

# Analyse der luftseitigen Kapazitätsanforderungen bei der Planung von Flughäfen durch Simulation

Branko Bubalo<sup>1</sup> und Joachim R. Daduna<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin / German Airport Performance  
Forschungsprojekt; Badensche Straße 50 - 51, D - 10825 Berlin /  
**branko.bubalo@googlemail.com**

<sup>2</sup> Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin; Badensche Straße 50 - 51,  
D - 10825 Berlin  
**daduna@hwr-berlin.de**

## 1 Problemstellung

Bei der Gestaltung von (nationalen und internationalen) *Luftverkehrsnetzen* spielen die *Flughäfen* eine elementare Rolle. Sie stellen auf der einen Seite als zentrale *Infrastruktureinrichtungen* die Knoten der Netze dar und auf der anderen Seite die Schnittstelle zu den Verkehrsträgern im Vor- und Nachlauf. Damit sind die Flughäfen in vielen Fällen ein *neuralgischer Punkt* in den *Leistungserstellungsprozessen des Luftverkehrs*, denn dort auftretende Kapazitätsrestriktionen wirken sich *limitierend auf das Gesamtsystem* aus. Diese können sich bei den landseitigen Verkehrsanbindung, den Funktionsbereichen in den Terminals und der Bodenabfertigung ergeben sowie insbesondere bei den *luftseitigen Verknüpfungen* durch die Start- und Landebahnen. Da in diesem Bereich kapazitive Anpassungen nur langfristig möglich sind, u.a. bedingt durch *langwierige Planungs- und Genehmigungsverfahren* sowie die Realisierung und außerdem einem *hohen Investitionsaufwand* erfordern, besteht ein erheblicher Bedarf bezüglich einer genauen Abschätzung zukünftiger Aufkommensentwicklungen.

Im Fokus der Ausführungen stehen deshalb Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen bei unterschiedlichen *Szenarien und Nachfrageentwicklungen* auf die Auslastung im luftseitigen Bereich. Ausgehend von den *infrastrukturbedingten Restriktionen des Layouts von Start- und Landebahnen* sowie den technischen Vorgaben im Flugbetrieb wird mit Hilfe eines *Simulationsansatzes* analysiert, in welchem Umfang Aufkommenszuwächse bewältigt werden können. Dies erfolgt am Beispiel des derzeit (noch immer) im Bau befindlichen Flughafens *Berlin Brandenburg International (BBI)*, um festzustellen, ob die dort *vorgesehene Kapazitätsauslegung* (s. [7]: 405ff) tatsächlich den *zukünftigen Anforderungen* genügen kann. Den Abschluss bildet eine kritische Analyse der bisherigen Dimensionierung unter Berücksichtigung der verschiedenen Entwicklungsszenarien.

## 2 Durchführung der Kapazitätsuntersuchung

In Verbindung mit dem Flughafen BBI bestehen Diskussionen bezüglich einer *langfristig ausreichenden Kapazität*, da hier eine Zusammenlegung von zwei Flughäfen mit bisher insgesamt drei Start- und Landebahnen erfolgen wird. Die in der letzten Zeit gemachten Aussagen sind zum Teil sehr widersprüchlich, so dass sich die Frage stellt, welche Leistungsfähigkeit kann bei dem gegebenen Grundlayout tatsächlich erreicht werden. Um diese zu beantworten werden zunächst verschieden Szenarien definiert und entsprechende Berechnungen mit Hilfe der Simulationssoftware *Visual SIMMOD* (s. [1]) in Verbindung mit Tools der *Federal Aviation Administration* (FAA) (s. [4]) durchgeführt.

Hinsichtlich der Layoutstrukturen bildet ein *unabhängiger getrennter Parallelbahnbetrieb* die Grundlage, bei der Start- und Landebewegungen getrennt abgewickelt werden. Gemäß dem Planfeststellungsbeschluss ergibt sich bei dieser Konfiguration eine Kapazität von maximal *83 Flugbewegungen pro Stunde* (s. [7]: 408), die für die Untersuchungen als Vergleichsgrundlage herangezogen wird.

### 2.1 Verwendete Szenarien

Ausgangspunkt der Simulation sind die aggregierten *Flugbewegungen im Tagesverlauf* auf den beiden derzeit genutzten Flughäfen *Berlin-Tegel (TXL)* und *(Berlin-)Schönefeld (SXF)*, wobei die Daten eines *typischen Spitzentages* (Donnerstag, 26. Juni 2008) mit *635 abgefertigten Flugbewegungen* zugrunde gelegt werden. Da der Nachfrageeinbruch aus dem Jahr 2009 überwunden und in 2010 schon wieder der Stand von 2008 erreicht worden ist, können diese Daten (s. Tab. 2.1) als Ausgangsbasis für die durchzuführenden Berechnungen verwendet werden. Diese sind unterteilt in drei (*typbezogene*) *Gewichts- bzw. Turbulenzklassen*, *Heavy (H)* (>136 t *Maximum Take off Weight* (MTOW)), *Medium (M)* (>136 Tonnen MTOW) sowie *Light (L)* (<7 Tonnen MTOW) (s. [5]: 90), mit Hilfe derer der *Mix* aus *Flugzeugtypen* auf einem Flughafen beschrieben wird.

Tagesstunde	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Summe
Heavy								1	1	2		1	1	1	1	1			1	1			1		12
Medium	2	1		1	1	2	24	26	46	43	34	39	25	31	32	32	37	41	42	44	46	35	21	4	609
Light								2	1		2	1		1		2		1	2	1	1				14
Summe	2	1	0	1	1	2	24	29	48	45	36	41	26	33	33	35	37	42	45	46	47	35	22	4	635

**Tab. 2.1:** Flugbewegungen differenziert nach Gewichts- / bzw. Turbulenzklasse

Als zweiter Aspekt muss die *Reihenfolgenbildung* gesehen werden, da diese von erheblicher Bedeutung für die erreichbare Leistungsfähigkeit eines Flughafens sind. Hierbei handelt es sich um *minimale Sicherheitsabstände*, die bei Starts (in Sekunden) und Landungen (in nautischen Meilen) (sowie auch für *Kombinationen*) festgelegt sind (s. [5]: 113) (s. Tab. 2.2).

Reihenfolge	Ankunft - Ankunft			Abflug - Abflug		
	H	M	L	H	M	L
Heavy	4	5	6	120	120	120
Medium	3	3	4	60	60	60
Light	3	3	3	60	60	60

**Tab. 2.2:** Abstandswerte bei der Kombination von Gewichts- / Turbulenzklassen

Da die Werte nicht symmetrisch sind, ergeben sich in Abhängigkeit von der Reihenfolgenbildung unterschiedlich lange *Flugzeugketten* zur Abwicklung von Landungen, wodurch die Durchsatzfähigkeit eingeschränkt wird. Deutlich wird dies bei der Betrachtung einer Kombination der Typen L und H. Bei einer Reihenfolge  $H \rightarrow L \rightarrow H \rightarrow L \rightarrow H \rightarrow L$  ergibt sich ein Abstandswert von 24 NM, wogegen bei  $H \rightarrow H \rightarrow H \rightarrow L \rightarrow L \rightarrow L$  sich dieser auf 20 NM reduziert, d.h., die Leistungsfähigkeit eines Flughafens wird u.a. vom Mix und den Möglichkeiten der Reihenfolgenbildung bestimmt (s. u.a. [6]).

Aus diesem Grund werden beim Mix differierende Typzusammensetzungen betrachtet, die sich aus den unterschiedlichen Nutzergruppen ergeben. Ausgegangen wird von dem in der Tabelle 2.1 angegebenen Datenstrukturen (*Szenario 0*), das in *fünf weiteren Szenarien (I bis IV und VI)* variiert wird (s. Tab. 2.3). Der *Mix-Index* dient u.a. der stärkeren Gewichtung des *Anteils der schweren Maschinen*, deren Bedeutung zukünftig steigen wird (s. u.a. [2]: 391ff; [5]: 515ff).

Szenario	0		I		II		III		IV		VI	
	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#
Heavy	2	12	5	32	15	95	5	32	20	127	2	13
Medium	96	609	95	603	80	508	84	533	65	413	84	533
Light	2	14	0	0	5	32	11	70	17	95	14	89
Summe	100	635	100	635	100	635	100	635	100	635	100	635
Mix-Index	102		110		125		99		125		90	

**Tab. 2.3:** Daten der verwendeten Szenarien

Bei den Berechnungen wird, beginnend mit einer *Nachfrageminderung um 20%*, ein *Nullwachstum* sowie eine *schrittweise generierte Steigerungsrate von 20% (bis 200%)* untersucht, eine stabile *Kapazitätsgrenze* der vorhandenen Layoutstruktur zu ermitteln. Ausgehend von den für die kommenden Jahre prognostizierten Entwicklungen im Luftverkehr erfolgt eine Abschätzung der für den Flughafen BBI zu erwartenden Aufkommenszuwächse, anhand derer für die verschiedenen Szenarien die *Nachfrage und realisierbare Nachfrage* für den Zeitraum von *2010 bis 2026* ermittelt wird.

## 2.2 Simulationsergebnisse

Die durchgeführten Untersuchungen können im Rahmen dieser Ausführungen nur in Ausschnitten vorgestellt werden. Aus diesem Grund wird exemplarisch auf Ergebnisse eingegangen, die für die durchgeführten Berechnungen als

repräsentativ anzusehen sind. Ausgehend vom Szenario 0 ergibt die Simulation die Anzahl der Flüge pro Tag, die die Grundlage für die Berechnungen bilden. Hierbei zeigt sich, dass ein Wachstum, das über 60% hinausgeht, bezüglich der *Kapazitätsauslastung* problematisch wird, da es dadurch zu deutlichen Verspätungen kommt, die sich dann auch in extrem ansteigenden Kosten niederschlagen, die mit € 42,00 pro Minute kalkuliert werden (s. u.a. [3]: 9ff). Dies führt letztendlich auch zu Ausfällen, die als von der Flugzeuggröße abhängiger Kostenfaktor (von € 3.400 bis € 75.000) zu berücksichtigen sind (s. u.a. [3]: 19). Der unmittelbare Zusammenhang zwischen der Anzahl der Flugbewegungen und den durch *Überlastung* entstehenden Verspätungen (und Kosten) wird anhand der Daten in Tabelle 2.4. deutlich.

Wachstumsrate (%)	Anzahl Flüge / Tag	Nachfrage / Spitzenlast (Stunde)	Realisierbare Nachfrage (Stunde)	Verspätung (Ø) / Pro Flug (Min)	Summe Verspätungen (Min)	Verspätungskosten (€) <sup>1</sup>	Flugausfälle
-20	511	40	40	1.1	543	22.806	0
0	635	48	48	1.4	887	37.254	0
20	758	55	54	2.3	1.760	73.920	0
40	886	69	71	3.7	3.287	138.054	0
60	1012	78	76	5.9	5.955	250.110	0
80	1145	94	80	11.5	13.223	555.366	0
100	1270	90	82	21.2	26.968	1.132.656	1
120	1400	96	82	26.8	37.501	1.575.042	134
140	1517	98	84	27.4	41.538	1.744.596	440
160	1639	110	83	58.2	95.364	4.005.288	807

<sup>1</sup> Kostenfaktor Verspätung (pro Minute): € 42,00 gem. EUROCONTROL (Standard Inputs for CBA Analysis)

**Tab. 2.4:** Simulationsergebnis Szenario 0

Ein Vergleich mit den Ergebnissen der anderen untersuchten Szenarien bezüglich des Zusammenhangs von der zahlenmäßigen Entwicklung bei den *Flugbewegungen* und den (flugbezogenen) *Verspätungen* zeigt stark korrelierende Funktionsverläufe mit einem *exponentiellen Anstieg* (s. u.a. [2]: 449; [5]: 488), der bei einem Aufkommen von *ca. 1.000 Flugbewegungen* einsetzt (s. Abb. 2.1). Dies bedeutet, dass im Normalbetrieb der Mix (abgesehen von spezifischen Reihenfolgensituationen) keinen signifikanten Einfluss auf das Auftreten von *Kapazitätsengpässen* hat.

### 3 Analyse und Bewertung

Wie die Simulationsergebnisse für das Szenario 0 (beginnend mit dem Jahr 2010) eindeutig zeigen, ergeben sich für den Flughafen BBI bei einer kumulierten Nachfragesteigerung von 60% (mittel- und langfristig) Kapazitätsprobleme (s. Abb. 3.1). Der Zeitpunkt des Erreichens dieses Engpasses hängt von der Annahme *jährlicher Wachstumsraten* ab. Hierbei ergibt sich bei einer jährlichen Aufkommenssteigerung zwischen 3% und 6% (die im Zeitraum von 2003 bis 2008 im Umfang von jährlich ca. 6% auf den Berliner Flughäfen erreicht werden

konnte), dass die sogenannte *praktische Kapazitätsgrenze* bereits ab dem Jahr 2018 erreicht wird, spätestens aber 2026.

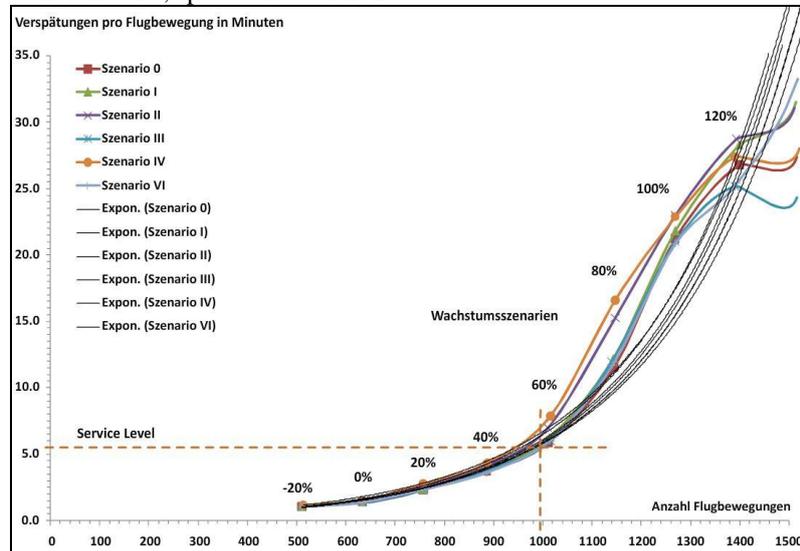


Abb. 2.1: Vergleich Verspätungsumfang und der Anzahl der Flugbewegungen

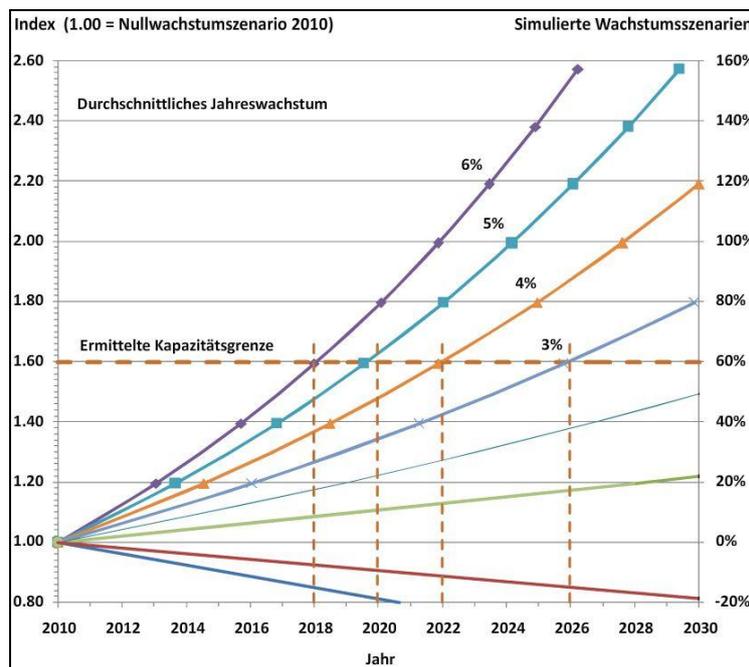


Abb. 3.1: Auswirkungen differierender (jährlicher) Wachstumsraten

Dieses Ergebnis ist, mit Blick auf die *zukünftige* Entwicklung des Flughafens BBI, äußerst problematisch. (s. auch [2]: 847f) Die Gefahr eines (möglichen) Auftretens

von *Kapazitätsengpässen* innerhalb von nur sechs Jahren nach der (für 2012) geplanten Inbetriebnahme bedingt zwangsläufig einige Fragen. Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei die offensichtliche *Unterschätzung der Bedarfsentwicklung* für den Raum Berlin-Brandenburg, wobei noch zusätzliche Effekte auftreten können, falls BBI in den kommenden Jahren von einzelnen Fluggesellschaften als Hub genutzt werden sollte, oder auch generell eine *Hub-Funktion* mit Blick auf den Luftverkehr in den skandinavischen und osteuropäischen Raum erhalten würde (s. [7]: 343ff).

#### 4 Fazit und Ausblick

Aufgrund des zu erwartenden Auftretens von *Kapazitätsengpässen* (insbesondere in den *Nachfragespitzen*) stellt sich die Frage, inwieweit ein Handlungsbedarf gegeben ist. Hierbei spielen nicht nur technische Gesichtspunkte eine Rolle, sondern es stellt sich auch die Frage der *Standortqualität des Raumes Berlin-Brandenburg* im Bereich Politik und Wirtschaft. Da mit dem Zeitpunkt eines möglichen Eintretens dieser Engpässe nicht erst in einer fernen Zukunft zu rechnen ist, sondern in einem durchaus überschaubaren Zeitrahmen, muss diese Problematik zwingend in den aktuellen *verkehrspolitischen Überlegungen* eine hohe Priorität erhalten.

Berücksichtigt man die zeitlichen Abläufe, wie sie bei der *Planung und Realisierung* von *Verkehrsinfrastrukturmaßnahmen* (nicht nur in der Bundesrepublik Deutschland) in der Regel auftreten, wird deutlich, das eigentlich schon in den vergangenen Jahren mit den Planungen für eine *bedarfsgerechte und zeitlich abgestimmte Erweiterung* des Flughafens BBI hätte begonnen werden müssen, um langfristig *effiziente* Abläufe im Flug- und Terminalbetrieb sowie auch *attraktive Angebote bei den Flugrechten* gewährleisten zu können.

#### Literaturverzeichnis:

- [1] AirportTools (2003): Visual SIMMOD - Version 1.9.1. Los Altos, CA / <http://www.airporttools.com/apecs/sdk/vs/index.html>
- [2] de Neufville, R. / Odoni, A.R. (2003): Airport systems - Planning, design, and management. (McGraw-Hill) London et al.
- [3] EUROCONTROL (2009): Standard Inputs for Cost Benefit Analyses. Brussels
- [4] Federal Aviation Administration (FAA) (1995): Advisory Circular AC 150/5060-5, Airport Capacity and Delay. Washington D.C
- [5] Horonjeff R. / McKelvey, F.X. / Sproule, W.J. / Young, S.B. (2010): Planning and Design of Airports. 5th ed. (McGraw-Hill) New-York et al.
- [6] Klempert, B. / Wikenhauser, F. (2009): Verspätungsprognosen auf Basis der Kapazitätsauslastung. in: Internationales Verkehrswesen 61(5), 162 - 168
- [7] Ministerium für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr (MSWV) des Landes Brandenburg (2004): Planfeststellungsbeschluss Ausbau Verkehrsflughafen Berlin-Schönefeld. / URL: <http://www.mil.brandenburg.de/sixcms/detail.php/bb1.c.155609.de> (27. jul 2010)