methodischen Regeln folgen. Die heutige (2012) Anzahl Bewegungen entspricht zwischen 52,3% (Buttwil) und 80,9% (St.Gallen-Altenrhein) der im jeweiligen SIL-Objektblatt erlaubten Flugbewegungen. Im Vergleich mit der theoretischen Kapazität einer Anlage entspricht die SIL-Festlegung zwischen 36,4% (Buttwil) und 64,3% (Birrfeld).

Tabelle 12 Auswertung der Reserven auf den untersuchten Flugplätzen

Luftinfrastruktur	Flugbewegungen 2012	Anteil 2012 relativ zum SIL	Kapazität gemäss SIL	Anteil SIL relativ zur theoretischen Kapazität	theoretische Kapazität
Bern-Belp	59'605	79.5	75'000	37.5	200'000
St.Gallen-Altenrhein	29'522	80.9	36'500	38.4	95'000
Birrfeld	68'963	76.6	90'000	64.3	140'000
Buttwil	20'921	52.3	40'000	36.4	110'000
Speck-Fehraltorf	18'698	62.3	30'000	44.1	68'000

Quelle: Eigene Darstellung

Tendenziell haben Anlagen mit befestigter Piste einen grösseren Teil ihrer SIL-Kapazität ausgeschöpft als solche ohne befestigte Start- und Landebahn. Dies könnte ein bestätigendes Indiz dafür sein, dass die Motoraviatik mit Maschinen, welche befestigte Pisten benötigen, im Wachstum begriffen ist, während die Segelfliegerei seit Jahren mit rückgängigen Zahlen da steht. Entsprechend werden die Anlagen mit befestigter Start- und Landebahn häufiger beflogen.

#### 4.6.2 Auslastung

Bei der Fokussierung auf die Spitzenzeiten, in welchen die Kapazitätsgrenze spürbar wird, zeigt sich eine Differenzierung im Vergleich mit den vorgehend betrachteten Reserven. In der nachfolgenden Tabelle 13 wird ersichtlich, wie die untersuchten Anlagen ausgelastet sind und zwar zu den Spitzenstunden, der Spitzentage und über das gesamte Jahr.

In der Spitzenstunde laufen die Flugplätze Bern-Belp und Birrfeld heute an ihrer Kapazitätsgrenze, während die Flugfelder Buttwil und Speck-Fehraltorf auch in diesen Zeiten nicht annähernd ausgelastet sind. Vergleicht man die Werte mit der Auslastung übers Jahr fällt auf, dass insbesondere Bern eine sehr tiefe Gesamtauslastung im Vergleich zur Spitzenauslastung aufweist. Dies ist auf die langen Betriebszeiten von Bern nahe dem gesetzlichen Maximum zu „verdanken“. In Speck-Fehraltorf, als Gegenbeispiel mit sehr eingeschränktem Betrieb, klaffen die Auslastungen viel weniger auseinander. Der Flugplatz Birrfeld mit gegen 50% weist mit Abstand die höchste Jahresauslastung auf.

Tabelle 13 Auswertung der Auslastung auf den untersuchten Flugplätzen

Luftinfrastruktur	Flugbewegungen 2012	Kapazität gemäss Modell	Auslastung Spitzenstunde	Auslastung Spitzentag	Auslastung Jahr
Bern-Belp	59'605	200'000	96.5	42.9	29.4
St.Gallen-Altenrhein	29'522	95'000	63.5	39.1	26.8
Birrfeld	68'963	140'000	103	59	49
Buttwil	20'921	110'000	36	17.7	18.7
Speck-Fehraltorf	18'698	68'000	40.7	25.8	27.6

Quelle: Eigene Darstellung



## 5 Untersuchungen der Einflussgrössen

Mit Hilfe des Modells sollen im folgenden Kapitel die einzelnen Faktoren auf ihren Einfluss auf die Gesamtkapazität quantifiziert und qualifiziert werden. Dies soll anhand einer Ceteris-paribus-Analyse erfolgen (lat. „unter sonst gleichen Bedingungen“), bei welcher jeweils nur ein Parameter verändert wird und die daraus folgenden Auswirkungen auf das Resultat analysiert werden.

Um die Auswirkungen aller Parameter zu untersuchen, wird ein Probemodell erstellt, welches alle Parameter benutzt. Die verwendeten Werte sind zufällig gewählt, entsprechen aber etwa einer mittelgrossen Luftfahrtinfrastruktur mit Passagierverkehr (und den entsprechenden Einrichtungen) sowie einem Mix aus Sicht- und Instrumentenflügen und aller Flugzeuggrössen.

### 5.1 Effekte einzelner Faktoren

Die kapazitätsbeeinflussenden Faktoren sind in zwei Gruppen unterteilbar. Die eine Gruppe bestimmt, ob eine Luftfahrtinfrastruktur betriebsstauglich ist oder nicht. Die Frage der Kapazität bezieht sich dabei auf die Betriebstage oder -stunden und damit auf die Gesamtkapazität über ein Jahr. Die andere Gruppe bezieht sich auf die direkte Leistungsfähigkeit einer Anlage, wenn sie dann in Betrieb ist. Ihr Einfluss zeigt sich primär in der Stundenkapazität einer Infrastruktur und ist auf die Jahreskapazität oft vernachlässigbar im Vergleich mit der ersten Gruppe.

Zum Tragen kommen die Faktoren der zweiten Gruppe also dann, wenn zwar die Reserven eines Flugplatzes übers Jahr noch genügen, es aber in Spitzenstunden und -tagen zu Kapazitätsengpässen kommt. Es kann in diesem Fall durchaus sinnvoll sein, Massnahmen zur Kapazitätserhöhung vorzusehen und umzusetzen, obwohl die Gesamtkapazität dadurch kaum verändert wird. Als später folgendes Beispiel etwa das Anlegen von (zusätzlichen) Abrollwegen.

#### 5.1.1 Umweltbedingungen

##### Betriebszeit

Die Betriebszeiten bzw. die sich daraus ergebenden Betriebsstunden beeinflussen die Gesamtkapazität direkt proportional. Fallen auf Grund von Einschränkungen (z.B. Betriebsbeginn später als 06.00 Uhr) 1% der Betriebsstunden weg, reduziert sich auch die Gesamtkapazität um 1%.

Die Lage von wegfallenden Betriebstagen im Kalender hingegen kann einen unterschiedlichen Einfluss haben wenn, wie auf vielen Luftfahrtinfrastrukturanlagen in der Schweiz, weder ein ILS noch eine Befeuerung vorhanden sind. In diesem Fall gilt häufig die bürgerliche Morgen-

und/oder Abenddämmerung als Betriebszeitgrenze. Gelten beide, so hat ein Betriebstag im Dezember um die Wintersommerwende 9 Stunden und 40 Minuten. Im Juni hingegen ist es von 06.00 Uhr (frühester Betriebsbeginn gemäss Art. 39 VIL) bis 22.00 Uhr (spätester Betriebschluss) hell genug und es stehen 16 Betriebsstunden zur Verfügung. Ein wegfallender Betriebstag reduziert die Gesamtkapazität im Winter so um rund 40% weniger als im Sommer. Ein ausfallender Betriebstag reduziert die Gesamtkapazität einer Anlage mit 3'600 Betriebsstunden jährlich folglich um 0,26% (Winter) bis 0,44% (Sommer).

## Höhenlage

Die Höhenlage eines Flugplatzes beeinflusst die Startstrecke einer Maschine und dadurch die Belegung der Start-/ Landebahn. Verfügt eine Anlage über einen Parallelrollweg, so ist dieser Effekt irrelevant, da der einzuhaltende Abstand von i.d.R. 120 Sekunden zwischen zwei Flugzeugen auch mit längerer Startstrecke immer grösser ist als die Zeitdauer von der Warteposition zur Startposition. Auch sonst ist der Kapazitätseffekt praktisch vernachlässigbar. Die längere Belegung durch den Start auf einem 1000m höher gelegenen Flugplatz hat eine Kapazitätseinbusse von 0,3% zur Folge.

Nicht ausser Acht gelassen werden darf hingegen, dass die verlängerte Startdistanz dazu führen kann, dass Flugzeugtypen für eine Anlage nicht mehr geeignet sind bzw. zugelassen werden können, wenn die Referenzstartstrecke durch die Höhenlage länger wird als die zur Verfügung stehende Pistenlänge.

## Meteorologie

Der Einfluss der Witterung auf die Kapazität ist abhängig von den Eigenschaften der Luftfahrtinfrastruktur. Verfügt eine Anlage über eine befestigte Piste mit ILS und Befeuerung ist der Einfluss sehr gering, da der Flugbetrieb grundsätzlich immer aufrechterhalten werden kann (ausser z.B. bei starkem Schneesturm). Auf Flugplätzen ohne diese Attribute reduzieren die meteorologischen Phänomene die Kapazität je nach Region unterschiedlich stark. Ungenügende Sicht und das Fehlen eines ILS hat z.B. in der Region Zürich mit 18% den grössten negativen Einfluss, während eine unbefestigte Piste mit 1/3 wegfallenden Betriebstagen in St.Gallen die Kapazität am stärksten beeinträchtigt. Eine fehlende Befeuerung macht 17,6% der gesetzlich möglichen Betriebsstunden unbrauchbar für den Flugbetrieb (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14 Einfluss von Wetterphänomenen auf die Kapazität nach Regionen

Phänomen	relevant wenn	Einheit	Bern	Genf	Lugano	Sion	St. Gallen	Zürich
Regen (>10 mm / Tag)	keine befestigte Piste	% der Betriebstage	10.7	9.9	13.7	7.4	12.9	11.5
Schneefall	keine befestigte Piste	% der Betriebstage	10.7	5.2	5.5	10.4	20.5	10.7
Schlechte Sicht	kein ILS	% der Betriebstage	14.8	11.5	10.6	2.7	13.7	18.3
Dunkelheit	Keine Befeuerung	% der Betriebsstunden	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6

Quelle: Eigene Darstellung

### 5.1.2 Erschliessung

Die Kapazität der Erschliessung (wie auch jene des Terminals) ist dann von Interesse, wenn auf einer Luftfahrtinfrastruktur Passagier- und Geschäftsreiseverkehr abgewickelt werden soll. Die landseitige Kapazität einer Anlage wird auf Passagierflugzeuge gerechnet und hängt stark davon ab, wie viele Passagiere die grössten zugelassenen Flugzeuge auf dem Platz befördern können (Interkontinentalmaschine mit 300 - 400 Passagieren vs. Kurzstreckenmaschine für 30 - 50 Passagiere). Die Kapazität der Erschliessung verhält sich direkt proportional zur Summe der Kapazität der einzelnen Erschliessungsarten. Eine Veränderung eines einzelnen Parameters hat somit nur Auswirkungen in Verhältnis zu seinem Anteil an der Summe.

Die Erschliessung muss gemäss Modell durchschnittlich folgende Eigenschaften aufweisen, um jeweils 1'000 Passagiere pro Stunde bewältigen zu können:

- Bahnlinie mit 150m-Komposition im 30'-Takt
- Buslinie mit Gelenkbussen im 5'-Takt
- 1'000 Parkplätze
- 220m lange Vorfahrt

Die gleichwertige Erschliessung (für 1'000 Passagiere / h) genügt demnach im Falle eines für Grossflugzeuge ausgelegten Flughafens nur für 6 Passagierflugzeuge bzw. Bewegungen, während sie auf einer kleineren Luftfahrtinfrastruktur eine Kapazität von 40 - 60 Bewegungen aufweist. Dies unter der Berücksichtigung eines Korrekturfaktors von 0,5 (siehe Kapitel 2.4.3 Korrekturfaktor).

### 5.1.3 Terminal

Ähnlich wie bei der Erschliessung verhält sich die Kapazitätssensitivität beim Terminal (Einfluss von Grossflugzeugen und Korrekturfaktor). Der grosse Unterschied bei den Elementen des Terminals ist, dass sie nicht aufsummiert werden, sondern das schwächste Element die Gesamtkapazität bestimmt (Prinzip der Fassdauben). Dadurch ist die Gesamtkapazität einer starken Veränderung unterworfen, wenn die bestimmende Teilkapazität über Parameteranpassungen nach unten korrigiert wird.

Um 1'000 Passagiere pro Stunden bewältigen zu können, müssen die Komponenten des Terminals gemäss Modell in folgender Anzahl vorhanden sein:

- Durchgehende, hindernisfreie Durchgangsbreite von 2m
- 100 Check-In Möglichkeiten (Schalter / Automaten)
- 10 Sicherheitskontrollen
- 2,5 Gepäckbänder
- 2'000m<sup>2</sup> Wartebereich am Flugsteig

#### 5.1.4 Vorfeld (Abfertigung)

Die Grösse und Leistungsfähigkeit einer Tankanlage, als kapazitätsbestimmendes Element der Abfertigung auf dem Vorfeld, bestimmt indirekt die Eignung eines Flugplatzes, indem ihre Kapazität stark überproportional abnimmt umso grösser die Flugzeuge sind. Zurückzuführen ist dies auf das nahezu exponentiell ansteigende Tankvolumen von Flugzeugen mit zunehmender Grösse.

Eine Tankanlage, die auf Kleinflugzeuge mit einem Fassungsvermögen von einigen hundert Litern ausgelegt ist (Zapfsäule), füllt ein solches in einigen Minuten. Das Tankvolumen eines kleineren Passagierflugzeugs oder eines Businessjets ist im Bereich von Faktor 10 grösser (2'000 - 8'000 Liter), die Kapazität der Tankanlage sinkt indirekt proportional um eben diesen Faktor. Übliche Zapfsäulen, wie sie auf Schweizer Flugplätzen vorherrschen, erreichen bei solchen Flugzeugen eine Kapazität um 1 pro Stunde und Säule. Wird im Modell von einer Zapfsäulentankanlage ausgegangen und Flugzeuge der Kat. 2 und 3 „zugelassen“, bricht die luftseitige Kapazität um rund 90% zusammen.

Eine andere Dimension von Tankanlage wird deshalb nötig, wenn Flugzeuge dieser Grössenkategorien innert nützlicher Frist abgefertigt werden sollen und nochmals, wenn Mittel- und Langstreckenflugzeuge der Kategorie 4 vorgesehen sind. Diese fassen abermals um den Faktor 10 mehr Kerosin, zwischen 30'000 (Airbus A320 / Boeing 737) und 200'000 Liter (Boeing 747 / 777). Die Kapazität fällt bei Flugzeugen der Kategorie 4 an derselben Tankanlage nochmals um durchschnittlich 90%.

Die Tankanlage ist damit der Infrastruktureil, welcher auf die Kapazität bezogen am stärksten auf veränderte Flugzeuggrössen reagiert. Da die Anlage längerfristig geplant und realisiert wird, ist sie unter den Infrastrukturelementen ebenso entscheidend für die Eignung wie Piste oder Rollwege und am Entscheidendsten für die Kapazität eines Flughafens oder Flugplatzes.

#### 5.1.5 Start-/ Landebahn

Wie die Simulation im Modell gezeigt hat sind Länge, Breite und Tragfähigkeit der Start- und Landebahn zwar für die Flugzeugeignung relevant, nicht wesentlich aber für die Kapazität einer Luftfahrtinfrastruktur.

Der entscheidende Kapazitätsfaktor an der Start- und Landebahn ist ihre Befestigung. Unbefestigte Pisten sind „wetteranfällig“ und kosten in der Schweiz je nach Region von um 20% (Sion), 25% (Lugano), 33% (Zürich) und bis gar 40% (St.Gallen) der normalen Betriebstage, da die meteorologischen Verhältnisse (Regen >10mm oder Schnee) Starten und Landen auf Gras nicht oder nur in sehr reduziertem Masse zulassen.

Auf die Betriebsstunden umgeschlagen ist das Verhältnis der wegfallenden Kapazität weniger ausgeprägt, da Nicht-Betriebstage gehäuft im Winter auftreten, in welchem die Betriebszeiten reduziert sind. Dies weil Anlagen mit unbefestigten Pisten in aller Regel auch keine Befestigung und ILS haben und dadurch die bürgerliche Tageslänge nur wenige Betriebsstunden zulässt. In

Sion haben Infrastrukturen ohne befestigte Piste daher rund 15% weniger Betriebsstunden, in Lugano 17%, in Zürich 20% und gar 25% sind es in St.Gallen.

### 5.1.6 Rollwege

Der Kapazitätseffekt der Rollwegeninfrastruktur lässt sich mit Hilfe des Probemodells sehr gut aufzeigen. Die nachfolgenden Grössenordnungen beziehen sich dabei auf die Stundenkapazität einer Luftfahrtinfrastruktur.

Schnellabrollwege erzielen einen Kapazitätseffekt um 1 % gegenüber konventionellen Abrollwegen.

Zwischenabrollwege im Allgemeinen verbessern die Kapazität zwischen 5 und 10% je nach Anzahl (1 -> 2 mehr als 5 -> 6) und Lage in der Hauptlanderichtung. Der Effekt ist umso ausgeprägter, je kürzer der Endanflug ist, da die Belegung bei der Landung durch die Abrollwege reduziert wird und dadurch eine noch engere Staffelung der Flugzeuge erfolgen kann.

Die Existenz eines Parallelrollwegs verbessert die Kapazität um 10-20%. Der Effekt wird umso grösser, je länger die Start- und Landebahn ist und umso grösser die Flugzeuge sind, letzteres jedoch nur beim Landen. Die Belegung bei Start und Landung dehnt sich aus, umso länger das Rollen, welches nicht zur Startbeschleunigung bzw. Landebremmung dient, und Wenden auf der Piste ist. Es gilt anzumerken, dass im Modell angenommen wird, dass der Anschluss an die Piste bei Fehlen eines Parallelrollwegs ungefähr in der Mitte liegt oder dass beide Pistenrichtungen gleich häufig in Betrieb sind.

Besonders ausgeprägt (um 20%) wirkt der Effekt eines Parallelrollweges, wenn der Endanflug und/oder die vorgegebene Abflugroute kurz sind, da dadurch eine engere Staffelung geflogen werden könnte, wenn die Belegung der Piste nicht mehr Zeit benötigt als die Separation.

### 5.1.7 Luftraum

#### Anflug

Wird der Endanflug im Modell isoliert betrachtet, zeigt sich, dass die Gesamtkapazität der Luftfahrtinfrastruktur bzw. des Systems Anflug-Piste-Rollwege-Abflug steigt, umso länger der Endanflug ist. Vorausgesetzt, Landungen haben grundsätzlich Priorität gegenüber Starts.

Dieser Effekt erscheint auf den ersten Blick paradox, lässt sich jedoch damit erklären, dass immer grössere Lücken zwischen zwei Landungen entstehen, wenn eine langsameres auf ein schnelles Flugzeug folgt. Dadurch sind mehr Starts dazwischen möglich, ohne die Kapazität der Landungen zu beeinträchtigen. Da die Landungen Priorität haben, werden, theoretisch betrachtet, Starts bis zum Erreichen der Kapazität Landung nur in den genügend grossen Lücken durchgeführt. Dank den grösseren Lücken beim langen Endanflug sind mehr Starts und insgesamt mehr Bewegungen möglich.

Der Effekt eines 10km langen Endanfluges gegenüber einem solchen von 1 km beträgt je nach Konfiguration 10 - 15 %, wobei die Anzahl bzw. Kapazität der Landungen gleich bleibt und nur die Starts zunehmen. Je kürzer die vorgegebene Abflugroute, desto mehr Starts können in den Lücken durchgeführt werden. Leistungsmässig betrachtet wäre demnach ein langer Endanflug kombiniert mit einer möglichst kurzen vorgegebenen Abflugroute kapazitätsoptimierend.

## **Abflug**

Beim Abflug verhält sich dies entsprechend der eben ausgeführten Überlegung umgekehrt. Ist die vorgegebene Abflugroute so kurz, dass auch bei grossen Geschwindigkeitsunterschieden der startenden Flugzeuge der Minimalabstand von i.d.R. 120 Sekunden reicht, wäre das Startprozedere kapazitätsoptimal (30 Starts pro h). Da die Priorität aber bei den Landungen steht, ist dies selten der Fall. Der kurze vorgegebene Abflug erlaubt aber, die Landelücken effizient mit Starts zu füllen.

Die Modellierung verschiedener Konstellationen von An- und Abflugrouten hat ergeben, dass eine 10 km lange, vorgegebene Abflugroute eine 5 - 10% geringere Gesamtkapazität aufweist, als wenn keine Abflugroute vorgegeben ist. Je kürzer der Endanflug, desto grösser ist der Effekt einer fixen Abflugroute. Die Kombination kurzer Endanflug - lange Abflugroute mit ungünstiger Pisten-/ Rollwegkonfiguration reduziert die Startkapazität um bis zu 50%.

## **Kontrollierter Luftraum**

Die Kapazität des kontrollierten Luftraumes CTR wird im vorliegenden primär über die Sektorkapazität nach (Favey 2013) bestimmt. Über den methodischen Inhalt dieser Arbeit können zurzeit (Juni 2013) keine Angaben gemacht werden. Betrachten wir daher die weiteren Faktoren des IFR-Anteils und des Anteils professioneller Piloten.

Nach Auskunft von Adrian Meier, Stellvertretender Leiter der Flugsicherung Raum Bern, ergeben Sichtflüge (VFR) für die Flugsicherung rund halb so viel Konzentration und Aufwand wie ein Instrumentenflug, obwohl der eigentliche Führungsaufwand eher um 5x geringer ist. Dies sei auf die geringere Professionalitätsrate der VFR-Piloten (z.B. Funkdisziplin) und die schlechtere Überwachbarkeit (Radar) zurückzuführen. Im Modellteil „Kontrollierter Luftraum“ sind VFR daher mit dem Faktor 0.5 gewichtet. Je höher der Anteil VFR auf einem Flugplatz mit Flugsicherung ist, desto höher ist die Kapazität an Flugbewegungen im nachstehenden Verhältnis (siehe Tabelle 15).

Dieselbe Überlegung gilt gemäss Adrian Meier bei der Professionalität der Piloten. Ein ungeübter Instrumentenflugpilot (z.B. Auszubildende oder „Sonntags“-piloten) generiert rund 50% mehr Aufwand, da Funkbefehle wiederholt werden müssen, die Einhaltung der Flugroute genauer kontrolliert wird usw. Die Kapazität des kontrollierten Luftraumes entwickelt sich daher mit dem Anteil Profis nach unten. Das Verhältnis ist nachfolgend dargestellt.

Tabelle 15 Einfluss der Anteile je Flugmodus auf die Kapazität des Luftraums

Anteil IFR	Anteil VFR	Kapazität in %
100	0	100
75	25	125
50	50	150
25	75	175

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 16 Einfluss der Professionalität der Piloten auf die Kapazität des Luftraums

Anteil Profis	Anteil Laien	Kapazität in %
100	0	100
75	25	89
50	50	80
25	75	73
0	100	67

Quelle: Eigene Darstellung

### Instrumentenlandesystem ILS

Ein ILS beeinflusst die Kapazität einer Anlage primär über ausgedehntere Betriebszeiten, indem in Zeiten mit ungenügenden Sichtverhältnissen für VFR der Flugbetrieb aufrechterhalten werden kann. Im Anflug mit ILS wirken zwei Effekte auf die Kapazität. Zum einen sind im Instrumentenflug grössere Abstände zwischen den Flugzeugen einzuhalten, was sich negativ auswirkt. Zum andern kann der Fluglotse die Flugzeuge in eine möglichst kapazitätsoptimale Stafelung dirigieren, wenn sich die Piloten voranmelden und dadurch die Kapazität erhöhen. Im vorliegenden Modell wird dieser Effekt nicht quantitativ abgebildet, da von einer zufallsverteilten Ankunfts- und Abflugsreihenfolge ausgegangen wird.

Der Kapazitätsgewinn eines ILS durch die zusätzliche Betriebszeit ist abhängig von den regionalen, klimatischen Bedingungen. In der Schweiz beträgt dieser zwischen 3% (Sion) und 18% (Zürich) der Betriebstage. Siehe dazu auch Tabelle 14.

### 5.1.8 Flugzeugmix

Abschliessend soll ein Blick auf den Einfluss des Flugzeugmix, also der Flottenzusammensetzung auf einem Flugplatz, auf die Anlagekapazität geworfen werden.

Für landseitige Infrastrukturen, deren Kapazität in Passagierflugzeugen pro Stunde als Einheit und am grössten verkehrenden Flugzeugtyp gemessen wird, ist eine Analyse nicht sehr aussagekräftig. Solange das grösste Flugzeugmuster dasselbe bleibt und nur z.B. die Anteile zu Kleinflugzeugen verschoben werden, sind nur minimale Änderungen in der Kapazität zu beobachten. Mit der Wahl eines deutlich anderen Flugzeuges als grössten Flugzeugtyps hingegen ist jeweils eine markante Kapazitätsanpassung verbunden und zwar im Verhältnis des Passagiervermögens.

Dieselbe Erkenntnis gilt für die Vorfeldabfertigung. Da Tankanlagen für bestimmte Flugzeuggrössen konzipiert sind, ist auch ihre Kapazität auf die Grösse des Flugzeugtanks ausgelegt. Realistischerweise wird niemand versuchen, an einer gewöhnlichen Tanksäule wie für Kleinflugzeuge üblich eine Airbus-Maschine zu betanken. Wird dies im Modell eingegeben, fällt die Kapazität der Anlage in sich zusammen, im Verhältnis der Tankvolumen der jeweils grössten Flugzeuge.

#### System Anflug-Piste-Rollwege-Abflug

Spannend ist die Ceteris-Paribus-Analyse jedoch für das System Anflug-Piste-Rollwege-Abflug. Wie sich die Kapazität einer Anlage verändert, lässt sich nicht allgemein quantifizieren wie bei anderen untersuchten Einzeleinflüssen. Je nach Anlagekonfiguration resultieren unterschiedlich starke Veränderungen, wie die Simulation mit drei Modellaufbauten zeigte. Als Beispiel die Auswirkungen bei einer Vereinheitlichung des Flugzeugmix auf Basis des Probemodells.

Tabelle 17      Beispielresultate für den Einfluss einheitlicher Flugzeugtypen

Anteil Grösse		Kapazitätsveränderung	
<i>Klein</i>	<i>Gross</i>	<i>bei kurzem An-/ Abflug</i>	<i>bei langem An-/ Abflug</i>
100	0	113%	89%
75	25	110%	84%
50	50	100%	100%
25	75	114%	109%
0	100	130%	112%

Quelle: Eigene Darstellung



Auf Grund der uneindeutigen Resultate aus den drei Modellsimulationen und der fehlenden Zeit für weitere Untersuchungen kann an dieser Stelle keine abschliessende Beurteilung zur quantifizierten Kapazitätsveränderung bei Anpassung des Flugzeugmix gemacht werden.

Allgemeine Tendenzen des Einflusses auf die Kapazität können hingegen gemacht werden:

- Sie steigt mit der Einheitlichkeit der Flugzeuge
- Sie steigt bei Grossflugzeugen stärker als bei Kleinflugzeugen
- Sie steigt bei kurzem An-/ Abflug stärker als bei langem An-/ Abflug
- Sie sinkt bei Mix mit Segelfliegern überproportional

## 6 Synthese und Empfehlungen

In diesem abschliessenden Kapitel sollen einige Anregungen für die Weiterentwicklung der Planung von Luftinfrastrukturen in der Schweiz gemacht werden. Im Sinne der Aufgabenstellung seitens des BAZL sind Empfehlungen insbesondere im Hinblick auf die Überarbeitung und Fortschreibung des SIL, welche in den nächsten Jahren ansteht, zu fokussieren.

### 6.1 Weitergehende Forschung

Im Laufe der Arbeit musste verschiedentlich festgestellt werden, dass zwar teils ausführliche Grundlagenforschung im Gebiet der Kapazität von Luftfahrtinfrastrukturen besteht, allen voran (Horonjeff and McKelvey 1983), diese jedoch Lücken in Bezug auf Aktualität und regionale Dispersität aufweist.

Die Erarbeitung eines realitätsnahen Kapazitätsmodelles ist erschwert und muss mit Annahmen ergänzt werden, wenn empirische Studien zu den Modellen und Formeln in der Grundlagenforschung fehlen oder wenn diese nicht den aktuellen und regionalen Gegebenheiten angepasst sind. Diese Annahmen enthalten ein Fehlerpotenzial, welches die relative Genauigkeit der Modellierungsergebnisse in Frage stellt.

#### 6.1.1 Aktualisierung

Die Grundlagen von (Newell 1979), (Horonjeff and McKelvey 1983) und (TRB 1987) basieren auf dem Stand der Luftfahrt ihrer Zeit. In den letzten 30 Jahren erlebte die Luftfahrtbranche Entwicklungsfortschritte und Veränderungen, welche die Berechnungsarten zumindest in Frage stellt. Eine nicht abschliessende Aufzählung der Veränderungen:

- Liberalisierung des Flugzeugmarktes
- Digitalisierung von Abläufen und Überwachungsfunktionen
- Leistungsbezogene Entwicklungen im Flugzeugbau (z.B. Triebwerke)
- Verbesserung im Flugzeugbau (z.B. Funktionalität Kabine, Gewichtsreduktion durch leichtere Bauart)
- Ausführlichere Sicherheitskontrollen
- Neue Arten des Check-Ins (z.B. Online, Automaten)
- Neue Forschungen im Bereich Fussgängersimulation (z.B. Verhaltenspsychologie)

Greifen wir das Beispiel des Check-Ins heraus, um den Wandel zu charakterisieren. Der klassische Check-In-Schalter mit einem Angestellten zuständig für Flugscheinkontrolle, Passkontrolle, Gepäck wägen und etikettieren ist in den letzten Jahren durch andere Möglichkeiten des

Eincheckens ergänzt und aus Kostengründen teilweise ersetzt worden. Automaten erlauben heute die selbständige Identifikation von Fluggast und Etikettierung des Gepäcks am Flughafen. Über das Internet ist das Check-In bei den meisten Fluggesellschaften online möglich und erspart dem Fluggast das frühzeitige anwesend sein am Flughafen. Durch Zusammenarbeit mit anderen Transportunternehmen sind auch weitere Modelle des Check-Ins denkbar und üblich (z.B. Einchecken und Gepäckaufgabe am Bahnhof).

Diese Veränderungen des Check-In-Vorganges haben einen wesentlichen Einfluss auf die Aufenthaltszeiten eines Fluggastes am Flughafen, den für das Check-In notwendigen Platzes, der zur Verfügung stehenden Durchgangsbreiten etc. und damit auf die Kapazität eines Flughafen-terminals. Die Modernisierung bedingt eine Anpassung der einschlägigen Berechnungen, welche auf empirischen Erhebungen basieren. Solche neuen Erhebungen bilden eine nötige Grundlagenarbeit für die künftige Forschung und Simulation von kapazitätsrelevanten Faktoren.

Es ist anzustreben, dass die notwendigen empirischen Untersuchungen für eine Überarbeitung der Formeln zur Kapazitätsberechnung durchgeführt werden. Dies primär in den Bereichen, in welchen sich die Luftfahrt in den letzten 30 Jahren am stärksten verändert hat.

### 6.1.2 Regionalisierung

Wie bereits in Kapitel 2.3.1. erläutert, stammen die meisten Grundlagen aus den USA. Aus dem europäischen oder asiatischen Raum sind kaum umfassende Untersuchungen und zugehörige Literatur vorhanden. Während der luftseitige Bereich auf Luftfahrtinfrastrukturen weltweit durch die ICAO normiert ist und sich die Unterschiede diesbezüglich in Grenzen halten, ergeben sich landseitig teils grosse kulturelle Unterschiede mit Auswirkungen auf die Kapazität.

Als Beispiel die landseitige Erschliessung: Während im amerikanischen und asiatischen Raum die Erschliessung für den MIV absolute Priorität hat und auf Grund der i.d.R. grosszügigeren Platzverhältnisse mit genügend Reserven ausgelegt wird, ist im europäischen Raum die Erschliessung mit öffentlichen Verkehrsmitteln weitaus bedeutender und wird entsprechend gefördert. Nicht zuletzt, da der Platz für zusätzliche Autobahnen, Parkflächen etc. fehlt. Dies schlägt sich in den Formeln für die Berechnung von Erschliessungskapazität nieder, welche für den europäischen Raum angepasst werden müssten.

Bei den Berechnungsgrundlagen für Kapazitäten von Erschliessung, Durchgangs- und Warteflächen hingegen ist es der asiatische Raum, welcher kulturell bedingt andere Ansprüche stellt und höhere Leistungsfähigkeiten pro Fläche erreicht als in europäischen und amerikanischen Gefilden.

Für landseitige Elemente eines Flughafens wäre es für die Modellierung seiner Kapazität deshalb sinnvoll, regionale Untersuchungen als Basis für die Berechnungsformeln beiziehen zu können. Die lokale Empirie würde eine wesentlich genauere und realistischere Kapazitätsabschätzung erlauben. Es ist für die Schweiz zu empfehlen, die entsprechenden Studien im euro-

päischen Rahmen zu koordinieren und durchzuführen und die Adaptierbarkeit der Formeln zu überprüfen und notwendigenfalls anzupassen.

### **6.1.3 Zusammenarbeit mit Privatwirtschaft**

Im Rahmen der Ausarbeitung kristallisierte sich heraus, dass die Zusammenarbeit bei Untersuchungen und Studien im Luftfahrtbereich mit den Firmen an der „Front“ besonders wichtig ist. Dies zum einen auf Grund des hohen Spezialisierungsgrades und der ständigen Veränderung der Voraussetzungen sowie durch die hohe Verflechtung der verschiedenen Gebiete und ihrer Auswirkungen aufeinander. Die akademisch-wissenschaftliche Seite kann in diesem Bereich besonders viel von der praktischen Erfahrung lernen, etwa von den Flugdienstleitern, wenn es um die Organisation des Luftraumes geht.

### **6.1.4 Kapazitätsnachfrage in der Schweizer Luftfahrt**

Nicht zuletzt ist im Hinblick auf die planerische Weiterentwicklung des SIL auch eine Analyse der Nachfrage in der Schweiz empfehlenswert. Mit dem vorliegenden Modell kann das Angebot an Luftfahrtinfrastruktur abgebildet werden. Als nächster Schritt ist nun noch offen, wo in der Schweiz welche Grössen von Flugzeugen verkehren wollen. Dafür ist eine umfassende Marktanalyse durchzuführen, in welcher die Nachfrage nach Flugzeugtypen bzw. -grössen erfasst werden soll. Unter Abgleich von Angebot und Nachfrage kann so in einer Konklusion bestimmt werden, welche Luftfahrtinfrastrukturen in der Schweiz in Zukunft mehr und welche weniger gebraucht werden und welches Konzept des Infrastrukturnetzes Luftfahrt planerisch weiterverfolgt werden soll.

## 6.2 Bestehende Reserven

Für eine abschliessende Empfehlung zur künftigen Struktur, Nutzung und baulichen Entwicklung der schweizerischen Luftinfrastruktur fehlt die unter Kapitel 6.1.4 erläuterte Nachfrageanalyse und eine anschliessende Auslegeordnung mit Variantenbildung zur zukünftigen Entwicklung.

Was die vorliegende Arbeit jedoch aufzeigt ist, dass die kleinen und mittleren Luftfahrtinfrastrukturen in der Schweiz alle über Kapazitätsreserven verfügen. Die Grössenordnungen sind je nach Anlage verschieden und insbesondere abhängig vom betrachteten Zeitraum. Gemein ist ihnen, dass sie heute alle durch die SIL-Objektblätter und der darin enthaltenen Bewegungsobergrenzen limitiert sind.

### 6.2.1 SIL-Festlegungen

Zu den Bestimmungen der im SIL maximal zugelassenen Zahl von Flugbewegungen kann nach der vorliegenden Modellanalyse gesagt werden, dass sie wohl einer historisch-politischen Lösungsfindung entspringen und technisch nicht nachvollziehbar sind.

Auf Basis von Kapazitätsabschätzung mit Hilfe eines Modells wie dem vorliegenden könnte für die künftige Bestimmung der SIL-Obergrenze ein einheitliches, technisch abgestütztes Verfahren entwickelt und angewandt werden. Die Festlegungen sollten dabei nicht unbedingt an den Jahresbewegungen festgemacht werden, da diese wenig über die Belastung und Auslastung einer Anlage in Spitzenzeiten aussagen. Als Variante könnte anhand der Kapazität bei Volllastung in den Spitzenzeiten eine Obergrenze festgelegt werden.

Dem Autor ist bewusst, dass die technisch-wissenschaftliche Herangehensweise für die rechtlichen Festlegungen der erlaubten Flugbewegungen in der politischen Behandlung mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Widerstand stossen wird. Es liegt an den politischen Exponenten, am Ende einen Kompromiss zu finden. Nichtsdestotrotz wäre es aus fachlicher Sicht wünschenswert, unabhängig der politischen Stimmung ein methodisch nachvollziehbares Verfahren zu implementieren.

### 6.2.2 Reserven und deren Nutzung

Wie in den Fallbeispielen und in (Aviena 2013) ausgeführt, gibt es Luftfahrtinfrastrukturen, welche für gewisse Flugzwecke und Flugzeuggrössen besonders geeignet sind. Ob für die jeweiligen Nutzungen in Zukunft eine zusätzliche Nachfrage besteht, welche die Nutzung von Reserven bedingt, lässt sich erst nach einer entsprechenden Analyse sagen (siehe Kapitel 6.1.4). Wichtig ist jedoch zu sagen, dass voraussichtlich für alle Nutzungen der General und Business Aviation technische Reserven zur Verfügung stehen.

## Entwicklungstendenzen

Aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Expertenbefragungen sind einige Eindrücke über eine mögliche künftige Entwicklung der Nachfrage in der General Aviation zusammengekommen, welche an dieser Stelle kurz ausgeführt werden sollen, ohne Anspruch an deren Richtigkeit und Vollständigkeit.

Die Segelfliegerei verliert weltweit und besonders stark in der Schweiz an Bedeutung. Wie die NZZ in ihrer Ausgabe vom 30. Mai 2013 berichtete (Reis 2013), hat die Zahl brevetierter Piloten seit 2000 um 18% auf noch 2'324 abgenommen. Alle befragten Flugplatzleiter bestätigten, dass der Segelflugbetrieb auch auf ihrem Flugplatz schrumpfe. Gründe sehen Experten im individuellen Freizeitverhalten der jüngeren Generationen, der Konkurrenz durch Gleitschirmfliegen sowie den gestiegenen Anforderungen und Kosten für die Ausbildung.

Im Gegenzug gewinne die Motorsegler- und Motorflugausbildung wieder an Bedeutung, nachdem im Zuge des Swissair-Groundings von 2001 die Zahl der Schüler massiv eingebrochen sei. Die grössere Unabhängigkeit von Wetter und Hilfspersonen gegenüber dem Segelfliegen (Flugvorbereitung, Schleppdienst) mache die Fliegerei individueller und beliebter. Alle angefragten Personen rechnen mit einem weiteren Wachstum der Motorfliegerei (Kleinflugzeuge) in den nächsten Jahren.

Die Business Aviation ist stark von der Entwicklung der Weltwirtschaft abhängig und hat seit der Finanzkrise 2008 einen schweren Stand. In der Schweiz habe der Geschäftsreiseverkehr (wie international) stagniert. In Zukunft rechnen die Befragten mit einem moderaten Wachstum der Business Aviation. In Anbetracht der guten Anbindung der Schweiz ins internationale Flugliniennetz ist der Bedarf nach zusätzlichen Businessflügen eher gering einzuschätzen, sollte aber in der Nachfrageanalyse genau untersucht werden.

## Nutzung von nötigen Reserven auf geeigneten Anlagen

Nach Abklärung der Nachfrage sollten die notwendigen Kapazitäten für die Entwicklung innerhalb des Planungshorizontes des SIL bereitgestellt werden. Tendenziell ist von einer Verschiebung der Nachfrage zum einen von nichtmotorisierten zu motorisierten Fluggeräten und zum andern von Kleinflugfeldern auf Flugplätze mit befestigten Pisten auszugehen. Die höhere Flexibilität sowohl was den Betrieb als auch die Maschinen auf diesen Anlagen betrifft, führt zu einer höheren Attraktivität.

Sollten sich diese Tendenzen bestätigen, sind im SIL die nötigen Reserven auf den befestigten Anlagen zu planen und dort zu lokalisieren, wo sich eine Ausgewogenheit zwischen der Nähe zu den Nachfragern und der Minimierung der von Fluglärm belästigten Personen ergibt.

Andererseits ist zu prüfen, wie viele Anlagen der kleinsten Kategorie, der unbefestigten Flugfelder, in Zukunft effektiv benötigt werden und ob allenfalls eine Zusammenlegung von Flugplätzen bzw. deren Benutzer an wenig störenden Orten zweckmässig sein könnte.

## 6.3 Neue Kategorisierung der Schweizer Luftfahrtinfrastruktur

Die Klassifizierung der Luftfahrtinfrastrukturen in der Schweiz gemäss dem gültigen SIL ist politisch-historisch beeinflusst und folgt keinen einheitlichen, objektiven Kriterien. Dies gilt sowohl für die Einteilung in die Kategorien Landesflughafen, Regionalflugplatz, Flugfelder als auch für andere Festlegungen wie z.B. die RFF-Richtlinien für Flugplätze, welche das Feuerwehr- und Rettungswesen auf Schweizer Luftfahrtinfrastrukturen festlegt.

Im Rahmen der Fortschreibung des SIL wird empfohlen, die heutige Klassifizierung zu überarbeiten. Vorgeschlagen werden eine angepasste Kategorisierungsstruktur sowie die Einteilung der Anlagen gemäss einheitlichen Kriterien.

### 6.3.1 Begründung

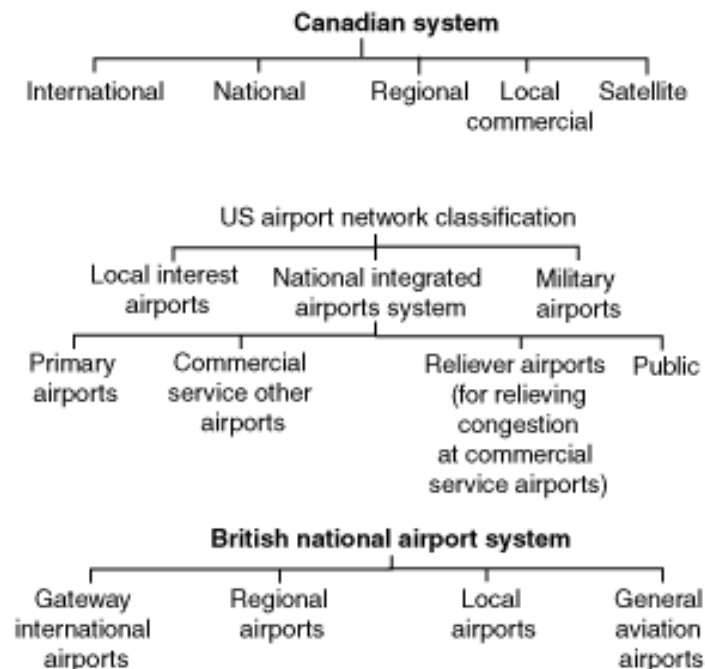
Die heutige Kategorisierung ist politisch geprägt und für Aussenstehende und ausländische Piloten nicht immer nachvollziehbar. Dass der Flugplatz St.Gallen-Altenrhein trotz Linienflugbetrieb und Business Aviation und einer Pistenlänge von 1'500m Flugfeldstatus hat, während Birrfeld praktisch ohne gewerblichem Verkehr und einer Start- und Landebahn von nur 727m Länge ein Regionalflugplatz ist, erschliesst sich nur Kennern der schweizerischen Luftfahrt. Auch die Anwendung der RFF-Richtlinien für Flugplätze in der Schweiz ist ohne das entsprechende Hintergrundwissen kaum nachvollziehbar.

Aus fachlicher Sicht ist eine nach einheitlichen Kriterien festgelegte Kategorisierung der Schweizer Luftfahrtinfrastrukturen wünschenswert.

Als wichtigstes Kriterium für die Kategoriezugehörigkeit einer Anlage ist ihre Eignung, sowohl was Grösse wie auch Zweck der auf ihr verkehrenden Flugzeuge betrifft. International ist kein einheitliches System vorherrschend. Üblicherweise sind zivile Anlagen in „Internationale Flughäfen“, „Nationale/Regionale Flughäfen“, „lokale Flughäfen“, „Geschäftsflugplätze/Business Aviation“ und „Öffentliche Flugplätze/General Aviation“ unterteilt. In den USA werden die Flughäfen nach ihrem Anteil an nationalem Passagieraufkommen kategorisiert. Die nachstehende Abbildung 24 zeigt die Einteilung in Kanada, den USA sowie Grossbritannien.

In der Schweiz existieren für die Zivilluftfahrt gemäss SIL die Kategorie der „Landesflughafen“, „Regionalflugplatz“ und „Flugfeld“. Während die Landesflughäfen durch ihre Grösse klar abgrenzbar sind, verläuft zwischen „Regionalflugplätzen“ und „Flugfeldern“ hingegen keine nachvollziehbare Grenze.

Abbildung 24 Klassifizierung von Luftfahrtinfrastrukturen in Kanada, in den USA und GB



Quelle: McGraw-Hill Dictionary of Aviation: "Airport classification"

### 6.3.2 Neue Kategorisierung

Vorgeschlagen wird die Einführung einer neuen Kategorie „Regionale Flughäfen“ sowie eine Aufteilung der heutigen Regionalflugplätze und Flugfelder nach objektiven Kriterien in die Kategorien „Regionalflughafen“, „Regionalflugplatz“ und „Flugfeld“.

Die Kategorien erhalten klare Nutzungskonzepte im Sinne einer erwünschten Hauptnutzung sowie möglicher Nebennutzungen, aber auch von nicht erwünschten Nutzungen. Durch eine klare Trennung der Aufgaben und Marktfunktion sollen sich die Luftfahrtinfrastrukturbetreiber auf ihre langfristigen Hauptnutzungen ausrichten und Investitionen zielgerichtet tätigen können.

Luftseitig soll durch einen einheitlicheren Flugzeugmix ein homogenerer Verkehrsablauf erreicht werden und die Bodeninfrastrukturen auf die der Hauptnutzung entsprechenden Flugzeuggrößen ausgerichtet werden. Landseitig ist durch die neue Einteilung in Anlagen für den öffentlichen Verkehr nach Art. 36a Abs. 1 LFG (Flughäfen mit Konzessionierungspflicht) mit den Kategorien „Landesflughafen“ und „Regionalflughafen“ klar, welche Luftfahrtinfrastrukturen ein Terminal für die Abfertigung von Passagier- und Geschäftsflugzeugen von entsprechender Kapazität bereitstellen müssen. Anlagen der Kategorien „Regionalflugplatz“ und „Flugfeld“ sind weder für Passagierverkehr noch Business Aviation vorzusehen, sondern dienen der übrigen General Aviation.



Nachstehend die Einteilung der Luftfahrtinfrastrukturkategorien nach ihrem Zweck:

Tabelle 18 Kategorisierung von Luftfahrtinfrastrukturen nach ihrem Nutzungszweck

	Zweck	Internationaler Passagierverkehr	Frachtverkehr	Kontinentaler Passagierverkehr	Business Aviation	Staats-, Rettungs-, Einsatzflüge	Dienst-, Arbeits-, Werkflüge	private Aviatik (alle Kat.)	private Kleinaviatik (Bis Kat. 1A)	Segel- und Ultraleichtaviatik	Helikopterbetrieb
Kategorie		LCV			GA						
Landesflughafen		X	X	X	x	x					
Regionalflughafen				x	X	X	x	x			x
Regionalflugplatz						x	X	X	x	x	x
Flugfeld									X	X	x
Heliport						X	X				X
Legende											
erwünschte Hauptnutzung				X							
mögliche Zusatznutzung				x							
mögliche, unerwünschte Nutzung											
unmögliche Nutzung											

Quelle: Eigene Darstellung

## Kriterien

Für die Kategoriezugehörigkeit gelten auch klare, objektive Vorgaben bzgl. der Einrichtung von Anlagen und deren Dimensionierung.

Die Kriterien ergeben sich aus der vorgesehenen Hauptnutzung und den darin üblichen Flugzeuggrössen. So ist die Dimensionierung von Pisten und Rollwegen von Landesflughäfen auf Flugzeuge der Kategorie bis 4E nach ICAO und auf Regionalflughäfen bis 3C (entspricht Mindestanforderungen für weltweiten Geschäftsreiseverkehr) auszurichten. Die Start- und Landebahn als Beispiel bedingen auf Landesflughäfen Mindestmasse von 2'800m x 45m, auf Regionalflughäfen solche von 1'400m x 30m. Regionalflugplätze für die General Aviation mit grösser-

ren Flugzeugen benötigen ebenfalls eine befestigte Piste mit Mindestmasse von 700m x 18m, um den gängigen Flugzeugen der Kat. 1 zu genügen.

Die Kriterien umfassen im Bereich Ausstattungen Mindestvorgaben für die Dimensionierung von Pisten und allfälligen Rollwegen, Einrichtungen wie Luftraumkontrolle, ILS und Befeuerung. Im Bereich Abfertigung, bestehend aus Passagieren und Betankung sind Anforderungen bzgl. der Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit der Abfertigungseinrichtungen abhängig von der Grösse der Anlage.

Tabelle 19 Möglicher Kriterienkatalog für die Kategorisierung von Schweizer Luftfahrtinfrastrukturanlagen

	Kriterien	ICAO-Code	Sicherheits-Code	min. Pistenlänge (m)	min. Pistenbreite (m)	Befestigte Piste und Rollwege	Befeuerung	Kontrollierter Luftraum	Instrumentenlandesystem		Passagierabfertigung	Kapazität > 1'000 PAX/h	Kapazität > 100 PAX/h	ÖV-Anschluss		Kerosin JET A-1	AVGAS / MOGAS	Tankkapazität 1'000 l/min	Tankkapazität > 200 l/min
Kategorie		Ausstattung									Passagiere					Betankung			
Landesflughafen		4E	9	2'800	45	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x
Regionalflughafen		3C	6	1'400	30	x	x	x	x		x		x	x		x	x		x
Regionalflugplatz		1B	1	700	18	x										x	x		
Flugfeld																	x		
Heliport																x	x		

Quelle: Eigene Darstellung

Nicht auf Grund der vorliegenden Erkenntnisse, aber möglicherweise auf Grund anderer Überlegungen, sind die Kapazität und/oder die Auslastung der Anlage als Kriterium zu betrachten. Die Kapazität ist für den Betrieb, aus technischer Sicht nicht aber für langfristige Planung, ein beschränkendes Element.

### Einteilung

Gemäss einer überschlagsmässigen Analyse der bestehenden Luftfahrtinfrastruktur in der Schweiz ergäbe sich folgende Einteilung in die angepasste Kategorisierung. Bezüglich dem ICAO-Level zu Feuerwehr und Rettungswesen und die davon abgeleitete RFF-Richtlinie wird unter Bemerkung darauf hingewiesen, sollte ein Flugplatz den für die Kategorie notwendigen Level heute noch nicht aufweisen. Da die jeweils nötige Verbesserung um eine Stufe mit verhält-

nismässigem Aufwand möglich ist, wird dies in der nachstehenden Klassifizierung nicht berücksichtigt.

Tabelle 20 Mögliche Einteilung der Schweizer Luftfahrtinfrastrukturen (Ausschnitt)

Kategorie	Luftinfrastrukturanlagen	Kanton	Bemerkung
Landesflughafen	Basel-Mulhouse		in Frankreich
	Genf-Cointrin	GE	
	Zürich-Kloten	ZH	
Regionalflughafen	Bern-Belp	BE	
	Lugano	TI	heute RFF 5, Piste 1350m
	Samedan	GR	
	Sion	VS	
	St.Gallen-Altenrhein	SG	
Regionalflugplatz	Ambri	TI	heute RFF o
	Birrfeld	AG	
	Bressaucourt	JU	
	Buochs	NW	
	Ecuvillens	FR	
	Grenchen	SO	^ bei Pistenverlängerung
	Les Eplatures	NE	
	Lausanne-La Blecherette	VD	
	Locarno	TI	
	Mollis	GL	
	Neuchâtel	NE	heute RFF o
	Raron	VS	heute RFF o
	Reichenbach	BE	heute RFF o
	Saanen	BE	
Flugfeld (befestigt)	Bad Ragaz	SG	
	Hausen am Albis	ZH	
	Kägiswil	OW	Schliessung 2016
	Münster	VS	
	Schänis	SG	
	St. Stephan	BE	
	Triengen	LU	
	Wangen-Lachen	SZ	mit Wasserflugplatz
	Yverdon-les-Bains	VD	
	Zweisimmen	BE	

Quelle: Eigene Darstellung

## 7 Literatur

- Airport Dallas/Fort Worth (2006). Security Checkpoints Improving Throughput. Dallas, TX, Airport Dallas/Fort Worth.
- Aviena, Bächtold und Moor, Ecoplan (2013). Standorte für die General und Business Aviation: Alternativen zum Flughafen Zürich. Bern, Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL.
- BAZL, Bundesamt für Zivilluftfahrt (2010). Flughafen Zürich SIL-Prozess: Schlussbericht. Bern, Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL.
- BAZL, Bundesamt für Zivilluftfahrt (2010). Richtlinie Feuerwehr- und Rettungswesen auf schweizerischen Flugplätzen. Bern, Bundesamt für Zivilluftfahrt.
- Coogan, M. A. (2008). ACRP Report 4 - Ground access to major airports by public transportation. Washington, DC, Transportation Research Board, National Research Council.
- Couluris, G. J. (1974). Capacity and Productivity Implications of En-route Air Traffic Control Automation. Washington, DC, Federal Aviation Administration.
- D-BAUG, Departement Bau, Umwelt und Geomatik (2012). Merkblatt zur Master-Arbeit. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- D'Onghia, T. (2012). ZRHpedia. Zürich, Flughafen Zürich.
- Dunlay, J. W. (1975). Analytical Models of Perceived Air Traffic Control Conflicts. Hanover, MD, Informis.
- Eidgenossenschaft (Stand 2010). Übereinkommen über die internationale Zivilluftfahrt. Bern, Schweizerische Eidgenossenschaft.
- Fan, L. S. H. (1988). Simulation of Aircraft Movement in the Terminal Airspace. London, Taylor & Francis.
- Favey, L. (2013). Fast Time Simulation of Airspace Capacity (Bern TMA). Genève, Skyguide Ltd.
- Fisher, L. (2012). ACRP Report 79 - Evaluating airfield capacity. Washington, DC, Transportation Research Board, National Research Council.
- Hansen, M. M.; Gosling, G. D.; Margulici, J.-D.; Wei, W.-B. (2001). Influence of Capacity Constraints on Airline Fleet Mix. Berkeley, CA, Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley.
- Hedwiger, I.; Buff, S. (2008). Self Check-in bei Flugreisen: Bordkarte Marke Eigenbau. Zürich, Netzmedien AG.
- Holawe, K. L. (2010). Komplexitätsfaktoren in der Flugsicherung und ihre Auswirkungen auf die Arbeitsleistung von Planungsloten. Wien, Universität Wien.
- Horonjeff, R.; McKelvey F. X. (1983). Planning and design of airports. New York, NY, McGraw-Hill.

- ICAO, International Civil Aviation Organization (1996). Rules Of The Air and Air Traffic Services. Montreal, QC, International Civil Aviation Organization.
- ICAO, International Civil Aviation Organization (2006). Aerodrome design manual. Montreal, QC, International Civil Aviation Organization.
- ICAO, International Civil Aviation Organization (2007). Air Traffic Management. Montreal, QC, International Civil Aviation Organization.
- ICAO, International Civil Aviation Organization (2009). Aerodromes: Annex 14 Volume I. Montreal, QC, International Civil Aviation Organization.
- Intraplan Consult GmbH (2003). Verlängerung der Start- und Landebahn Flughafen Frankfurt-Hahn. München, Flughafen Frankfurt-Hahn GmbH.
- Janic, M. (1982). Terminal Airspace Capacity Model. Amsterdam, Elsevier Ltd.
- Janic, M. (1989). Terminal Area Capacity Model - A Problem Concerning Air Traffic Controllers Workload. London, Taylor & Francis.
- Janic, M. (2000). Air transport system analysis and modelling - Capacity, Quality of Services and Economics. Amsterdam, Gordon and Breach.
- Janic, M. (2009). Airport analysis, planning, and design - Demand, Capacity and Congestion. New York, NY, Nova science.
- LFG (Stand 2012). Bundesgesetz über die Luftfahrt (Luftfahrtgesetz, LFG). Bern, Schweizerische Eidgenossenschaft.
- Newell, G. F. (1979). Airport capacity and delays. Baltimore, MA, Operations Research Society of America.
- Odoni, R. A.; Simpson, W. R. (1979). Review and Evaluation of National Airspace System Models. Washington, DC, Federal Aviation Administration.
- Peoples (2013). Unternehmensvision. Altenrhein  
[www.peoplesbusinessairport.ch/businessairport/vision/](http://www.peoplesbusinessairport.ch/businessairport/vision/)
- Quick, C. (2012). The Plan to Make Air Travel Security a Breeze. Dallas, TX, FareCompare.  
<http://www.farecompare.com/travel-advice/the-plan-to-make-air-travel-security-a-breeze/>
- Reis, H. (2013). Immer weniger Segelflieger - Starkes Nachlassen des Interesses in der Schweiz. Artikel der Neue Zürcher Zeitung vom 30. Mai 2013. Zürich, NZZ Mediengruppe.
- Homeland Security Research. (2009). Schiphol Airport Security - New Screening Technologies Designed to Improve Passenger and Luggage Screening. Washington, DC.  
<http://www.homelandsecurityresearch.com/2009/04/schiphol-airport-security-new-screening-technologies-designed-to-improve-passenger-and-luggage-screening/>
- TAC, Roads and Transport Association of Canada (1980). Guide for the planning of small airports. Ottawa, ON, Transportation Association of Canada.
- Trani, A. A. (2009). Analysis Of Air Transportation Systems. Blacksburg, VA, Virginia Tech.

TRB, Transportation Research Board (1987). Measuring airport landside capacity. Washington, DC, Transportation Research Board, National Research Council.

VRR (Stand 2011). Verordnung des UVEK über die Verkehrsregeln für Luftfahrzeuge (VVR). Bern, Schweizerische Eidgenossenschaft.

Wells, A. T.; Young S. B. (2004). Airport planning and management. New York, NY, McGraw-Hill.

Wikipedia:

- S. 29        [www.wikipedia.org/Verordnung](http://www.wikipedia.org/Verordnung) (Zugriff: 18. März 2013)
- S. 47/48    [www.wikipedia.org/Flughafen\\_München](http://www.wikipedia.org/Flughafen_Muenchen) (Zugriff: 10. Juni 2013)
- S.47        [www.wikipedia.org/Flughafen\\_Heathrow](http://www.wikipedia.org/Flughafen_Heathrow) (Zugriff: 10. Juni 2013)
- S.48        [www.wikipedia.org/Flughafen\\_Zürich](http://www.wikipedia.org/Flughafen_Zuerich) (Zugriff: 10. Juni 2013)
- S. 52        [www.wikipedia.org/Flugbenzin](http://www.wikipedia.org/Flugbenzin) (Zugriff: 5. April 2013)

## Anhang

- A    Modellanleitung
- B    Modellillustration
  - B-1   Kapazitätsmodell - Struktureller Aufbau
  - B-2   Modellteil Eignung / Charakteristik
  - B-3   Modellteil Luftseitig
  - B-4   Modellteil Landseitig
- C    Modellanwendung
  - C-1   Kapazitätsmodell Ausgangszustand
  - C-2   Kapazitätsmodell Fallbeispiel Bern-Belp
  - C-3   Kapazitätsmodell Fallbeispiel St.Gallen-Altenrhein
  - C-4   Kapazitätsmodell Fallbeispiel Birrfeld
  - C-5   Kapazitätsmodell Fallbeispiel Buttwil
  - C-6   Kapazitätsmodell Fallbeispiel Speck-Fehraltorf

## 8 Modellanleitung

Das Excel-File des Kapazitätsmodells ist wie folgt aufgebaut:

Tabelle 21 Aufbau des Excel-Modells

Tabellenblatt	Funktion
Resultate	Zusammenfassende Darstellung der Charakteristik, Eignung, Kapazität Luftseitig inkl. Diagramm, Kapazität Landseitig sowie der Auslastung
Eingabe Charakteristik	Auswahl oder manuelle Werteingabe zu den Eigenschaften der Anlage
Eingabe Flugzeuge	Eingabe der Anteile und Charakteristika der verkehrenden Flugzeuge
Berechnung Kapazitäten	Berechnung der Kapazitäten der Subsysteme sowie der Betriebsdauer
Berechnung Belegung	Berechnung der Umweltfaktoren, Belegzeiten Start, Landung und Rollwege
Matrizen Kapazitäten	Matrizen zur Wahrscheinlichkeits- und Zeitbedarfsberechnung Start, Landung
Abstände Anflug Abflug	Aufstellung der einzuhaltenden Separationen im An- und Abflug
Berechnung Betriebszeit	Betriebszeitberechnung pro Kalendertag abhängig von Umweltbedingungen
Bern	Dämmerungszeiten und Meteodaten von Bern-Belp
Genf	Dämmerungszeiten und Meteodaten von Genf-Cointrin
Lugano	Dämmerungszeiten und Meteodaten von Lugano-Agno
Sion	Dämmerungszeiten und Meteodaten von Sion
St.Gallen	Dämmerungszeiten und Meteodaten von St.Gallen-Altenrhein
Zürich	Dämmerungszeiten und Meteodaten von Zürich-Kloten
Flugzeugklassifizierung	Aufstellung der ICAO-Codierung sowie Flugzeugdaten

Quelle: Eigene Darstellung

In der Anwendung ist als erstes das Tabellenblatt Charakteristik und im Anschluss das Tabellenblatt Flugzeuge auszufüllen. Das Excel-File passt mittels VBA die Darstellung und Auswahlmöglichkeiten in den Tabellenblättern je nach Auswahl und Eingaben an. Danach sind die Resultate der Kapazitätsmodellierung im Tabellenblatt Resultate sichtbar.

### 8.1 Umwelt

#### 8.1.1 Recht

Unterliegen die Betriebszeiten der zu modellierenden Luftfahrtinfrastruktur durch lokales Recht weitergehenden Beschränkungen, so ist unter der [Auswahl Lokale Einschränkungen der](#)



**Betriebszeit?** „Ja“ zu wählen. In den erscheinenden Feldern sind die geltenden Betriebszeiten pro Wochentag manuell einzugeben. Bestehen keine Einschränkungen bzw. wird „Nein“ gewählt, berechnet das Modell die gesetzlichen Betriebszeiten von Montag bis Sonntag; 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr.

Bei der Eingabe ist zu beachten:

- Die Zeiten sind im Format XX:XX einzugeben.
- Existiert keine Mittagspause, können die Felder **Ende VM** (Vormittag) und **Beginn NM** (Nachmittag) leer gelassen werden
- Gelten für den Betriebsbeginn und/oder das Betriebsende die bürgerliche Dämmerungszeit, sind am Morgen 06:00 bzw. am Abend 22:00 einzutragen und unter dem Kapitel Start-/ Landebahn (Runway) in der **Auswahl Befeuerung?** „Nein“ zu wählen. Das Modell berechnet so die bürgerliche Tageszeit als Betriebsdauer.

Bestehen lokale Betriebsbeschränkungen spezifisch an Feiertagen, ist unter der **Auswahl Lokale Einschränkungen an Feiertagen?** „Ja“ zu wählen und in der erscheinenden **Auswahl Konfession am Flugplatzstandort?** die Konfession zu bestimmen. Wird „Reformiert“ gewählt, werden die allg. nationalen Feiertage als solche ins Modell gerechnet, wird „Katholisch“ gewählt, gelten zudem die katholischen Feiertage wie Maria Himmelfahrt oder Allerheiligen als solche. Für die Feiertage ist die entsprechende Betriebszeit manuell einzugeben.

### 8.1.2 Meteorologie

Im Kapitel Meteorologie ist die **Höhenlage?** des Flugplatzes in Meter über Meer einzugeben. Das Modell berechnet daraus die Auswirkungen automatisch.

Da die meteorologischen Daten nicht für jeden einzelnen Flugplatzstandort erfasst sind oder mit verhältnismässigem Aufwand zu erfassen wären, ist eine Datenbank mit allen relevanten Parametern (Dämmerungszeiten, Temperaturen, Schneetage, Regentage, Tage mit ungenügenden Sichtverhältnissen sowie Windverhältnisse) für sechs Schweizer Städte im Modell implementiert. In der Auswahl **Nächstgelegene Stadt?** ist die dem zu untersuchenden Flugplatzstandort nächste oder meteorologisch ähnlichste Stadt zu wählen. Zur Auswahl stehen: (für Kantone mit Landesflughafen, Regionalflugplatz, Militärflugplatz und Flugfeld)

- Bern (Kantone Bern, Fribourg, Neuenburg, Jura, Solothurn, Luzern, Ob-/ Nidwalden)
- Genf (Kantone Genf, Waadt)
- Lugano (Kantone Tessin, Graubünden (Südbünden))
- Sion (Kanton Wallis)
- St.Gallen (Kantone St.Gallen, Thurgau, Glarus)
- Zürich (Kantone Zürich, Aargau, Basel-Stadt, Schwyz)

**ACHTUNG:** Je nach Rechenleistung des Computers benötigt die im Hintergrund laufende Betriebstagberechnung mehrere Sekunden, in denen das Programm stocken kann!

In Kombination mit der Eingaben der [Höhenlage?](#) und der [Ausrichtung der Start-/Landebahn?](#) sowie der Auswahl [Hauptstartrichtung?](#) im Kapitel Start-/ Landebahn berechnet das Modell sodann die Umweltfaktoren Höhenlage, Wind und Temperatur für die Kalkulation der Startzeit sowie die Anzahl Betriebstage oder -stunden je nach Charakteristik der Anlage (Belag, Befeuerung, ILS).

## 8.2 Eingabe Charakteristik - Landseitige Infrastruktur

### 8.2.1 Erschliessung allgemein

Unter [Modal Split?](#) ist der Anteil des ÖV am gesamten Passagierverkehrsaufkommen in ganzen % einzugeben. Den Anteil des MIV berechnet das Modell ergänzend. Verfügt eine Luftfahrtinfrastruktur über keinen ÖV-Anschluss in Fusswegdistanz (Distanz Haltestelle - Terminal >500m), ist „0“ einzutragen. Die Distanz von 500m ist eine Empfehlung begründet in der Annahme, dass Reisende Gepäck auf sich tragen und eine Laufstrecke von mehr als 500m ausserhalb des Flughafens als nicht zumutbar beurteilen. Situationsbezogen kann der Anwender aber auch weiter entfernte ÖV-Stationen miteinbeziehen.

### 8.2.2 Erschliessung Öffentlicher Verkehr

Ist der ÖV-Anteil > 0, öffnet das Modell das Unterkapitel ÖV. Unter der Auswahl [Direkter Bahnanschluss vorhanden?](#) ist „Ja“ zu wählen, wenn sich der nächste Bahnhof in Fusswegdistanz vom Terminal befindet. Wird „Ja“ gewählt, fragt das Modell nach der Anzahl [Bahnlinien in Hauptreiserichtung?](#) Im Allgemeinen sind all jene Linien zu berücksichtigen, welche in die Stadt fahren, zu welcher die Luftfahrtinfrastruktur gehört. Ist die Hauptreiserichtung nicht eindeutig, als Beispiel der Flughafen Zürich (Zürich bzw. Winterthur-St.Gallen), sind Linien in beide Richtungen zu zählen. Als Bahnlinien gelten alle getakteten Verbindungen gleicher Bezeichnung (S-Bahnen, IC, IR etc.).

Abhängig von der eingegebenen Anzahl relevanter Linien sind in den vom Modell eingeblendeten Zeilen unter [Abfahrten in Hauptreiserichtung?](#) die Anzahl Fahrten pro Stunde, unter [Platzzahl pro Zugseinheit?](#) die durchschnittliche Gefässgrösse (Sitzplätze) pro Zugseinheit der Linie sowie unter [Auslastung pro Zugseinheit?](#) der durchschnittliche Besetzungsgrad pro Zugseinheit einzutragen, welche diese bei Ankunft an der Station Flughafen aufweist. Diese Eingaben sollten für jede Linie separat eingetragen werden. Die entsprechenden Daten sind bei den zuständigen Transportunternehmen zu erhalten.

Analog zum Bereich Bahnanschluss ist die Eingabe für den Bereich Bus zu handhaben. Die Anleitung entspricht den vorangegangenen zwei Absätzen zum Bahnanschluss.

### 8.2.3 Erschliessung Motorisierter Individualverkehr

Im Unterkapitel MIV ist für die Berechnung der Vorfahrtskapazität unter [Länge der Vorfahrt?](#) die für das Ein- und Aussteigen lassen und die für Taxis zur Verfügung stehende Kantenlänge sowie allfällige Kurzzeitparkplätze in Meter einzugeben. Unter [Parkplätze exkl. Kurzzeitparkplätze?](#) ist die Summe aller normalen und Langzeitparkplätze einzugeben.

### 8.2.4 Terminal Abflug

Wie unter dem Titel geschrieben steht, ist im Unterkapitel Abflug der direkte Weg zwischen der Ankunft am Terminal per ÖV oder MIV, dem Check-In-Bereich und von dort zur Sicherheitskontrolle zu betrachten.

Unter [Breite des schmalsten Durchganges?](#) ist die auf diesem Pfad engste, hindernisfreie Breite zu messen, die als eigentlicher Flaschenhals die Kapazität der Korridore und Durchgänge bestimmt. In der Auswahl [Höhenunterschied \(> 2m\) vorhanden?](#) ist „Ja“ zu wählen, wenn auf dem direkten Weg Treppen, Rolltreppen oder Lifte unumgänglich sind. Bei kleinen Höhenunterschieden wird angenommen, dass diese mittels Rampen überwunden werden. „Nein“ soll auch dann gewählt werden, wenn zwar grosse Höhenunterschiede (>2m) bestehen, diese aber ohne Umweg über Rampen bewältigt werden können. Wird „Ja“ gewählt, blendet das Modell [Roll-/Treppen an schmalster Stelle?](#) ein. Hier ist die Anzahl Treppen und/oder Rolltreppen einzutragen, welche auf dem Pfad durchgehend mindestens zur Verfügung stehen. Wenn z.B. an mehreren Höhenunterschieden mal 3, dann 2 und schliesslich 4 Treppen/Rolltreppen vorhanden sind, ist demnach 2 einzutragen. Das Modell fragt in diesem Fall auch nach der [Breite der Rolltreppen?](#) In dieser Auswahl ist zwischen 0.8m und 1.0m Breite zu wählen, was den gängigsten Rolltreppentypen entspricht.

Sodann ist unter [Check-In-Schalter / Anmeldeschalter?](#) die Anzahl Schalter inkl. Automaten einzutragen, welche im Check-In-Bereich zur Verfügung stehen. Unter [Sicherheitskontrollen?](#) ist die Anzahl Bahnen bei der Sicherheitskontrolle zu zählen und einzutragen.

### 8.2.5 Terminal Ankunft

Im Unterkapitel Ankunft ist in der Auswahl [Gepäckbänder vorhanden?](#) „Ja“ zu wählen, wenn die Gepäckausgabe über ein Gepäckband erfolgt. Bei manueller Ausgabe an einem Schalter oder am Flugzeug direkt ist „Nein“ zu wählen. Sind Gepäckbänder vorhanden, ist in der nun eingeblendeten Zeile deren Anzahl einzugeben. Ansonsten ist die Anzahl manueller Gepäckausgaben einzugeben.

Das Modell verwendet all diese Eingaben direkt zur Berechnung der jeweiligen Teilkapazitäten in der Tabelle Berechnung Kapazität. Relevant ist schliesslich die geringste Einzelkapazität für Abflug oder Ankunft.

## 8.3 Eingabe Charakteristik - Luftseitige Infrastruktur

### 8.3.1 Flugsteig

Unter [Grösse der Wartebereiche?](#) ist die Fläche in m<sup>2</sup> einzutragen, welche den Fluggästen nach Passieren der Sicherheitskontrolle zur Verfügung stehen. Nicht miteingerechnet werden sollten Hauptkorridore, Toiletten sowie allfällige Verkaufsflächen. Unter der Auswahl [Boardingschalter pro Standplatz?](#) ist zwischen „1“, „2“, „>2“ zu wählen. Die Kapazität Boardingschalter wird für 1 mit 10PAX/Min., für 2 und >2 mit 18PAX/Min. ins Modell geladen, da flugzeugseitig in aller Regel keine höhere Kapazität erreicht werden kann. Falls doch mehr als 20PAX/Min. erreicht werden, könnte dies im Modell nachträglich für die Auswahl >2 entsprechend korrigiert werden.

### 8.3.2 Abfertigung

Die Abfertigung beschränkt sich im Modell auf die Betankung. So ist die Anzahl verfügbarer [Tankanlagen \(mobil oder fest\)?](#) einzugeben. Unter [Tankleistung pro Anlage?](#) ist die Füllmenge pro Minute einzugeben. Das Modell multipliziert daraus die Kapazität Betankung. Sollten die Tankanlagen unterschiedliche Leistungen aufweisen, so ist der Durchschnittswert einzutragen. Auf die Kapazität pro Stunde bzw. pro Jahr hat dies keinen relevanten Einfluss.

Unter [Tankvolumen grösste Anlage?](#) ist das Fassungsvermögen der grössten Tankanlage (LKW oder Erdtank), ab welchem Flugzeuge direkt betankt werden können in Litern einzutragen. Reicht dieses nicht aus, ein Flugzeug der grössten Kategorie in einem Mal zu betanken, erscheint in der Tabelle Berechnung Kapazitäten hinter Versorgung der Vermerk: „Achtung: Teilweise mehrere Tankvorgänge nötig!“ Da dieser Fall jedoch sehr selten eintritt, wird er in der weiteren Modellberechnung nicht als kapazitätsbestimmend betrachtet.

### 8.3.3 Pisten

Unter [Länge der Start-/ Landebahn?](#) ist die Länge der Hauptpiste in Meter und unter [Breite der Start-/ Landebahn?](#) die Breite der Hauptpiste in Meter einzutragen. Die entsprechenden Längen- und Breitencodes werden automatisch generiert. Unter der Auswahl [Oberfläche der Start-/ Landebahn?](#) ist zwischen „befestigt (Asphalt, Beton)“ und „unbefestigt (Gras, Schotter)“ zu wählen. Wird „befestigt (Asphalt, Beton)“ gewählt, fragt das Modell nach dem [Maximalen Raddruck?](#), also der Tragfähigkeit, welche im Format X.X manuell einzugeben ist. Die entsprechende Tragfähigkeitsklasse wird dementsprechend generiert. Wird „unbefestigt (Gras, Schotter)“ gewählt, nimmt das Modell 0.5 als maximalen Raddruck bzw. die tiefste Tragfähigkeitsklasse Z an. Unter [Ausrichtung der Start-/ Landebahn?](#) ist die östliche Abweichung von Norden in Grad einzugeben. Das Modell generiert die entsprechende Pistenbezeichnung. In der Auswahl [Hauptstartrichtung?](#) ist die vorherrschende, d.h. mehrheitlich im Betrieb angewandte Startrichtung zu wählen. Aus dieser Angabe wird mit den in der Datenbank hinterlegten Winddaten der Umweltfaktor Wind für die Starts auf der Start-/ Landebahn berechnet. Zuletzt ist

unter der Auswahl **Befeuerung?** „Ja“ zu wählen, wenn eine Pisten- und Rollwegbefeuerung vorhanden ist, andernfalls ist „Nein“ zu wählen. Wird „Ja“ gewählt, gelten als Betriebszeiten auch diejenigen Stunden, welche vor der bürgerlichen Morgen- bzw. nach der bürgerlichen Abenddämmerung, aber noch innerhalb der gewählten oder eingetragenen Betriebszeit liegen. Bei „Nein“ sind die bürgerlichen Dämmerungszeiten betriebszeitrelevant.

### 8.3.4 Rollwege

Unter der Auswahl **Parallelrollweg zur Piste vorhanden?** ist „Ja“ zu wählen, wenn in ausreichendem Abstand zur Start- und Landebahn ein Rollweg die Piste zu mindestens 3/4 erschliesst, d.h. wenn Abrollwege über 75% der Pistenlänge verteilt sind und mindestens ein Pistenende über einen Abrollweganschluss verfügt. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, wird „Nein“ gewählt. Das Modell rechnet in diesem Fall damit, dass sowohl startende wie landende Flugzeuge die Start- und Landebahn bis zur Hälfte als Rollweg nutzen und nach der Landung bzw. vor dem Start auf der Piste wenden, was die Belegungszeit in Abhängigkeit der Pistenlänge erhöht.

Unter **Länge des Hauptrollweges?** ist die Distanz zwischen dem Vorfeldende bzw. dem Rollweganfang und der Warteposition vor dem Start in Hauptstartrichtung in Metern einzugeben. Das Modell errechnet daraus die Belegung Rollweg und daraus wiederum die Kapazität Rollweg. In der Auswahl **Kreuzen stellenweise möglich?** ist dann „Ja“ zu wählen, wenn:

- Das Kreuzen im Verlaufe der oben angegebenen Rollweglänge möglich ist
- In der, vom Start aus gesehen, ersten Pistenhälfte weitere Abrollwege vorhanden sind, über welche landende Flugzeuge bei entgegengesetzter Anflugrichtung die Piste ungehindert (vom startenden Flugzeug) verlassen können.

Wird „Ja“ gewählt, geht das Modell davon aus, dass sich Flugzeuge auf den Rollwegen nicht kapazitätsrelevant behindern. Wird „Nein“ gewählt, verlängert sich die Belegung des Rollweges eines Flugzeuges um die Zeit, welche es warten muss, bis die entgegenkommende Maschine den Rollweg nicht mehr belegt. Davon ausgehend, dass sich alle Piloten an die Geschwindigkeitsvorgaben halten, also um die Rollzeit auf dem Rollweg abhängig von dessen Länge.

### 8.3.5 Vorfeld und Standplätze

Unter **Standplätze für Passagierabfertigung?** ist die Anzahl Plätze einzutragen, welche für Passagierflugzeuge mit Fluggästen vorgesehen und ausgerüstet sind. Bei kleineren Luftfahrtinfrastrukturen können als solche diejenigen Plätze um das Terminalgebäude betrachtet werden, welche ohne Querung eines Vorfeldrollweges zu erreichen sind und welche genügend gross sind, um das grösste zugelassene Passagierflugzeug auf der Anlage hindernisfrei zu parken. Die Anzahl, welche unter **Standplätze für Flugzeuge allgemein?** eingetragen werden soll, umfasst alle übrigen Stellplätze, d.h. exkl. Standplätze für Passagierabfertigung. Ihre Anzahl wird im Modell als absoluter Wert ohne Einfluss auf die Kapazität pro Zeiteinheit behandelt.

Unter **Breite des Vorfeldes exkl. Standplätze?** ist die Breite des Vorfeldes bis zur Begrenzungslinie der Standplätze in Metern einzutragen. Unterschreitet die Eingabe einen Wert abhängig vom Breiten-Code, zeigt das Modell „Vorfeld als Vorfeldrollweg betrachten! (Länge weg)“ an. Die Länge des Hauptvorfeldrollweges ist dann manuell der Rollweglänge zuzurechnen.

### 8.3.6 An- / Abflüge

Im Kapitel Luftraum bestehen die Unterkapitel Anflug (Approach) und Abflug. Im Unterkapitel Anflug ist unter **Länge des ordentlichen Endanflugs?** die Distanz zwischen dem Final Approach Fix (FAF) und dem Pistenanfang in Meter einzugeben. Existiert kein FAF bzw. wird primär nach Volten geflogen, so ist die Länge einer halben Platzrunde (Volte) als Endanflug auszumessen. Das Modell rechnet zur Eingabe ein Zuschlag bis zum Aufsetzpunkt in Abhängigkeit der Pistenlänge hinzu. Für den Längencode 1 beträgt dieser 150m, für Code 2 250m, für Code 3 300m und für Code 4 400m, da gemäss (ICAO 2006) die Landemarkierungen auf den Start- und Landebahn in diesen Abständen vom Pistenanfang markiert werden müssen.

In der Auswahl **Instrumentenlandesystem vorhanden?** ist „Ja“ oder „Nein“ zu wählen. Das Modell berechnet bei „Ja“ die Zeiten vor bzw. nach der bürgerlichen Abenddämmerung zu den Betriebsstunden hinzu (sofern diese nicht durch die rechtlichen Betriebszeiten ausgeschlossen sind). Ausserdem wird angenommen, dass wenn „Ja“ gewählt wird, das ILS auch in Betrieb ist. Dadurch werden die restriktiveren Abstandsregelungen gemäss IFR betriebsrelevant und ins Modell gerechnet.

In Unterkapitel Abflug ist in der Auswahl **Vorgegebene Abflugroute?** „Ja“ zu wählen, wenn Abflugrouten pro Startrichtung vorgegeben sind. Unter **Länge der Abflugroute?** ist die Distanz in Meter bis zu dem Wegpunkt zu messen, an welchem sich die vorgegebenen Abflugrouten teilen oder zu Ende sind. Bei Volten ist die Distanz bis zur ersten „ordentlichen“ Abzweigmöglichkeit aus der Platzrunde einzutragen. Das Modell berechnet aus den Eingaben die Abflugzeiten pro Flugzeugtyp. Wenn es sich nicht um sehr lange Abflugrouten handelt (> 5km), sind die Eingaben im Modell i.d.R. ohne Auswirkungen, da dann die Zeitabstände beim Abflug als minimierender Kapazitätsfaktor zum Tragen kommen.

### 8.3.7 Kontrollierte Lufträume

Im Unterkapitel Kontrollierter Luftraum CTR des Kapitels Luftraum ist in der Auswahl **Flugplatz mit Flugsicherung?** „Ja“ zu wählen, wenn der Luftraum des Flugplatzes als CTR ausgewiesen ist resp. die An- und Abflüge von einer Flugverkehrskontrolle koordiniert werden. Das Modell benötigt in diesem Fall die Eingabe der Sektorkapazität. Dies sollte die Kapazität des Anfluges (Approach, APP) oder Abfluges (Departure, DEP) sein, welche üblicherweise bestimmt werden. Sollte ein anderer Sektor limitierend sein, sollte dessen Wert eingegeben werden. Unter **Anteil Instrumentenflüge IFR?** ist der entsprechende Anteil einzutragen. IFR-Flüge werden mit 1.0, VFR-Flüge mit 0.5 gewichtet, da VFR-Flüge rund die Hälfte an Arbeitskonzentration und -

aufwand generieren. Unter [Anteil professioneller Piloten?](#) fallen all jene, welche regelmässig und/oder kommerziell fliegen, die verschiedenen Procedures kennen und eine hohe Funkdisziplin haben. Auszubildende und Hobby- bzw. „Sonntagspiloten“ generieren bei der Flugsicherung einen Mehraufwand und reduzieren dementsprechend die Kapazität des Luftraumes. Das Modell rechnet die Anzahl möglichen Bewegungen auf Grund der eingegebenen Parameter hoch und multipliziert sie mit dem Faktor zwei, da die Sektorkapazität jeweils für den Anflug oder Abflug angenommen ist. Wäre dies nicht der Fall, ist dies im Modell manuell zu korrigieren.

## 8.4 Eingabe Flugzeuge

Die Eingabe Flugzeug ist ein eigenes Tabellenblatt im Excel-Modell.

### 8.4.1 Flächenflugzeuge

Im Kapitel Anteile der auf dem Flugplatz verkehrenden Flächenflugzeuge ist unter [Segelflugzeuge vorhanden?](#) „Ja“ zu wählen und die entsprechenden Anteile in % manuell einzugeben, wenn auf einem Flugplatz Segelflugbetrieb herrscht. Unter [Motorflugzeuge vorhanden?](#) gilt dies gleichredend. Abhängig von den Eingaben im Tabellenblatt Eingabe Charakteristik werden nur die jeweils möglichen Flugzeugtypen auf einer Luftfahrtinfrastruktur zur Auswahl angezeigt. Die Summe der eingegebenen Anteile muss 100% ergeben, was durch ein Kontrollfeld am Ende der Auflistung durch eine grüne Hinterlegung angezeigt wird. Hubschrauber sind bei der Anteilsberechnung wegzulassen.

### 8.4.2 Flugverkehr

Im Kapitel Flugverkehr auf dem Flugplatz ist unter [Anzahl Flugbewegungen im Vorjahr?](#) die totale Anzahl inkl. Hubschrauberbewegungen einzugeben. Diese Eingabe dient zur Berechnung der Auslastung. In der [Auswahl Hubschrauberbetrieb?](#) ist „Ja“ zu wählen, wenn auf dem Flugplatz Hubschrauberbewegungen statistisch erfasst sind. In diesem Fall öffnet sich die [Auswahl Unabhängige An-/ Abflugroute?](#) Es ist nur dann „Ja“ auszuwählen, wenn der Helikopterflugbetrieb ohne Kreuzung bzw. Beeinflussung von An- oder Abflugrouten inkl. der Volten von Flächenflugzeuge erfolgen kann. Wenn eine gegenseitige Beeinflussung vorhanden ist oder die Hubschrauber gar über die gleichen Routen und Volten fliegen (Auswahl „Nein“), werden diese wie Flächenflugzeuge behandelt. Kann der Betrieb für Hubschrauber unabhängig abgewickelt werden, fragt das Modell nach der [Anzahl Hubschrauberbewegungen?](#), welche dann bei der Auslastungsberechnung in Abzug gebracht werden.

### 8.4.3 Beschleunigungs-/ Bremsvermögen

Im diesem Kapitel sind die Eingaben für die Werte [durchschnittliche Bremsverzögerung?](#), [Beschleunigungsvermögen Rollen?](#) und [Beschleunigungsvermögen Start?](#) bereits eingetragen und mit einem Kommentar versehen. Diese sollen nur geändert werden, wenn die Standard-

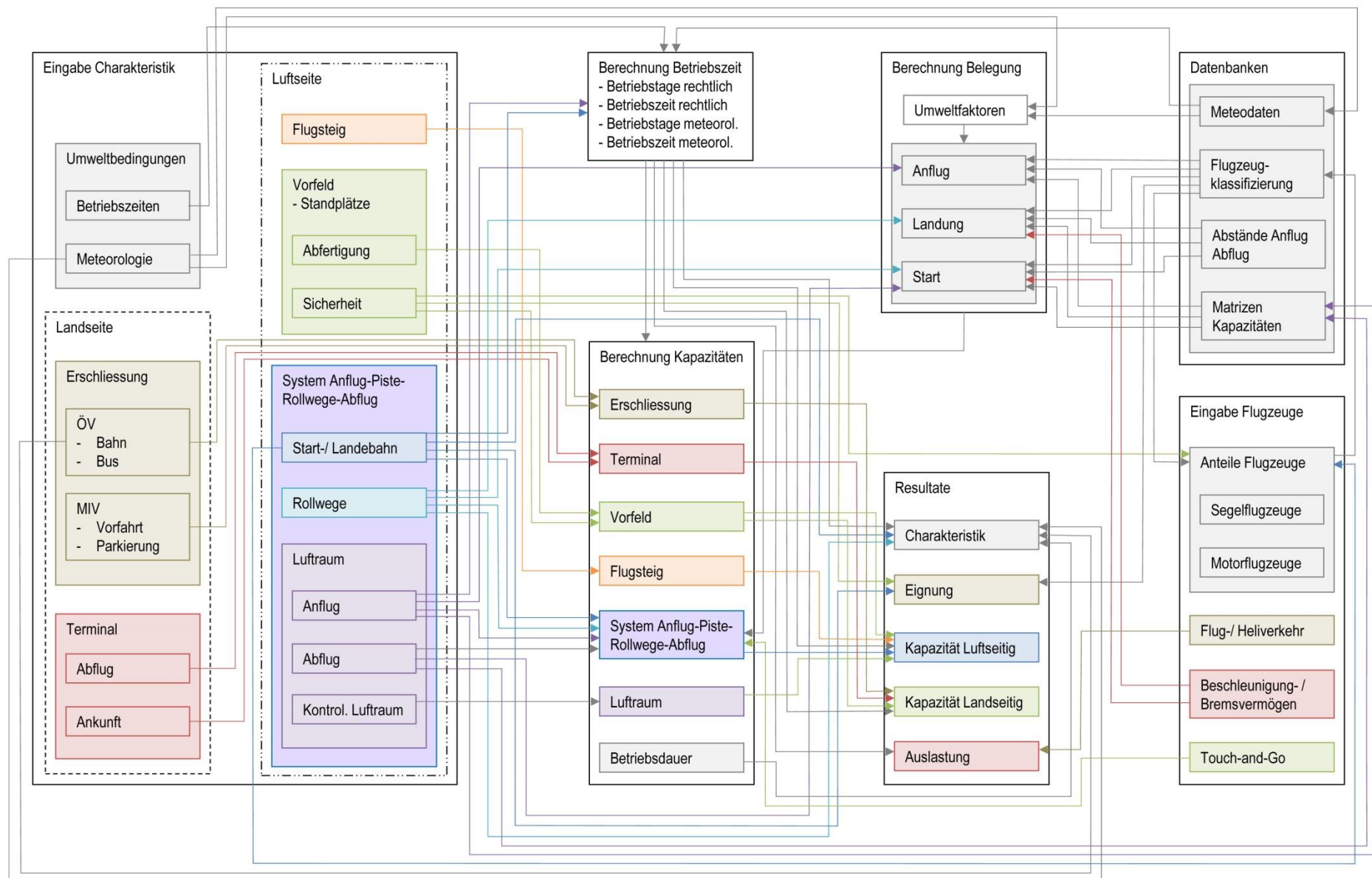
werte nicht mit den auf der Anlage verkehrenden Flugzeugen übereinstimmen. Die Werte werden für die Berechnung der Belegung von Start- und Landebahn und Rollwegen verwendet.

#### **8.4.4 Touch-and-Go**

Das letzte Kapitel ist Anteil Touch-and-Go-Manöver. Unter [Anteil Anflüge ohne Landungen?](#) ist der geschätzte Anteil dieser Schulungsmanöver in Prozent einzutragen, bei welchen nach einem Landeanflug (mit oder ohne Aufsetzen) durchgestartet wird.



## Kapazitätsmodell – Struktureller Aufbau



## Modellteil Charakteristik / Eignung

### Flugzeuge

#### Flugzeugkategorien

Anteile der auf dem Flugplatz verkehrenden Flugzeugkategorien

Segelflugzeuge vorhanden?  
[ja] {xx%}

Kat. 1A1s (13,5m-Klasse) {xx%}

Kat. 1B1s (15m / 18m-Klasse) {xx%}

Kat. 1C1s (offene Klasse) {xx%}

[nein]

Motorflugzeuge vorhanden?  
[ja]

wenn Codenummer 1 {xx%}

Kat. 1A1a (Cessna 172, Piper PA-12) {xx%}

Kat. 1A2b (Beechcraft Baron 58) {xx%}

Kat. 1B2b (Cessna 402) {xx%}

Kat. 1B3a (Pilatus PC-12, Dornier 228) {xx%}

Kat. 1C5a (De Havilland DHC 7) {xx%}

wenn Codenummer 2 zusätzlich {xx%}

Kat. 2B3b (Cessna 525 CitationJet) {xx%}

Kat. 2C4b (ATR 42-500) {xx%}

Kat. 2C5a (De Havilland DHC 8-300) {xx%}

Kat. 2C5b (ATR 72-500) {xx%}

wenn Codenummer 3 zusätzlich {xx%}

Kat. 3A3c (Learjet 54 / 55 / 56) {xx%}

Kat. 3A3d (Learjet 35 / 36) {xx%}

Kat. 3B4c (Dassault Falcon 900) {xx%}

Kat. 3B5d (Bombardier CRJ 200 / 300) {xx%}

Kat. 3B6c (Embraer 145) {xx%}

Kat. 3C5b (Fokker 50) {xx%}

Kat. 3C5c (SAAB 340 / 2000) {xx%}

wenn Codenummer 4 zusätzlich {xx%}

Kat. 4C6c (Fokker 100) {xx%}

Kat. 4C7d (Airbus A320, Boeing 737) {xx%}

Kat. 4D7c (Airbus A310) {xx%}

Kat. 4D8d (Boeing 767, MD-11) {xx%}

Kat. 4E9c (Airbus A330) {xx%}

Kat. 4E9d (Airbus A340, Boeing 777) {xx%}

Kat. 4F9c (Airbus A380) {xx%}

[nein]

Summe muss = 100% sein

#### Beschleunigungs- und Bremsvermögen

Durchschnittliche Bremsverzögerung?  
{X.Xm/s²}

Durchschnittliches Beschleunigungsvermögen?

Rollen  
{X.Xm/s²}

Starten  
{X.Xm/s²}

### Sicherheit

#### Feuerwehr- / Löschfahrzeuge

Anzahl Löschfahrzeuge?  
{X}

1 Rescuecode 1 - 5

2 Rescuecode 6 - 7

3 - 9 Rescuecode 8 - 10

Löschwasserleistung pro Fahrzeug?  
{XXXX l/min}

Löschleistung = Anzahl \* Löschwasserleistung pro Fahrzeug

Löschwasserleistung l/min

0 - 229 Rescuecode 0

230 - 670 Rescuecode 1

670 - 1200 Rescuecode 2

1200 - 2399 Rescuecode 3

2400 - 5399 Rescuecode 4

5400 - 7899 Rescuecode 5

7900 - 12099 Rescuecode 6

12100 - 18199 Rescuecode 7

18200 - 24299 Rescuecode 8

24300 - 32299 Rescuecode 9

32300 - 99999 Rescuecode 10

### Start-/Landebahn (Runway)

Belag  
[befestigt (Beton, Asphalt)]

Belagsfaktor trocken 1.0

nass 0.6

Erlaubter Raddruck?  
{X.X mPa}

0.0 - 0.5 Belagscode Z

0.6 - 1.0 Belagscode Y

1.1 - 1.5 Belagscode X

1.6 - 9.9 Belagscode W

[unbefestigt (Gras, Schotter)]

Belagsfaktor trocken 0.75

nass 0.5

0.5 Belagscode Z

Pistenlänge  
{XXXX m}

0000 - 0799 Codenummer 1

0800 - 1199 Codenummer 2

1200 - 1799 Codenummer 3

1800 - 9999 Codenummer 4

Pistenbreite  
{XXm}

wenn Codenummer 1

00 - 17 kein Codeletter

18 - 22 Codeletter B

23 - 99 Codeletter C

wenn Codenummer 2

00 - 23 kein Codeletter

23 - 29 Codeletter B

30 - 99 Codeletter C

wenn Codenummer 3

00 - 29 kein Codeletter

30 - 44 Codeletter C

45 - 99 Codeletter D

wenn Codenummer 4

00 - 44 kein Codeletter

45 - 59 Codeletter E

60 - 99 Codeletter F

Ausrichtung der Piste  
{XXX°}

Hauptstartrichtung?  
[XXX°]  
[XXX° +/- 180°]

Befeuerung  
[ja]

Betriebszeit = Auswahl Recht

[nein]

Betriebszeit = Überschneidungsmenge

- Lichte Tageslänge

- Auswahl Recht

### Umweltbedingungen

#### Meteorologie

Höhenlage  
{XXXX m.ü.M.}

Nächstgelegene Stadt?  
[Bern]; [Genf]; [Lugano]; [Sion]; [St.Gallen]; [Zürich]

mittlere Monatstemperaturen

Anzahl Regentage (> 10mm Niederschlag)

Anzahl Schneetage

Anzahl Tage mit ungenügenden Sichtverhältnissen

Winddaten je Richtung

#### Recht

Lokale Einschränkung der gesetzlichen Betriebszeiten?  
[ja]

Eingabe der lokalen Betriebszeiten

Montag {SS:MM - SS:MM; SS:MM - SS:MM}

Dienstag {SS:MM - SS:MM; SS:MM - SS:MM}

Mittwoch {SS:MM - SS:MM; SS:MM - SS:MM}

Donnerstag {SS:MM - SS:MM; SS:MM - SS:MM}

Freitag {SS:MM - SS:MM; SS:MM - SS:MM}

Samstag {SS:MM - SS:MM; SS:MM - SS:MM}

Sonntag {SS:MM - SS:MM; SS:MM - SS:MM}

[nein]

Montag {06:00 - 22:00}

Dienstag {06:00 - 22:00}

Mittwoch {06:00 - 22:00}

Donnerstag {06:00 - 22:00}

Freitag {06:00 - 22:00}

Samstag {06:00 - 22:00}

Sonntag {06:00 - 22:00}

Lokale Einschränkung an gesetzlichen Feiertagen?  
[ja]

Konfession am Flughafenstandort?  
[reformiert]

allgemeine Feiertage

[katholisch]

zusätzlich katholische Feiertage

Eingabe der Betriebszeiten an Feiertagen

Feiertage {SS:MM - SS:MM; SS:MM - SS:MM}

[nein]

#### Betriebsdauer

Anzahl Betriebsstunden =

365

wenn ILS vorhanden [nein]

- Tage mit ungenügenden Sichtverhältnissen

wenn Belag [unbefestigt]

- Anzahl Schneetage

- Anzahl Regentage

\* Betriebszeit

### Eignung

Mindestanforderung pro Flugzeugkategorie				
	Ziffer	Code	Rescue	Belag
Kat. 1A1s	1	A	1	Z
Kat. 1B1s	1	B	1	Z
Kat. 1C1s	1	C	1	Z
Kat. 1A1a	1	A	1	Z
Kat. 1A2b	1	A	2	Z
Kat. 1B2b	1	B	2	Z
Kat. 1B3a	1	B	3	Z
Kat. 1C5a	1	C	5	Y
Kat. 2B3b	2	B	3	Y
Kat. 2C5a	2	C	5	Y
Kat. 2C5b	2	C	5	Y
Kat. 3A3c	3	A	3	Y
Kat. 3A3d	3	A	3	Y
Kat. 3B6c	3	B	6	X
Kat. 3B6d	3	B	6	X
Kat. 3C5b	3	C	5	Y
Kat. 3C5c	3	C	5	Y
Kat. 4C6c	4	C	6	X
Kat. 4C7d	4	C	7	X
Kat. 4D7c	4	D	7	X
Kat. 4D8d	4	D	8	X
Kat. 4E9c	4	E	9	X
Kat. 4E9d	4	E	9	X
Kat. 4F9c	4	E	9	X



## Modellteil Kapazität Luftseitig exkl. Gate

gültig für alle Luftfahrtinfrastrukturen





## Modellteil Kapazität Landseitig inkl. Gate

gültig für Flughäfen nach LFG (mit Passagierverkehr)

## Erschliessung

Modal Split (gemessen bzw. angestrebt)?

ÖV {XX%}

MIV 100 - Eingabe ÖV

## ÖV

Anzahl Busabfahrten in Hauptreiserichtung pro Stunde?

{XX}

Anzahl Plätze pro Bus?

{XX}

Auslastung des Buses nach Ankunft am Flughafen?

{XX%}

 $Kap. Bus = Abfahrten * Plätze * (100 - Auslastung) / 100 / (PAX grösste Kat. * 0.5)$ 

Direkter Bahnanschluss vorhanden?

[ja]

Anzahl Bahnabfahrten in Hauptreiserichtung pro Stunde?

{XX}

Anzahl Plätze pro Zugseinheit?

{XX}

Auslastung des Zuges nach Ankunft am Flughafen?

{XX%}

 $Kap. Bahn = Abfahrten * Plätze * (100 - Auslastung) / 100 / (PAX grösste Kat. * 0.5)$ **Kap. ÖV = Kap. Bus + Kap. Bahn**

[nein]

**Kap. ÖV = Kap. Bus**

## Vorfahrt

Länge der Vorfahrt (bei geteilter Vorfahrt: Vorfahrt Ankunft)?

{XXXm}

 $Kap. Vorfahrt = (\{Länge\} / 7 [m] * 6 [Umschläge] * 2 [Beidseitiges Halten]) / (PAX grösste Kat. * 0.5 * (Anteil MIV / 100) * 0.7 [Anteil Vorfahrt] * 0.666 [Besetzungsgrad 1,5 PAX])$ 

## Parkierung

Anzahl Parkplätze exkl. Kurzzeitparkplätze (&lt;1h)?

{XXXX}

 $Kap. Parkierung = \{Anzahl\} * 1000 * (Anteil MIV / 100) / 0.3 [Anteil Parking] / (PAX grösste Kat. * 0.5) / Betriebsstunden$ **Kap. Erschliessung = Kap. ÖV + Kap. Vorfahrt + Kap. Parkierung**

## Flugsteig

## Passagiere

Anzahl Boarding-Schalter pro Flugsteig?

{X}

1 10 PAX / min.

2-9 18 PAX / min.

Grösse des Wartehalle?

{XXXX m<sup>2</sup>}

wenn XXXX &gt; PAX grösste Kat. \* 0.5 \* Anzahl Standplätze

**Kap. Flugsteig = PAX grösste Kat. \* 0.5 / 60 \* 0.25 (Anteil Boarding an Standzeit) \* Boardingrate**

wenn XXXX &lt; PAX grösste Kat. \* 0.5 \* Anzahl Standplätze

**Kap. Flugsteig = PAX grösste Kat. \* 0.5 / XXXX**

## Kapazität Landseitig

**Kap. Landseitig =**

- Anzahl Betriebsstunden
- \* Kap. Erschliessung / h
- \* Kap. Terminal Ankunft / h
- + Kap. Terminal Abflug / h
- \* Kap. Flugsteig / h
- \* Kap. Vorfeld / h

Niedrigste Kap. massgebend

## Vorfeld (Apron)

## Standplätze am Terminal

Anzahl Standplätze?

{XX}

**Kap. Vorfeld = (60 / Durchschnittliche Abfertigungszeit) \* Anzahl Standplätze**

## Terminal

## Ankunft

Anzahl Gepäckbänder?

{XX}

 $Kap. Gepäckband = 60 * Anzahl * 15 [Gepäckstücke/min] / 0.9 [Anteil PAX mit Gepäck] * 1.3 [Anzahl Gepäckstücke pro PAX] / 15 G/min / PAX grösste Kat. * 0.5$ **Kap. Terminal Ankunft = Kap. Gepäckband \* Anzahl**

## Terminal

## Abflug

Breite des schmalsten Durchganges / der schmalsten Türe?

{Xm}

 $Kap. Durchgänge / Türen = 60 * 20 PAX/min * Breite / PAX grösste Kat. * 0.5$ 

Anzahl und Breite der Treppen / Rolltreppen an schmalster Stelle?

{X}

[0.8m]; [1.0m]

 $Kap. Treppen = 60 * 20 PAX/min * Anzahl * Auswahl Breite / PAX grösste Kat. * 0.5$ 

Anzahl Check-In-Schalter?

{XX}

 $Kap. Check-In = 60 * 0.33 PAX/min * Anzahl / PAX grösste Kat. * 0.5$ 

Anzahl Sicherheitskontrollen?

{XX}

 $Kap. Sicherheitskontrolle = 60 * 1.5 PAX/min * Anzahl / PAX grösste Kat. * 0.5$ 

**Kap. Terminal Abflug =**

- Kap. Durchgänge
- Kap. Treppen
- Kap. Check-In
- Kap. Sicherheitskontrolle

Niedrigste Kap. massgebend

## **Kapazitätsmodell Ausgangszustand**

## **Kapazitätsmodell Fallbeispiel Bern-Belp**

## **Kapazitätsmodell Fallbeispiel St.Gallen-Altenrhein**

## **Kapazitätsmodell Fallbeispiel Birrfeld**



## **Kapazitätsmodell Fallbeispiel Buttwil**

## **Kapazitätsmodell Fallbeispiel Speck-Fehraltorf**