

ZF INFRA Aerodromes

1 Aerodromes: Definitions and Terminology

1.1 Einordnung / Zweck

Aerodromes sind zentrale **logistische Knotenpunkte im Luftverkehrssystem**. Sie ermöglichen die strukturierte und effiziente Abwicklung verschiedener logistischer Ströme: Flugzeuge, Passagiere, Gepäck, Fracht sowie unterstützende Versorgungsleistungen (Energie, Wasser, Abfall usw.).

Ein Aerodrome ist damit kein einzelnes Bauwerk, sondern ein **System aus vernetzten Infrastrukturelementen**, das die Interaktion dieser Flüsse ermöglicht.

1.2 Definition „Aerodrome“

Nach ICAO und EASA ist ein Aerodrome:

Ein definiertes Gebiet an Land oder Wasser (inkl. Gebäude, Installationen und Ausrüstung), das ganz oder teilweise für **Ankunft, Abflug und Bodenbewegungen von Luftfahrzeugen** vorgesehen ist.

Wesentliche Punkte:

„Defined area“

umfasst Infrastruktur und Ausrüstung

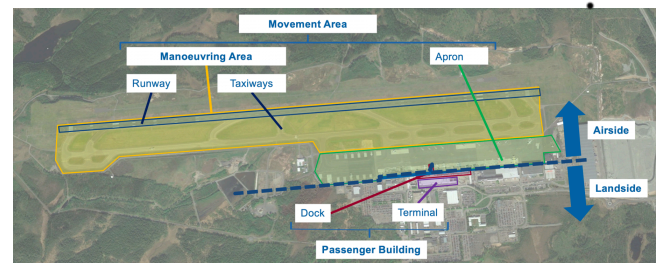
dient **Start, Landung und Bodenbewegung**

1.3 Komponenten eines Aerodromes

Grundstruktur

Ein Aerodrome gliedert sich in:

- **Airside**
- **Landside**
- **Ground Access**
- darüber: **Airspace**



Movement Area und Manoeuvring Area

- **Movement Area** = Bereich für Start, Landung und Rollen
- **Manoeuvring Area** = Teil der Movement Area für: Start, Landung, Taxiing
aber **ohne Apron**
- **Movement Area** = Manoeuvring Area + Apron

Runway

Gehört zur Manoeuvring Area

Taxiways

Taxiways verbinden Teile des Aerodromes miteinander.

Apron und Aircraft Stand & Terminal und Dock

↳ Fläche für Einladen/Ausladen von Cargo, Passagier ein-/ausladen, Tanken, Parkieren

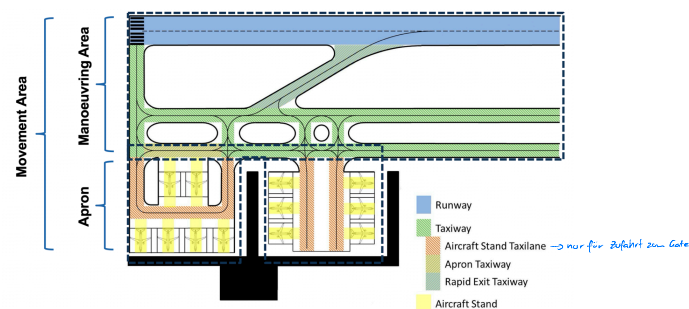
Passagierflüsse

Es gibt drei Haupttypen:

Local-outbound passengers → vom Landside ins Airside (Check-in → Security → Gate → Abflug)

Local-inbound passengers → vom Flugzeug ins Landside (Ankunft → Gepäck → Ausgang)

Transfer passengers → bleiben airside-intern, wechseln von einem Flugzeug zum nächsten



1.4 Wichtig für Prüfung / Verständnis

Aerodromes sind **logistische Systeme**

Movement Area = Manoeuvring Area + Apron

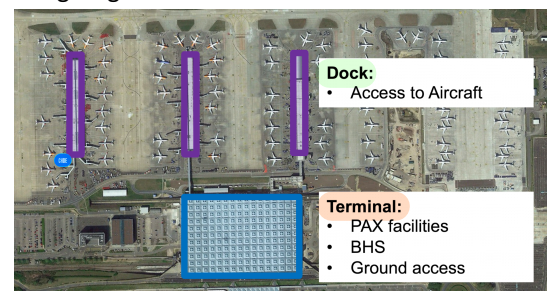
Manoeuvring Area enthält **Runways + Taxiways**, aber kein Apron

Airside \neq Movement Area

(Airside umfasst mehr als nur Movement Area)

Rapid Exit Taxiways reduzieren **Runway Occupancy Time**

Unterschied zwischen **local passengers** und **transfer passengers** ist prozessrelevant



2 Runways – Zusammenfassung INFRA-AD

2.1 1. Orientierung von Runways

2.1.1 Usability Factor

Der **Usability Factor** gibt an, wie oft eine Runway ohne Seitenwindschränkungen genutzt werden kann (in % der Zeit).

Die **Crosswind Component (XWC)** wirkt senkrecht zur Runway-Achse:

$$XWC = V \cdot \sin(\theta_w - \theta_r)$$

θ_w : Wind direction
 θ_r : RWY heading

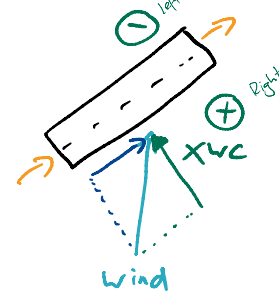
Die **Headwind/Tailwind Component (HWC)** wirkt parallel:

$$HWC = V \cdot \cos(\theta_w - \theta_r) \rightarrow \begin{cases} \oplus & \text{Head wind} \\ \ominus & \text{Tail wind} \end{cases}$$

Gemäss CS ADR-DSN.B.015 (EASA) muss der Usability Factor $\geq 95\%$ betragen. Die max. zulässige Seitenwindkomponente hängt von der **Reference Field Length** des Flugzeugs ab:

Je kürzer RFL umso kleiner XWC

Reference Field Length	Max. Crosswind
≥ 1500 m	20 kn
1200–1500 m	13 kn
< 1200 m	10 kn



2.1.2 Wind Distribution Statistics & Wind Rose

- Winddaten über **mind. 5 Jahre** werden ausgewertet
- Darstellung in Tabelle (16 Sektoren à 22.5°, nach Richtung & Geschwindigkeit) und als **Wind Rose**
- Zur Bestimmung des Usability Factors: Rechteck (Breite = 2x max. XWC) auf Wind Rose legen → alle Frequenzwerte innerhalb summieren = Usability Factor

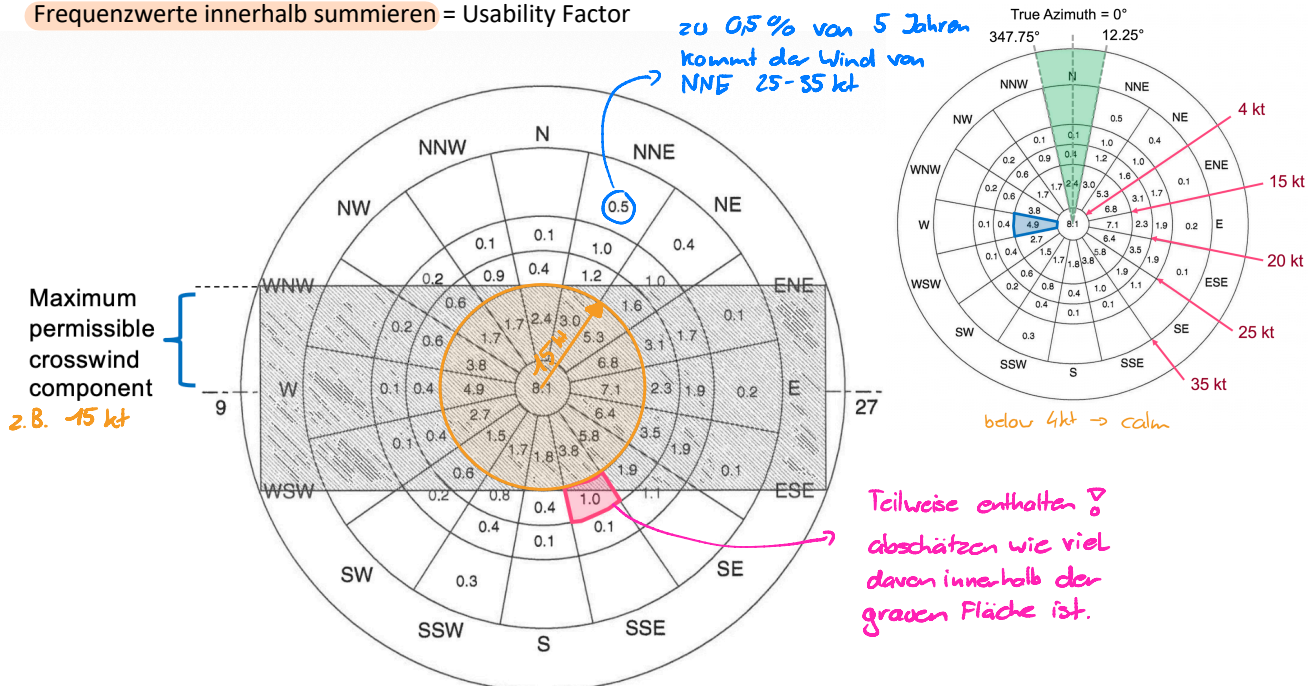
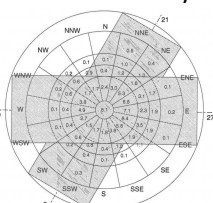


Figure 3: Determination of Usability Factor With Wind Rose for Runway Orientation of 90° / 270°. From Horonjeff et al. (2010, p. 190).

factor of 90.8% for a runway orientation of 90° / 270°, assuming a maximum permissible crosswind component of 15 kn.

Falls keine einzelne Runway $\geq 95\%$ erreicht → **2. Runway** in anderer Orientierung prüfen (kombinierter Usability Factor)



- ⊕ Je mehr RWY's umso höher die **potentielle Kapazität**
- ⊖ Je mehr RWY's umso **teurer**

Ziel: So wenig wie nötig, dafür die potentielle Kapazität ausschöpfen.

2.2 Anzahl & Bezeichnung von Runways

→ Taxiways & RWY nehmen bis zu 95% Land ein

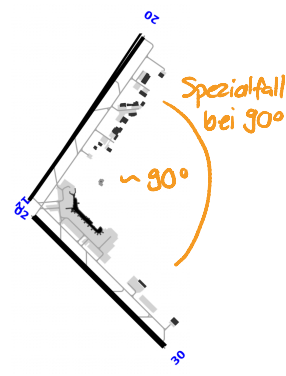
2.2.1 Layout-Typen

	Typ	Beispiel	VFR [Mov/h]	IFR [Mov/h]
i)	Single Runway	Geneva, Gatwick	51-98	50-59
ii)	Open-V / Open-L	Vienna, Edmonton	73-150	56-60
iii)	Crossing Runways	LaGuardia	72-98	56-60
iv)	Parallel (abhängig)	-	94-197	56-75
iv)	Parallel (unabhängig)	Munich, Heathrow	103-197	99-119
v)	Multiple Parallel	Paris CDG, LAX	höchste Kapazität	-

- ⊕ einfache Konfiguration
- ⊕ hohe Pistennutzung
- ⊖ XWC
- ⊖ Eingeschränkte Kapazität
- ⊖ Emergencies/Maintenance
- ⊖ long taxi distance
- mehrere RWY's ohne Kreuzung

	No	Runway use configuration	Hourly capacity [ATM/h]		Annual service volume [ATM/y]
			VFR	IFR	
Single Runway	1		51-98	50-59	195000 - 240000
Dual Parallel Runways	2		94-197	56-60	260000 - 355000
	3		103-197	62-75	275000 - 365000
	4		103-197	99-119	305000 - 370000

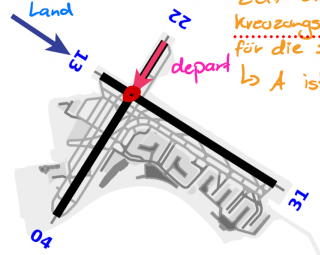
open L-RWY



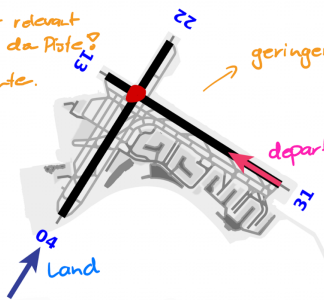
Intersecting Runways

- ⊕ XWC
- ⊕ short taxi
- ⊖ only one aircraft on RWY
- open V/L
- ⊕ höhere potentielle Kapazität
- ⊕ Emergency
- ⊕ XWC klein
- ⊖ Landverbrauch
- ⊖ Taxi time
- ⊖ slots bei Überlappung der Route

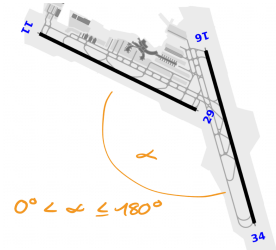
Configuration A:



Configuration B:



open V-RWY



Wichtig: Single Runways haben bemerkenswert hohe Kapazitäten und sind konkurrenzfähig mit Crossing/Open-V/L und Close Parallel Systemen!

2.2.2 Parallel Runways – Separation & Betriebsmodi

Betriebsmodus	Min. Separation
Independent parallel approaches	1035 m
Dependent parallel approaches	915 m
Independent parallel departures	760 m
Segregated parallel operations	760 m

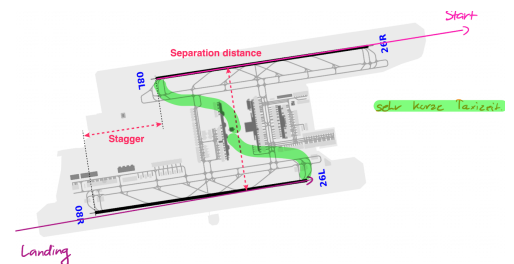
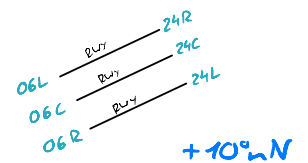


Figure 8: Parallel Runway System in Munich.

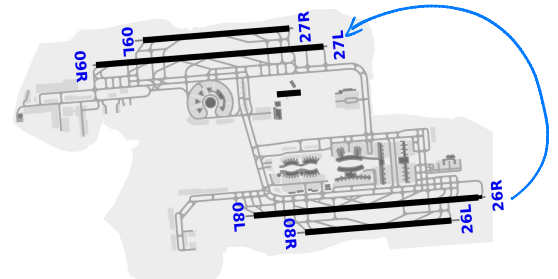
Stagger (versetzte Schwellen): Verbessert Sicherheit bei Simultananflügen und kann Mindesttrennung reduzieren (-30 m pro 150 m Stagger Richtung Anflug).

2.2.3 Runway Designation

- Bezeichnung = magnetischer Kurs gerundet auf 10° (Dekagrades), z.B. 057° → 06
- Gegenrichtung: +18, z.B. 24
- Parallele Runways: Suffix L / R / C
- parallele Runways: Dekagrades um 1 erhöhen für das zweite Paar



+10° nN



CS ADR-DSN: Certification specification aerodromes - Design (EASA)

4. Semester AV / ATTN
 ↳ legt fest, wie ein Flughafen gebaut werden muss.

2.3 3. Dimensionierung von Runways

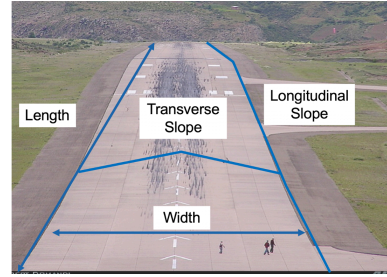
2.3.1 Breite

RFL → Reference field length

für critical aircraft

Abhängig von Aerodrome Code Number und Outer Main Gear Wheel Span (OMGWS):

Aerodrome Code Number	< 4.5m	≥ 4.5m & < 6m	≥ 6m & < 9m	≥ 9m & < 15m
1	18 m	18 m	23 m	—
2	23 m	23 m	30 m	—
3	30 m	30 m	30 m	45 m
4	—	—	45 m	45 m



2.3.2 Längsneigung (Longitudinal Slope)

Code Nr.	Avg. Slope	Max. Slope	Max. Slope Change
1, 2	2 %	2 %	2 %
3	1 %	1.5 %	1.5 %
4	1 %	1.25 %	1.5 %

wird im AIP publiziert
 AIP: Aeronautical Information Publication

2.3.3 Querneigung (Transverse Slope)

- A, B 1% < Slope ≤ 2%
- C, D, E, F 1% < Slope ≤ 1.5%
- Entweder **Cambered** (höchster Punkt Mitte) oder **Single Crossfall** (einseitig) — muss entlang der ganzen Runway konstant sein

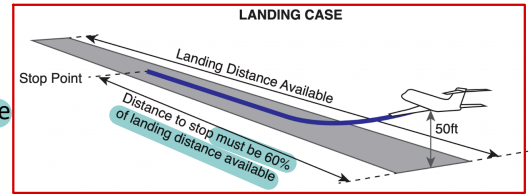
2.3.4 Runway-Länge

Keine direkte Vorschrift - wird durch **Critical Aircraft** und drei Berechnungsfälle

Case 1 - Landing:

$$LD = \frac{SD}{0.6}$$

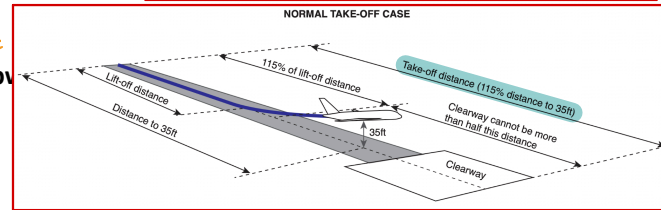
↳ stop distance



Case 2 - Normal Take-off

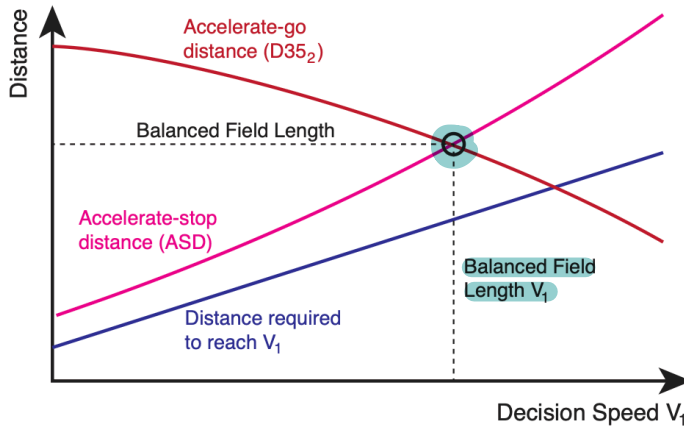
$$TOD_1 = 1.15 \cdot D35_1 \rightarrow D35_1 \text{ depends on the AC}$$

- Clearway möglich: $CL_{1,max} = 0.5[TOD_1 - 1.15 \cdot LOD_1]$



Case 3 - Engine Failure Take-off (OEI):

- Decision Speed V_1 : Pilots wählen zwischen **Accelerate-Go** ($D35_2$) und **Accelerate-Stop** (ASD)
- Balanced Field Length**: V_1 so gewählt, dass $D35_2 = ASD \rightarrow$ minimale Runway-Länge



Take off von (TOR)

↳ Benötigte befestigte Pistenlänge

$$TOR_1 = \begin{cases} TOD_1, & \text{without clearway} \\ TOD_1 - CL_{1,max}, & \text{with clearway} \end{cases}$$

$D35_2$: Distanz für Beschleunigung von Null bis V_1 mit 2 Triebwerken, dann von V_1 bis eine Höhe von 35 ft mit 1 Triebw. erreicht wird.

Acceleration stop distance (ASD):

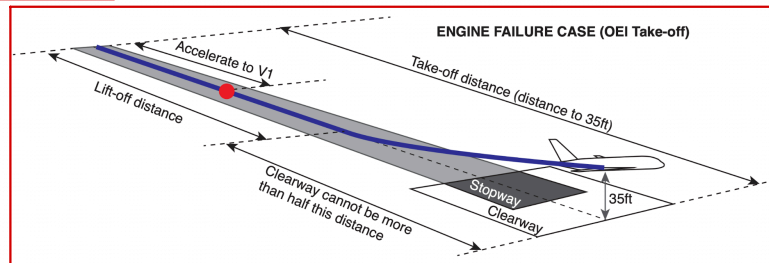
Distanz für Beschleunigung von Null bis V_1 mit 2 Triebwerken, dann engine failure, bis zum Stillstand.

Die Required Field Length ist: $FL = \max(TOD_1, TOD_2, ASD, LD)$

$D35_2$ & ASD von V_1 abhängig:

$V_1 \uparrow \Rightarrow ASD \uparrow \quad D35_2 \downarrow$
 $V_1 \downarrow \Rightarrow ASD \downarrow \quad D35_2 \uparrow$
 da mit V_1 die kinetische Energie verändert wird erhöht sich ASD mit ihr

↳ in practice: V_1 wird so gewählt das $ASD = D35_2$ und **balanced field length** genannt.



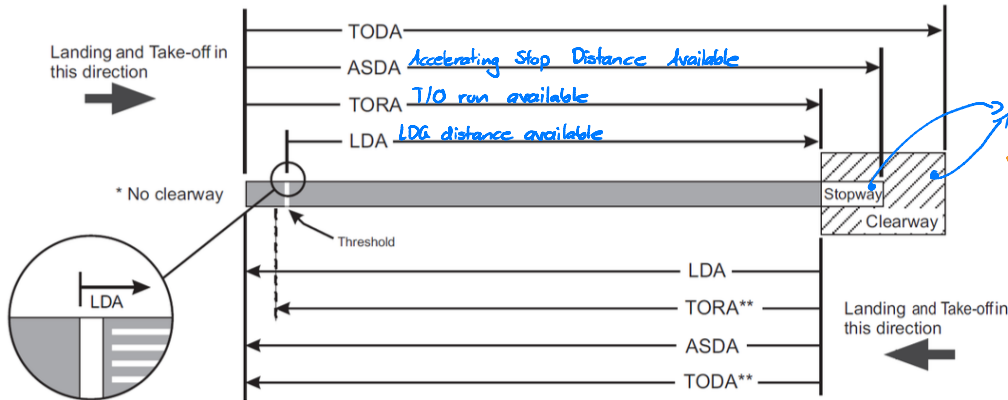
2.3.5 Declared Distances (veröffentlicht im AIP)

FS: Full strength distance (paved RWY)
 $FS = \max(TOR_1, TOR_2, LD)$

Kürzel	Bedeutung
TORA	Take-Off Run Available
TODA	TORA + Clearway
ASDA	TORA + Stopway
LDA	Landing Distance Available

→ Rollweg beim T/O

$$ASD = \begin{cases} FS, & \text{without clearway} \\ FS + SW, & \text{with clearway} \end{cases}$$

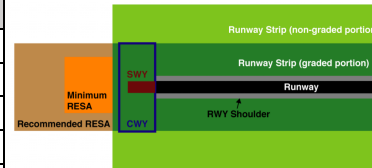


** TORA / TODA towards a threshold that has been displaced from the runway end may be subject to a reduction to meet the requirements of the take-off surface as stated in Chapter 4.

Aerodrome Code Letter	Shoulder Required?	Width	Pavement
A, B, C	No	-	-
D, E	Yes, if OMGWS > 9 m	60 m	Not required
F (2 or 3-engined A/C)	Yes, if OMGWS > 9 m	60 m	Not required
F (4-engined A/C)	Yes, if OMGWS > 9 m	75 m	Must be paved up to 60 m

2.4 4. Adjacent Areas Umrandende Flächen/Natur der RWY

Bereich	Funktion
Runway Shoulder	Übergang Runway → Terrain; schützt vor FOD-Ingestion
Runway Strip	Graded & non-graded; für RFF-Fahrzeuge; frangible Objekte erlaubt
RESA	Min. 90 m lang (empfohlen 240 m), mind. 2x Runway-Breite
EMAS	Bei Platzmangel: Schaumbetonblöcke absorbieren Energie bei Overrun
Clearway	Optional; verlängert TODA; kann über Wasser sein
Stopway	Optional; verlängert ASDA; muss Gewicht des A/C tragen

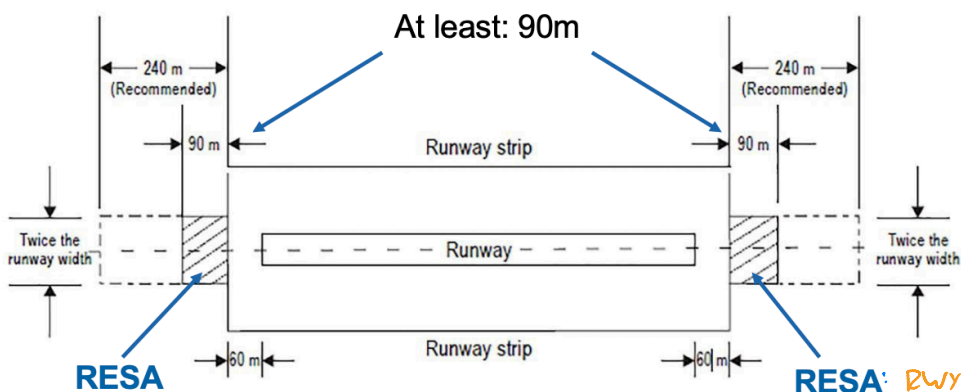


RESA ist Pflicht für Code 3 & 4 (alle Runways) und Code 1 & 2 (nur Instrument Runways).
 RFF: Rescue firefighting vehicle Frangible: z.B. PAPI light haben Sollbruchstellen Graded: Sichere Oberfläche für den Fall von Excursion

→ Darf nicht über Wasser sein

RWY Strip:

- Ist von Airport code und non-instrument/instrument abhängig.
- Precision/non-precision APP



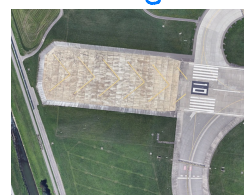
2.5 5. Hindernisse (Obstacles)

2.5.1 Obstacle Limitation Surfaces (OLS)

Schützen vor fixen Objekten:

- Inner Horizontal Surface – Schutz bei Circle-to-Land
- Conical Surface – visuelles Manövrieren in Flugplatznähe
- Approach Surface – Endanflug (rot in Abbildungen)

EMAS: Engineered Material Arrestor System



- wenn direkt nach RWY Wasser kommt.
- Deckmatte, darunter eine Art geschäumter Beton Blöcke.
- Blöcke brechen ein unter der Last des Flugzeuges
- MTOW bremsen, RWY exit speed of 70kt. ohne Schaden am AC
- So breit wie RWY
- Länge nicht vorgegeben.



Surface Name	Type	Non-Instrument Runway	Non-Precision Approach RWY	Precision Approach RWY	RWY for Take-off
Conical Surface	OLS	✓	✓	✓	
Inner Horizontal Surface	OLS	✓	✓	✓	
Approach Surface	OLS	✓	✓	✓	
Transitional Surface	OLS	✓	✓	✓	
Take-off Climb Surface	OLS				✓
Inner Transitional Surface	OFZ			(✓)*	
Balked Landing Surface	OFZ			(✓)*	
Inner Approach Surface	OFZ			(✓)*	

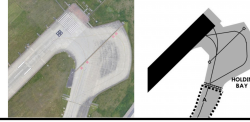
Table 10: Overview of Obstacle Limitation Surfaces (OLS) and Obstacle Free Zones (OFZ).

- **Take-off Climb Surface** – Startphase (blau)
- **Transitional Surface** – seitliche Begrenzung entlang Runway Strip

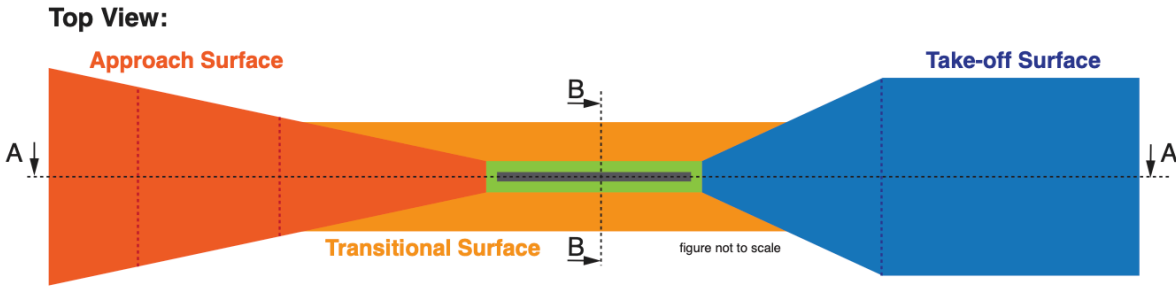
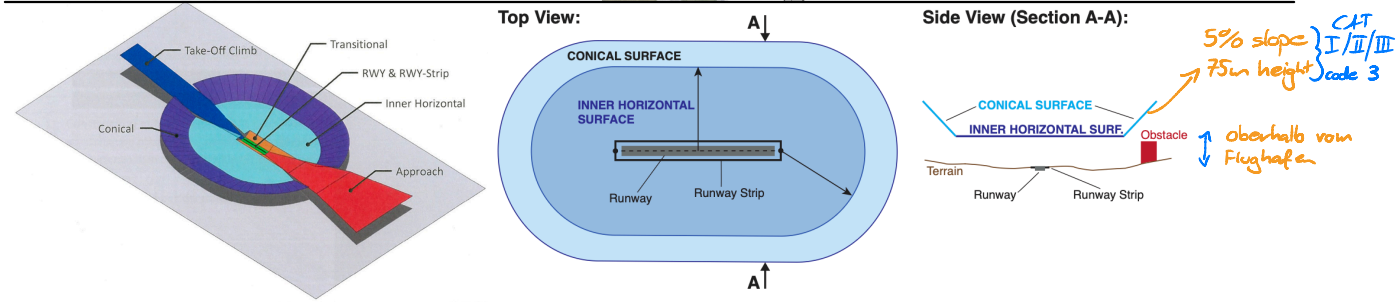
2.5.2 Obstacle Free Zones (OFZ) → high precision APP, ILS muss frei von Störfaktoren senden können

Nur für CAT II/III Runways – schützen auch vor **mobilen** Objekten: → z.B. wartende Flugzeuge am holding point.

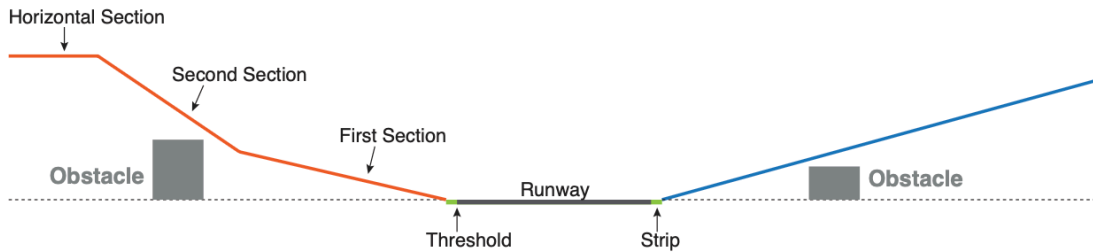
- **Inner Approach Surface** – Rechteckfläche vor Schwelle
- **Inner Transitional Surface** – näher an Runway als normale Transitional Surface → 2 Holding Points pro Taxiway
- **Balked Landing Surface** – Go-around Schutz



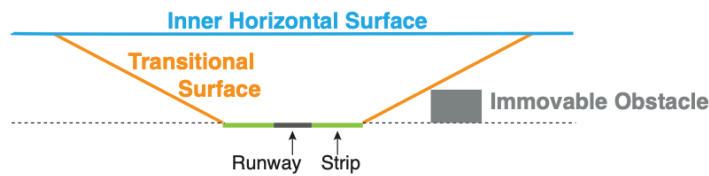
bsp. Geneva mehrere holding points



A - A profile view:



B - B profile view:

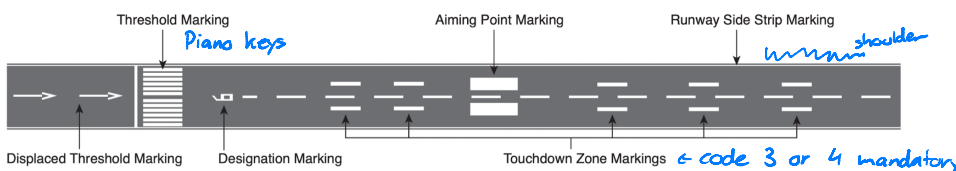


2.6 6. Markierungen & Beleuchtung

RWY: Weiss
TWY, Turnpads, stands: Yellow

2.6.1 Markierungen (weiß auf Runway, gelb auf Taxiway)

- **Designation Marking** - Runway-Nummer am Threshold
- **Threshold Marking** - "Klaviertasten"; Anzahl Streifen je nach Breite (30 m → 8, 45 m → 12, 60 m → 16)
- **Displaced Threshold** - Pfeile zeigen auf verschobene Schwelle
- **Centerline** - gestrichelt, durchgehend
- **Side Stripes** - Pflicht bei Precision Approach Runways



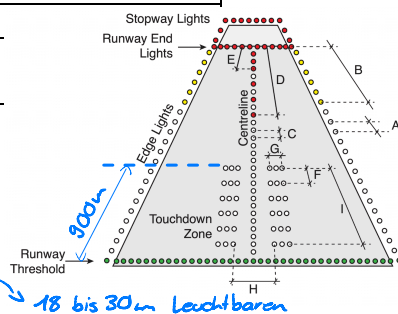
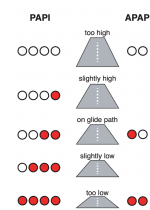


- **Aiming Point / Touchdown Zone** - Markieren optimalen und erlaubten Aufsetzbereich

2.6.2 Beleuchtung

Zwei Typen: **Inset Lights** (eingelassen, hitzebeständig) und **Elevated Lights** (frangible, max. 0.36 m hoch)
 Redundante Stromversorgung (Primär + Sekundär), strikte Switchover-Zeiten (CAT II/III: teilweise **1 Sekunde**).

Lichttyp	Farbe	Besonderheiten
Edge Lights	Weiß / letztes Drittel: Gelb	60 m (IFR) / 100 m (non-IFR) Abstand
Centerline Lights	Weiß → letzten 900 m: rot/weiß → letzten 300 m: rot	15 m Abstand, bis zu 0,6m versetzt damit Flugzeug nicht darüber rollt.
Touchdown Zone	Weiß (Barrettes) → 3er Grüppli	Pflicht CAT II/III
Threshold Lights	Grün	—
Runway End Lights	Rot	—



2.6.3 Anflugbefuerung

System	Einsatz
Simple Approach Lighting	Non-Precision, Code 3/4 non-instrument / 300m vor threshold
CAT I (Calvert / Barrett)	Precision CAT I; 5 Querbalken / Barrettes + 1 Querbalken
CAT II/III	Wie CAT I + erste 300 m als Barrettes + rote Seitenbarrettes

PAPI: 4 Lichter (rot/weiß) → 4 rot = zu tief, 4 weiß = zu hoch, 2+2 = on glide path

3 Taxiways

3.1 1. Dimensionierung von Taxiways

3.1.1 1.1 Grundprinzipien des Taxiway-Designs

Figure 33: Overview Approach Lighting Systems: Simple Approach Lighting System (left) Precision Approach CAT I (middle two), Precision Approach CAT II/III (right)

Taxiways verbinden Runways mit Parkpositionen und müssen sicher, effizient und kontinuierlich befahrbar sein.

Wichtige Designprinzipien:

- **Gerade Abschnitte** bevorzugen; Kurven nur wenn nötig, mit ausreichenden Radien und **Filletts** (Fahrbahnverbreiterungen in Kurven)
- **Einfaches Layout** → geringer Piloten-Workload, klare ATC-Anweisungen
- **Erweiterbarkeit** → Planung in Phasen (z.B. 20'000 bis 250'000 Bewegungen/Jahr)
- **Nachhaltigkeit** → kurze Taxirouten = weniger Treibstoff & Emissionen
- **Sicherheit** → Sichtbarkeit vom Tower, keine **Runway-Kreuzungen** (wenn nötig: 90°), Vermeidung von **Hotspots**

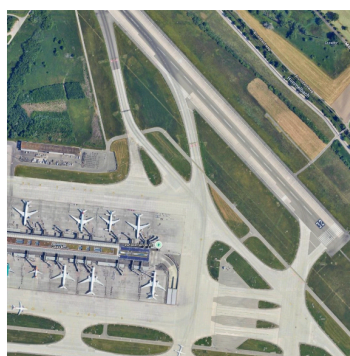
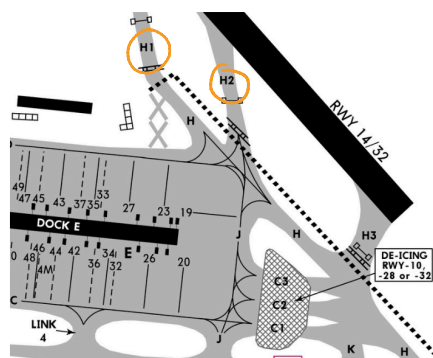
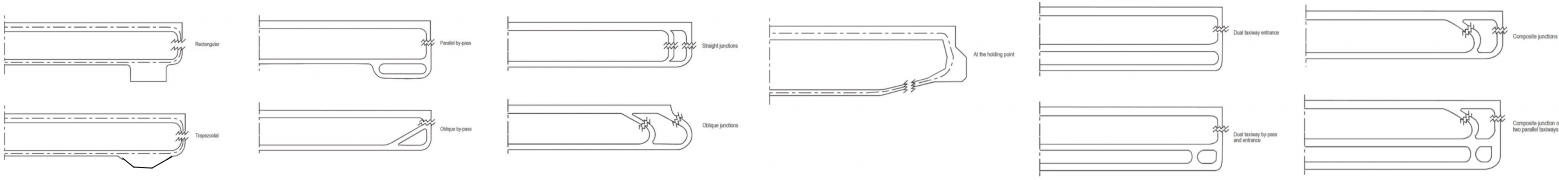


Figure 2: Real-World Example of **Hotspot** in a Taxiway System: **Rapid Exit** Taxiway H1 at Zurich Airport

TWY: immer gut beleuchtet!



3.1.2 1.2 Taxiway-Typen

Typ	Funktion
Aircraft Stand Taxilane	Auf dem Apron, nur Zugang zu Stands (max. 5 Stands/Seite bei Cul-de-sac)
Apron Taxiway	Durchfahrtsroute über den Apron, kein direkter Standzugang
Rapid Exit Taxiway (RET)	Spitzwinklig zur Runway → schnelleres Freimachen der Runway
Perimeter Taxiway	Umfährt Runway-Enden → keine Runway-Kreuzungen nötig (teuer, platzbedürftig)
Bypass	Verbreiterter Abschnitt zum Überholen, auch für Engine-Run-up
Holding Position	Wartebereich vor Runway; ideale Anordnung: 90° zur Runway → OFZ & ILS sensible

Mindestabstand Holding Position – Runway-Mittelachse (Auswahl):

Runway-Typ	Code 3/4
CAT I	90 m
CAT II/III	90 m
Non-instrument	75 m

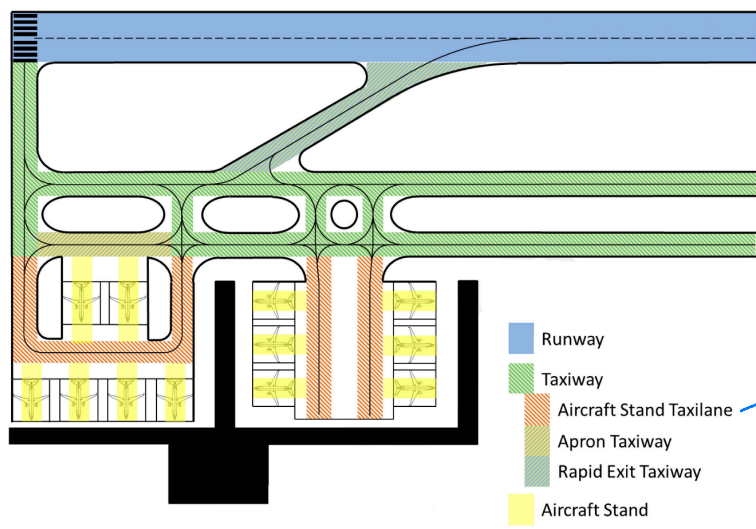
Type of Runway	Airport Code Number			
	1	2	3	4
Non-instrument	30 m	40 m	75 m	75 m
Non-precision	40 m	40 m	75 m	75 m
CAT I Approach	60 m	60 m	90 m	90 m
CAT II/III Approach	–	–	90 m	90 m
Take-off Runway	30 m	40 m	75 m	75 m

→ Reference field length (RFL)

Perimeter TWY



- ⊕ • kleineres Risiko, no RW/crossing
- Kapazitätserhöhung
- ⊖ • Höhere Kosten → AD, Land



→ ZRH im Innenhof

Figure 3: Taxiway Types Used at Aerodromes. From CASA (2025).

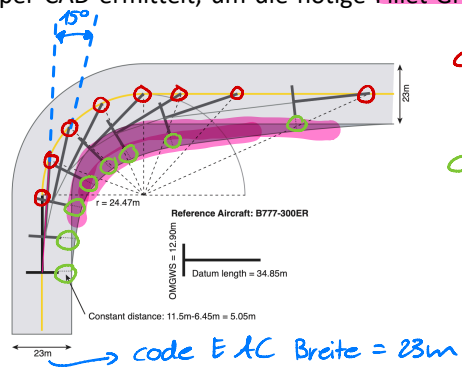
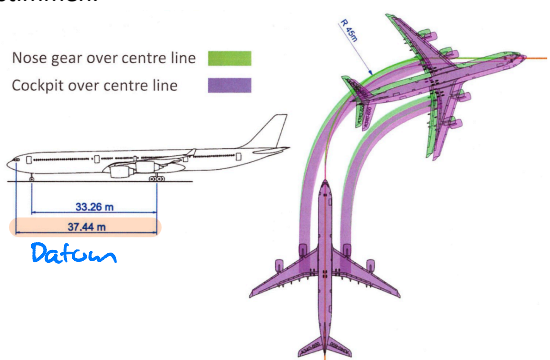
3.1.3 1.3 Taxiway-Design

Mindest-Kurvenradius: $r_{min} = \frac{v_{max}^2}{g \cdot f}$

mit $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $f = 0.133$ (alles in SI-Einheiten!)

Kurvengeometrie - Cockpit-over-Centerline-Prinzip: Auslegung erfolgt auf Basis der **Datum Length** (Abstand Hauptfahrwerk - Cockpit), nicht des Radstands. Dies ist konservativer und damit sicherer.

Die **Schleppkurve (Tractrix)** des Flugzeugs wird manuell oder per CAD ermittelt, um die nötige **Fillet-Größe** zu bestimmen.



- Cockpit immer auf centerline
- Abstand immer gleich, in Kurve und gerade aus

Figure 8: Approximation Method for Aircraft Tractrix to Determine Taxiway Fillet Size

Mindest-Fahrwerksabstand zur Taxiway-Kante (OMGWS-abhängig):

Bsp: oben mit 8777-300ER

OMGWS = 12.9m

TWY E = 23m

OMGWS	Min. Clearance
< 4.5 m	1.5 m
4.5-6 m	2.25 m
6-9 m	3-4 m
9-15 m	4 m

$$\text{Main Wheel Clearance} = \frac{23\text{ m} - 12.9\text{ m}}{2} = 5.05\text{ m.}$$

Shoulder: • RFF vehicles
• Übergang von befestigt zu unbef.
• muss Flugzeugrad tragen aber nicht asphaltiert

Code Letter	OMGWS	Taxiway	Shoulder	Strip
A	<4.5 m	7.5 m	not required	31 m
B	4.5-6 m	10.5 m	not required	40 m
C	6-9 m	15 m	25 m	52 m
D	9-15 m	23 m	34 m	74 m
E	9-15 m	23 m	38 m	87 m
F	9-15 m	23 m	44 m	102 m

Edge-to-Edge

Taxiway-Breiten (Auswahl):

Code	Breite	Schulter	Strip
C	15 m	25 m	52 m
E	23 m	38 m	87 m

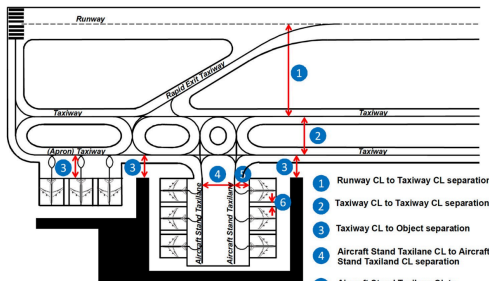
Taxiway Shoulders (ab Code C Pflicht): Schutz vor Erosion, FOD-Ingestion, Zufahrt für RFF-Fahrzeuge. **Taxiway Strip**: Sicherheitsbereich, keine Hindernisse erlaubt (außer bei Aircraft Stand Taxilanes).

3.1.4 1.4 Mindestabstände (Separation Distances)

Sechs Fälle werden unterschieden (z.B. Taxiway CL zu Runway CL, zu parallelem Taxiway, zu Objekten etc.).

Beispiel Code E, Code-4 Instrument Runway: **Runway CL zu Taxiway CL = 172.5 m**

Merke: TWY mit höherer Geschwindigkeit → mehr Abstand



bsp. 28H RWY 28 → Separation centerline adjacent TWY 116m code 4 AC head 180m Instr. ↳ non instr 115m

Code letter	Instrument runways				Non-instrument runways				Taxiway centre line to taxiway centre line (metres)	Taxiway, other than aircraft stand, centre line to taxiway centre line (metres)	Aircraft stand centre line to aircraft stand centre line (metres)	Aircraft stand centre line to object (metres)
	1	2	3	4	1	2	3	4				
A	77.5	77.5	—	—	37.5	47.5	—	—	23	15.5	19.5	12
B	82	82	152	—	42	52	87	—	32	20	28.5	16.5
C	88	88	158	158	48	58	93	93	44	26	40.5	22.5
D	—	—	166	166	—	—	101	101	63	37	59.5	33.5
E	—	—	172.5	172.5	—	—	107.5	107.5	76	43.5	72.5	40
F	—	—	180	180	—	—	115	115	91	51	87.5	47.5

For 6, see dimensioning of stands

Praxisbeispiel: Piste 28 Zürich → nur ~116 m Abstand → daher als Non-Instrument Runway klassifiziert (Minimum 115 m).

3.2 2. Rapid Exit Taxiways (RETs)

3.2.1 2.1 Einfluss auf Kapazität

RETs ermöglichen das Verlassen der Runway bei höherer Geschwindigkeit (Winkel 25°-45°, ideal 30°). Dies reduziert die **Runway Occupancy Time (ROT)** und erhöht den Durchsatz:

$$\text{RWY capacity} \longrightarrow \mu = \frac{1}{E[o]}, E[o] = \sum_{i=1}^k p_i \cdot o_i$$

↳ design hour load = p_i

↳ ROT (zeit von touch-down bis RWY completely vacated)

Beispiel: 60 % Code C (o₁ = 50 s) + 40 % Code E (o₂ = 55 s) → E[o] = 52 s

3.2.2 2.2 Anzahl benötigter RETs

RETs sind nur sinnvoll bei Arrival- oder Mixed-Mode-Betrieb (nicht bei reinen Departure-Runways). ICAO empfiehlt RETs nur wenn > 25 Bewegungen/Stunde in der Spitzenstunde.

For RET design, aircraft are typically grouped into categories according to their threshold speed v_{th}, as summarized.

Flugzeugkategorien nach Schwellengeschwindigkeit:

Kategorie	v _{th}	Beispiele
A	< 91 kt	Cessna 172
B	91-120 kt	Dash 8C
C	121-140 kt	A320, B737, A330
D	141-165 kt	B777, B747

Threshold Speed

Turn off speed: Sichere Geschwindigkeit um die RWY zu verlassen und RET zu fahren.

3.2.3 2.3 Lage des RETs (Three-Segment Method)

$$D = S_1 + S_2 + S_3$$

Segment	Phase	Formel
S_1 (Flare)	Threshold → Touchdown	$S_{1,0} + \text{Hang- \& Windkorrektur}$
S_2 (Transition)	Touchdown → Bremsbeginn	$v_{av} \cdot 10 s$
S_3 (Braking)	Bremsen bis Ausfahrt	$\frac{v_{ba}^2 - v_{ex}^2}{2a}$

Wichtige Werte: $v_{td} = v_{th} - 5 kt$, $v_{ba} = v_{th} - 15 kt$, $v_{ex} = 50 kt$, $a = 1.5 m/s^2$

Segment S_1

Aircraft Category	A & B	C & D
$S_{1,0}$	250 m	450 m
Correction for down-slope	+30 m for each -0.25 %	+50 m for each -0.25 %
Correction for tailwind	+30 m for each 5 kn	+50 m for each 5 kn

v_{av} : avg speed during transition phase

v_{ba} : brake application speed

v_{ex} : turn off speed

a : deceleration during brake phase

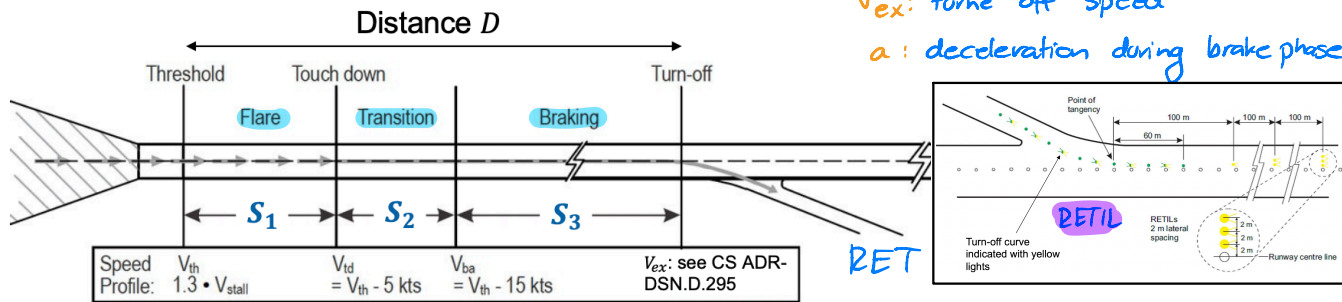


Figure 11: Three-Segment Method

RETIL (Rapid Exit Taxiway Indicator Lights): Gelbe Lichter im Runway-Belag zeigen Abstand zum RET an (300 m = 3 Lichter, 200 m = 2, 100 m = 1). Ab ~60 m vor RET: abwechselnd grün/gelb.

3.3 3. Markierungen, Beleuchtung, Beschilderung

3.3.1 3.1 Markierungen (gelb)

- **Centerline:** 20 cm breite durchgehende Linie; auf Kurven versetzt (konstanter Abstand zur Außenkante)
- **Side Stripe:** 2x 15 cm breite Linien, 15 cm Abstand → Grenze Tragfähigkeit
- **Runway Holding Position:** Muster A (überall) und Muster B (nur CAT I-III mit mehreren Holding Positions); gestrichelt zeigt Richtung Runway
- **Enhanced Centerline:** Doppelte gestrichelte Linien beidseitig → warnt vor Runway-Nähe
- **Mandatory Instruction Marking:** Weiß auf Rot, bei Taxibreite > 60 m oder ohne Beschilderung möglich

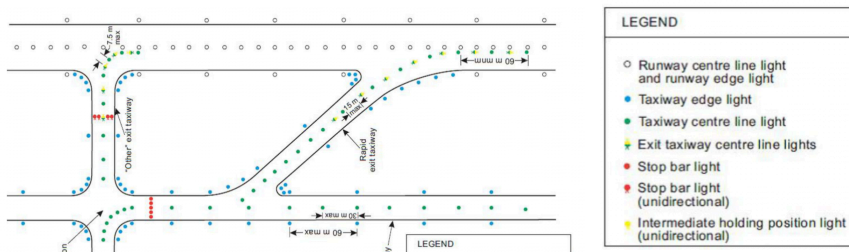


Figure 17: Enhanced Taxiway Centerline Marking (left) and Mandatory Instruction Markings (right)

3.3.2 3.2 Beleuchtung

Licht	Farbe	Pflicht?
Centerline Lights	Grün (vor Runway: grün/gelb wechselnd)	Empfohlen
Edge Lights	Blau	Pflicht (Nachtbetrieb)
Stop Bar	Rot	ATC-gesteuert
No-Entry Bar	Rot	—

Sea-of-Blue-Effekt: viele blaue Lichter auf engem Raum → schlechte Erkennbarkeit → Lösung: Reflektoren statt Lichter.

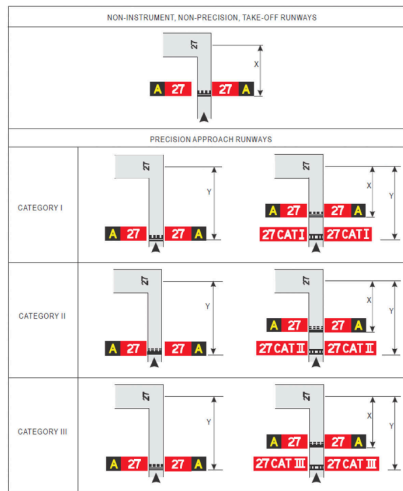


3.3.3 3.3 Beschilderung

Instruction Signs (rot/weiß): Runway-Bezeichnungen, Holding Positions, No-Entry

Information Signs: *Location* (schwarz/gelb = aktueller TWY), *Direction* (gelb/schwarz = Richtungsanzeige)

Runway designation of a runway extremity (Example)	25	Indicates a runway-holding position at a runway extremity
Runway designation of both extremities of a runway (Example)	25-07	Indicates a runway-holding position located at taxiway/runway intersection other than runway extremity
Category I hold position (Example)	25 CAT I	Indicates a category I runway-holding position at the threshold of runway 25
Category II hold position (Example)	25 CAT II	Indicates a category II runway-holding position at the threshold of runway 25
Category III hold position (Example)	25 CAT III	Indicates a category III runway-holding position at the threshold of runway 25
Category II and III hold position (Example)	25 CAT II/III	Indicates a joint category II and III runway-holding position at the threshold of runway 25
Category I, II and III hold position (Example)	25 CAT I/II/III	Indicates a joint category I, II and III runway-holding position at the threshold of runway 25
NO ENTRY	⊖	Indicates that entry to an area is prohibited
Runway-holding position (Example)	B2	Indicates a runway-holding position (in accordance with CS ADR-DSN.D.335(b)(1))



Alle Schilder müssen "frangible" sein (sollbruchstelle)



Manchmal steht TOR (Take-off-run-available) in Meten

3.4 4. Aprons und Stands

Apron: Fläche um das Flugzeug zu beladen und entladen, Tanken, reinigen, catering...

3.4.1 4.1 Apron-Kategorien

→ wenn Flugzeug geparkt wird lang-term.

Passenger Terminal, Remote Parking, General Aviation, Cargo Terminal, Service, **Isolated Apron** (Notfall/Bedrohungslage, geheime Lage).

Designprinzipien: simultane Bewegung Flugzeug/Fahrzeuge, kurze Taxirouten, Redundanz der Routen, modular erweiterbar.

3.4.2 4.2 Stands

Azimuth Guidance for Nose-In Stands

Führungssysteme: DGS (automatisch), Marshaller, AGNIS (Parallaxe-Prinzip)

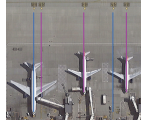
↳ Docking Guidance System

Stand-Typen: *contact stands / remote (or open)*

Typ	Pushback?	Platzbedarf	Typisch
Angled Nose-In/Out	Nein	Hoch	Kleinflughäfen
Parallel <i>zum Terminal</i>	Nein	Hoch	—
Taxi-In & Push-Out	Ja	Gering	Großflughäfen (Goldstandard)
MARS	Ja	Variabel	Gemischter Flugzeugmix

MARS: Multiple Aircraft Ramp System Stand

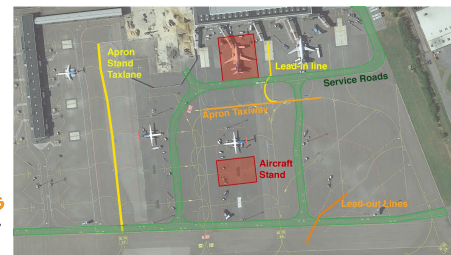
Stand-Abmessungen: ↳ high complexity



3 Code C AC

2 Code E AC

Wing-tips



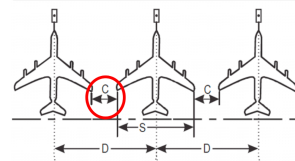
Code Letter	Example A/C Type	Width of Stand	Length of Stand	Clearance
A	Learjet 45	15 m	17.88 m	3 m
B	CRJ9	24 m	36.3 m	3 m
C	B727	36 m	46.7 m	4.5 m
D	MD11	52 m	61 m	7.5 m
E	A346	65 m	75.4 m	7.5 m
F	A748	80 m	76.3 m	7.5 m

critical AC

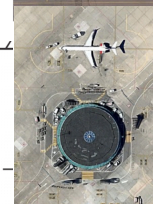
↳ keine genauen Regeln über Länge → Definiert durch längstes AC pro Kategorie
Bsp. B727 → 46,7 m

Abstand zwischen Lead-in-Linien: $D = \frac{s_1}{2} + C + \frac{s_2}{2}$ $s_1 \neq s_2$

$D = S + C$ $s_1 = s_2$



Angled stand



Parallel stand

3.4.3 4.3 Jetblast

Hochgeschwindigkeitsstrahl der Triebwerke; relevant ist der **Breakaway Thrust** (minimaler Schub für Anrollen). Schutz durch **Blast Fences** (Beton oder perforiertes Metall).

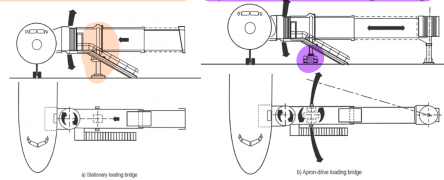
Moveable Steps:



Mobile Lounge:



Stationary Loading Bridge Apron Drive Loading Bridge



Aircraft-contained steps:



3.4.4 4.4 Aircraft Access

Moveable Steps / Mobile Lounge / Aircraft-Integrated Steps / **Stationary Loading Bridge** (fest, schwenk-/höhenverstellbar) / **Apron-Drive Loading Bridge** (zusätzlich fahrbar auf dem Apron).

4 Passenger Buildings (Docks & Terminals)

4.1 1. Einführung

Terminal vs. Dock:

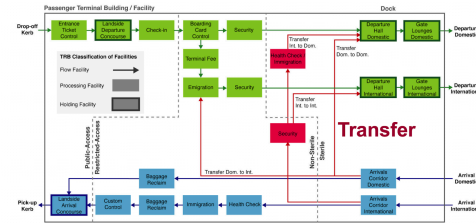
- **Terminal** = nicht-steriler Bereich (vor der Sicherheitskontrolle)
- **Dock** = steriler Bereich (nach der Sicherheitskontrolle)

Drei Passagierströme:

Local Outbound (Abflug), **Local Inbound** (Ankunft), **Transfer**

Local Outbound

Local Inbound



Zwei Schnittstellen: **Landside** (Bahn, Bus, Auto, etc.) ↔ **Passagiergebäude** ↔ **Airside**

4.2 2. Flächenbedarf

Zwei Faustregeln zur Abschätzung:

Für diese Menge wird das Terminal ausgelegt. Meistens für die 30-höchste-Stunde des Jahres

Nach DHL (Design Hour Load):

Terminaltyp	m ² pro DHL-Passagier
Simple low fare	8–15
Domestic	20–25
Domestic & International	30
International	35
Major international gateway	50

$$DHL = \frac{\text{Jahrespasagiere}}{\text{Betriebstage}} \times \text{Peaking Factor}$$

Peaking Faktor → 0,08 - 0,12

Nach jährlichem Aufkommen: ~8'000–12'000 m² pro Mio. Passagiere (MPPA)

4.3 3. Stakeholder-Anforderungen

4.3.1 Passagiere

Unterscheidung nach: **Domestic/International**, **Local/Transfer**, **PRM** (Passengers with Reduced Mobility), **Business/Leisure** etc.

Segregation: Sterile und nicht-sterile Passagierströme müssen räumlich getrennt werden. Schengen-/Non-Schengen-Trennung ist in der Schweiz gesetzlich vorgeschrieben.

Sicherheits- und Passkontrollanforderungen (Schengen-Flughafen):

Von → Nach	Sicherheit	Passkontrolle
Schengen → Schengen	Nein	Nein*
Schengen → Non-Schengen	Nein	Ja
Non-Schengen (Non-EU) → Schengen	Ja**	Ja

* Ausnahmen möglich; ** One-Stop-Security-Länder (z.B. USA, Kanada) ausgenommen

MCT (Minimum Connecting Time):

Origin → Destination	Typische MCT
Domestic → Domestic	35–45 min
International → International	45–60 min

Kürzere MCT = mehr Anschlussflüge pro Wave → attraktiverer Hub.

Wayfinding (IATA-Grundsätze): → *Zum Gate, Beschilderung*

Einfachste Entscheidung = keine Entscheidung (z.B. „To All Gates“)

Wenn nötig: max. 2 Optionen, sequentielle Entscheidungspunkte
 Cross-Flows und Stockwerkwechsel minimieren

Level of Service (LoS): kurze Wartezeiten, klare Beschilderung, angenehmes Klima, kurze Laufwege, Shops/Restaurants.

4.3.2 Airlines

Gebäudelayout beeinflusst direkt: Taxizeiten, MCT, Gepäcktransferzeiten, Passagier-Amenities.

- **Hub-and-Spoke-Airlines:** kurze Umsteigewege, separate Security für Vielflieger, Lounges
- **Point-to-Point-Airlines:** minimale Bodenzeiten und Infrastrukturkosten

4.3.3 Airport Operators & Owners

Zwei Designphilosophien:

- **Prestigiös** (z.B. TWA Terminal JFK, Hamad International Doha): teuer, schwer erweiterbar
- **Funktional** (z.B. Luxembourg Airport): günstiger, modularer, leichter erweiterbar

Kostentreiber:

Faktor	Auswirkung
Anzahl Ebenen	1 Level = günstig (CAPEX↓), aber schwer erweiterbar
Baggage Handling System (BHS)	Unterirdisch teuer, oberirdisch platzbedürftig
Zentralisiert vs. dezentralisiert	Zentralisiert: ein Zugang (Bottleneck-Risiko); Dezentralisiert: mehrere Zugänge (teurer)

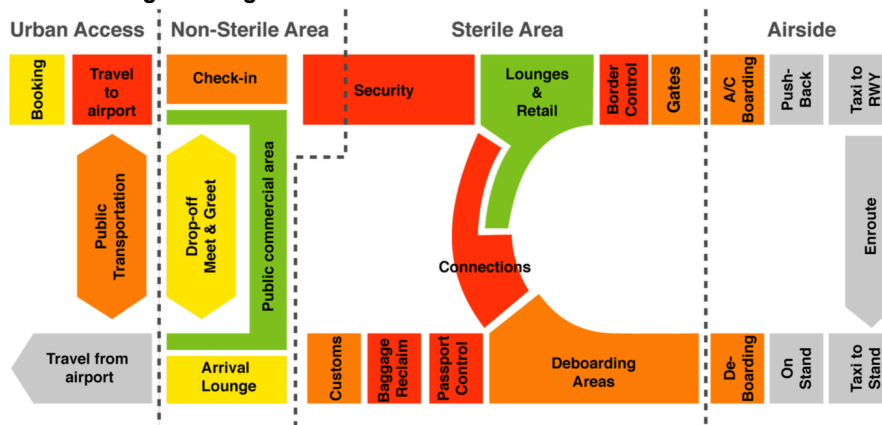
capital expenditures: Geld für neue Gebäude für mehrere Jahre

Einnahmen: Airport Charges, Retail/F&B, Parking, Vermietung.

- **Single-till:** Aeronautical + Non-Aeronautical kombiniert → tiefere Airline-Gebühren (*alles kommt in einen Topf → retail ↑ Gebühren ↓*)
- **Dual-till:** getrennt → höhere Airline-Gebühren (Zürich: Dual-till, reguliert per Gesetz)

Retail-Platzierung: in „Low-Stress-Zonen“ → nach der Sicherheitskontrolle (Abflug) oder vor dem Gepäckband (Ankunft).

Stress Levels along Passenger Process



Own illustration, based on material provided by Airsight GmbH, Course "Introduction to Passenger Terminal Planning & Design"

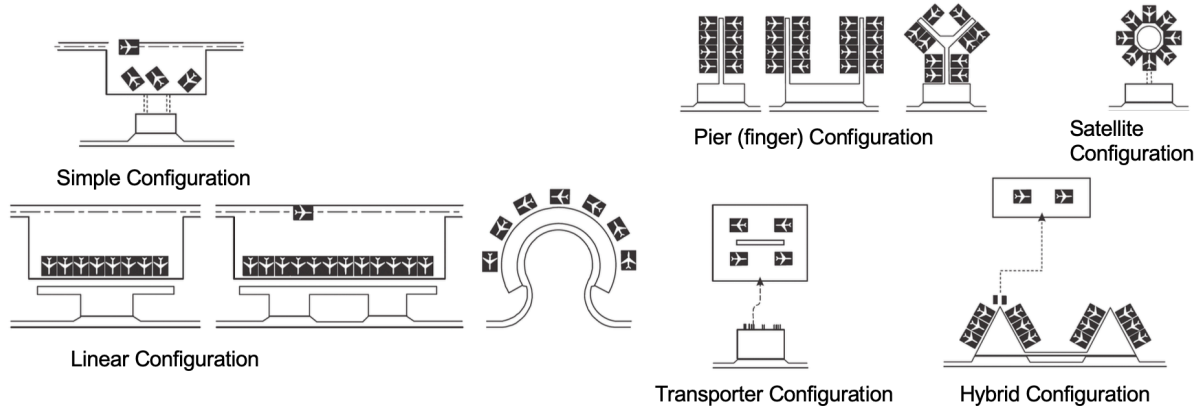
Note: Passengers are more likely to visit shopping facilities if they are not "stressed" → location of retail after security screening

4.3.4 Governmental Agencies (Behörden)

Polizei, Zoll, Grenzschutz → Fokus auf Sicherheit, nicht Effizienz → häufig Engpässe, wenig Verhandlungsspielraum.

4.4 4. Passagiergebäude-Konfigurationen

Laut ICAO Doc 9157 gibt es 5 Grundkonfigurationen (in der Praxis meist als **Hybrid**):



Konfiguration	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Simple	Kein Dock, Apron getrennt vom Terminal	Günstig, gut erweiterbar	Nur für kleine Flughäfen, viel Serviceverkehr
Linear	Dock direkt am Terminal, Jetbridges	Direkte Anbindung, erweiterbar	Begrenzter Vorplatz, Pushback-Probleme
Pier / Finger	Zentrales Terminal mit Fingern (gerade, Y, T)	Platzsparend (Stands beidseitig)	Lange Laufwege, schwer erweiterbar
Satellite	Dok physisch vom Terminal getrennt (APM-Verbindung)	Kurze Transferzeiten innerhalb Satellite	Transfers zwischen Satellites lang, teuer zu erweitern
Transporter (Bus Gate)	Nur Terminal, Busse zum Flugzeug	Flexibel, günstig erweiterbar	Niedriger LoS, längere Transferzeiten
Hybrid	Kombination der obigen	Praxisrelevant	Individuell unterschiedlich

4.5 5. Frontlänge & Anzahl Gates

$$\text{Frontage} = \text{Anzahl Stands} \times \text{Standbreite} + (\text{Anzahl Stands} - 1) \times \text{Clearance}$$

Beispiel: 10 Code-C-Stands: $10 \times 36 \text{ m} + 9 \times 4.5 \text{ m} = 400.5 \text{ m}$

Benötigte Anzahl Stands (bei Poisson-Verteilung, $d = \text{DHL-Flüge}$):

$$S = d + \sqrt{d}$$

Backup

d: Scheduled flights during DHL
S: Stands

→ Deckt Nachfrage in ~85% der Fälle.

→ Stands die einer Airline zugeteilt sind.

Einfluss von Dedication: Je mehr Stands exklusiv für eine Airline reserviert sind, desto mehr Stands werden insgesamt benötigt (Backup-Anteil $\frac{1}{\sqrt{d}}$ steigt bei kleinem d).

4.6 6. Evaluation von Passagiergebäuden

Vier Bewertungskriterien:

4.6.1 1. Laufwege der Passagiere

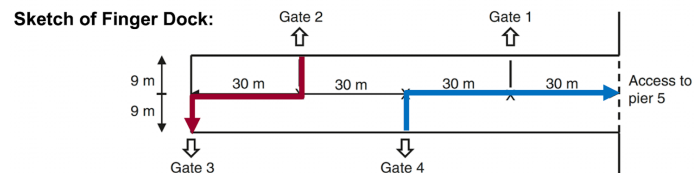
Mittels **Impedanzmatrix I** (Distanzen zwischen Gates/Terminal) und **Flussmatrix F** (Passagierströme):

↳ Laufstrecke zwischen Gates X und Y

$$PI = F \circ I \text{ (elementweise Multiplikation)}$$

Durchschnittliche Laufstrecke:

$$\bar{d} = \frac{\sum PI}{\sum F}$$



Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung zeigt: Intelligentes Gate-Management kann Laufwege signifikant reduzieren.

Impedance Matrix I:

	From Gate	1	2	3	4	5
1	0	78	108	48	39	
2	78	0	48	48	99	
3	108	48	0	78	129	
4	48	48	78	0	69	
5	39	99	129	69	0	

To Gate

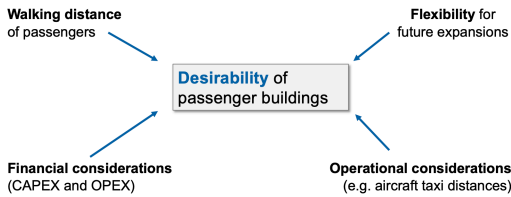
Flow Matrix F:

	Transfer PAX	1	2	3	4	5
1	10	0	0	0	90	
2	0	20	10	40	30	
3	25	10	20	15	30	
4	15	0	15	70	20	
5	50	70	70	30	0	

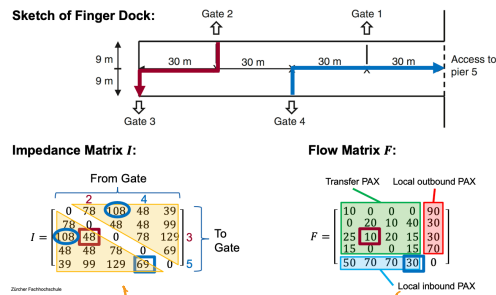
Local inbound PAX

Wie viele PAX gehen von Gate X zu Y

Various factors can be used to evaluate the desirability of passenger buildings. A number of possible factors are considered below:



Evaluation of Walking Distance(s)
De Neufville, Barros and Belin (2002)



Evaluation of Walking Distance(s)

De Neufville, Barros and Belin (2002)

Passenger-Impedance Matrix PI:

$$PI = (I \cdot F)_{ij}$$

$$PI = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 3510 \\ 0 & 0 & 480 & 1920 & 2970 \\ 2700 & 480 & 0 & 1170 & 3870 \\ 720 & 0 & 0 & 0 & 4830 \\ 1950 & 6930 & 9030 & 2070 & 0 \end{bmatrix}$$

Total passenger-meters walked: 42630PAXm

Element-wise multiplication of matrices

Avg. Walking Distance per PAX:

$$\frac{42630PAXm}{620PAX} = 68.76m$$

$$F = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 90 \\ 0 & 20 & 10 & 40 & 30 \\ 25 & 10 & 20 & 15 & 30 \\ 15 & 0 & 0 & 15 & 70 \\ 50 & 70 & 70 & 30 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{Transfer PAX} \\ \text{Local outboard PAX} \\ \text{Local inbound PAX} \\ \text{Local outboard PAX} \\ \text{Local inbound PAX} \end{matrix}$$

Total PAX flow: 620

220 PAX enter and 220 PAX exit through the end of the pier. 180 Passengers transfer between A/C

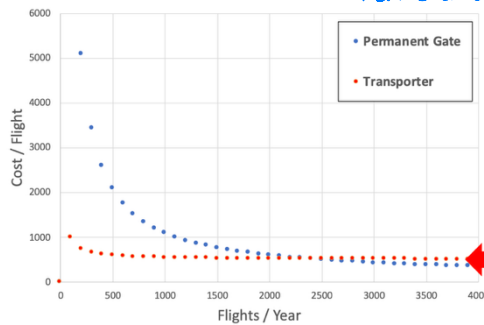
4.6.2 2. Taxidistanzen der Flugzeuge

Gleiche Methode wie für Laufwege. Kosten: ~\$50-100 pro Taximinute. Lineare Konfigurationen haben tendenziell kürzere Taxidistanzen als komplexe Formen.

4.6.3 3. Finanzielle Betrachtung (CAPEX vs. OPEX)

Beispiel Busgate vs. Permanentes Gate:

	Permanentes Gate	Busgate
CAPEX	\$10 Mio.	\$0.5 Mio.
CAPEX/Jahr	\$1 Mio.	\$0.05 Mio.
OPEX/Flug	\$100	\$500



Cost per Flight for Transporter are mainly driven by operational costs

→ Bei wenig Flügen: Busgate günstiger. Bei hohem Aufkommen: Permanentes Gate günstiger.

CAPEX: capital expenditures
• Investment in Infrastruktur u. Ausrüstung

OPEX: operational expenditures
• Deckt die operationellen Kosten
Maintenance, cleaning, staffing.

4.6.4 4. Flexibilität

Unsichere Zukunft (Nachfrage, Flottenmix, Demographie) → Gebäude müssen anpassbar sein.
Massnahmen:

- **Modulare Bauweise** (Bangkok),
- **Temporäre Strukturen** (Berlin Tegel)
- **Shared-Use Facilities** (Vancouver)
- **Common-Use Equipment** (Self-Check-in).

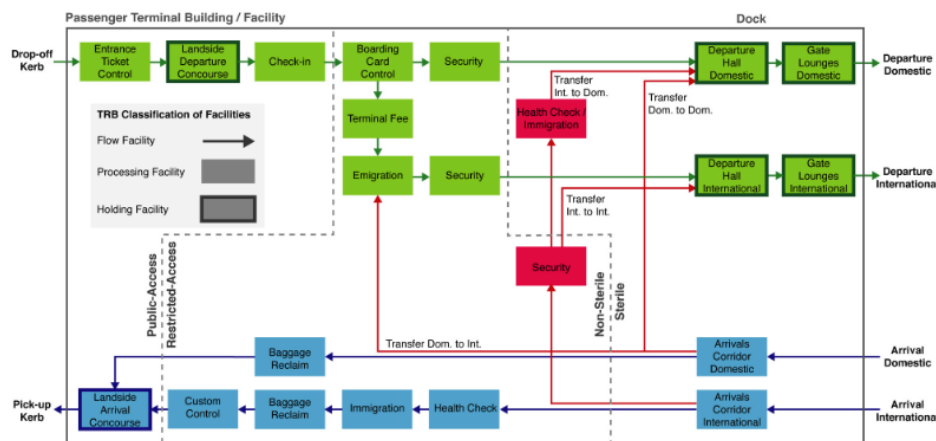
5 Airport Passenger Terminal Facilities

5.1 Passagierflüsse & Grundstruktur

Drei Passagiertypen durchqueren das Terminal:

- **Local Outbound** (grün) - abfliegende Passagiere
- **Local Inbound** (blau) - ankommende Passagiere
- **Transfer** (magenta/rot) - Umsteigepassagiere

Das Terminal gliedert sich in **Public Access** (öffentlich) und **Restricted Access** (nur Passagiere/Personal). Innerhalb des Restricted Area gibt es den **Non-Sterilen** (vor Security) und den **Sterilen** Bereich (nach Security). Gescreente und ungescreente Passagiere dürfen sich **nicht vermischen**.



Caution: Local alterations may apply (e.g. one-stop security concept)

5.2 Einrichtungen für abfliegende Passagiere



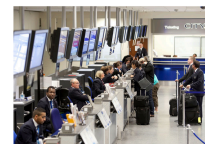
5.2.1 Departure Concourse (Abflughalle)

Erster Anlaufpunkt offen, hell, natürlich beleuchtet. Funktionen: Orientierung/Wayfinding, Retail, Büros, Restrooms, ggf. Trennung Passagiere/Besucher (z.B. Indien).

5.2.2 Check-in / Bag Drop

Passagiere erhalten Boarding Pass (falls nicht online) und geben Gepäck auf. Gepäck wird gewogen, getaggt und ins **Baggage Handling System (BHS)** eingespeist. Übergrosses Gepäck → **OOG-Counter**.

OOG: Out-of-gauge

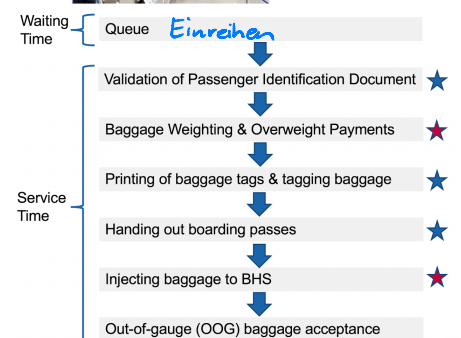
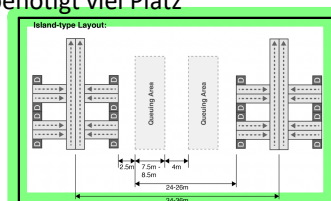
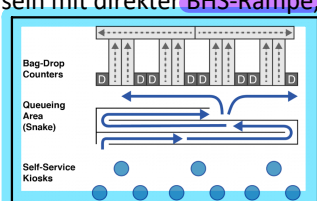
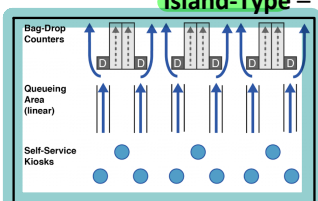


Zwei Prozessarten:

- **Konventionell** (teuer, personalintensiv) - heute nur noch für **Premium-Kunden**
- **Self-Service** (Standard) - Kiosk + Bag-Drop-Counter

Drei Layouts:

- **Linear Flow-Through** – geradlinig, Ein-/Ausgang gegenüber, BHS-Anbindung via Lift
- **Linear Uninterrupted** – Snake-Queue, gleichmässige Wartezeiten
- **Island-Type** – Inseln mit direkter **BHS-Rampe**, benötigt viel Platz



5.2.3 Boarding Pass Check

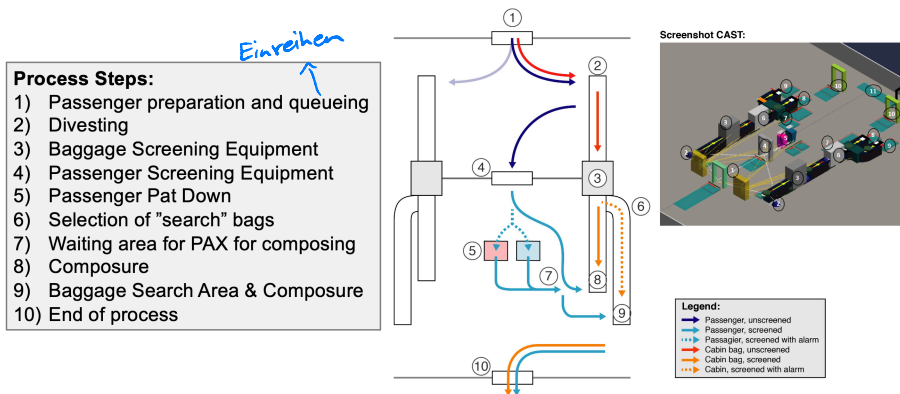
Trennt öffentlichen vom eingeschränkten Bereich. Europa/USA: nach Check-in. Indien: bereits am Gebäudeeingang. Meist vollautomatisch (Ticketscanner).

5.2.4 Security Check

10-stufiger Prozess – komplexester Ablauf im Terminal. Zwei Layouts:

- **Zentralisiert** – effizienter (Skaleneffekte), aber **Single Point of Failure**
- **Dezentralisiert** – weniger effizient, aber flexibler und ausfallsicherer → z.B. pro Gate eine Security

Wichtig: Einseitige Durchflussrichtung (Sterile ↔ Non-Sterile strikt getrennt).



14

5.2.5 Emigration

Für internationale Passagiere. Staatlich geregelt – Flughäfen haben wenig Einfluss. Physische Trennung gecheckte/ungecheckte Passagiere zwingend.

EU Entry/Exit System (EES) – seit Oktober 2024 schrittweise eingeführt. Gilt für Nicht-EU/EEA/Schweizer Bürger. Ersetzt Paspstempel durch biometrische Daten (Gesicht, Fingerabdrücke). Schweizer Flughäfen betroffen: Zürich, Genf, Basel-Mulhouse. → Mehr Platzbedarf für Kioske und Warteflächen. } 29 Schengen-Staaten.

5.2.6 Departure Hall (Retail-Bereich) & Gate

- **Departure Hall:** Offen, hell, Retail (Passagiere nach Security entspannter → kauffreudiger), Transfer-Desks, Lounges, klare Beschilderung.
- **Gate:** Wartebereich + Zirkulation. Drei Typen: **Jetbridge** (komfortabel, teuer), **Busgate**, **Walk-on Gate**.

5.3 Einrichtungen für ankommende Passagiere

5.3.1 Arrival Corridors

Erster Kontaktpunkt für ankommende und Transfer-Passagiere. Design: natürliches Licht, intuitive Beschilderung, kurze Wege, ausreichend dimensioniert gegen Stau.

5.3.2 Immigration

Staatlich organisiert, Flughäfen haben wenig Einfluss. Physische Trennung kontrollierter/unkontrollierter Passagiere zwingend.

EES (Entry/Exit System) seit Oktober 2024: Gilt für Nicht-EU/EEA/Schweizer Bürger in allen 29 Schengen-Staaten. Ersetzt Paspstempel durch biometrische Erfassung (Gesicht + Fingerabdrücke). In der Schweiz nur an Flughäfen relevant: **ZRH, GVA, BSL**. Konsequenz: mehr Platzbedarf für Kioske, Schalter und Wartezonen.

5.3.3 Baggage Reclaim

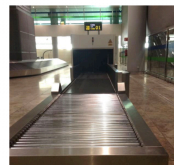
Internationale und Inlandpassagiere gemeinsam. In der **EU** können Transfer-Passagiere direkt zum Gate; in den **USA** müssen sie Gepäck abholen und neu einchecken.

IATA-Richtwerte Bandlänge: **40 m** (Narrowbody) / **70 m** (Widebody). Zusätzlich OOG-Belt für Sondergepäck. Bandformen: linear, L-, T-, U-förmig.

Closed Loop Baggage Claim Carousel → linear-type belts, L, T, U shaped belts



Free Roller Conveyor:



5.3.4 Customs (Zoll)

Effektivität wird nicht an Durchsatz, sondern an **Erkennungsrate und Compliance** gemessen. Standard: **3-Kanal-System**:

Kanal	Für wen
Green	Nichts zu deklarieren (international)
Blue	Nichts zu deklarieren, aus EU-Zollunionsstaat (EU-spezifisch)
Red	Waren zu deklarieren (international)

5.3.5 Arrivals Hall

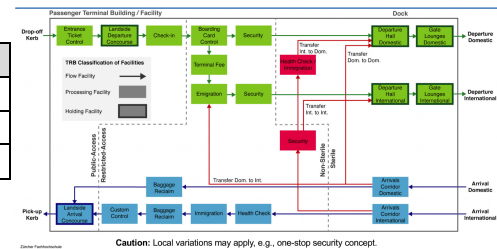
Öffentlicher Bereich, hell und einladend. Neben Passagieren auch **Meeters & Greeters** – ausreichend Zirkulations- und Sitzflächen einplanen. Typischer Design-Trick gegen Stau: hüfthoher Raumteiler vor der Ausgangstür zwingt Passagiere zum Abbiegen.

5.3.6 Transfer-Passagiere

Keine eigenen Prozesse. Je nach Herkunft ggf. Security/Immigration erforderlich, dann direkt zum Gate.

5.4 Facility-Typen

Typ	Funktion	Beispiele
Flow Facility	Bewegung von A nach B	Korridore, Treppen, Lifte
Processing Facility	Passagiere werden bearbeitet	Check-in, Security, Zoll
Holding Facility	Warten zwischen Prozessen	Gate-Warteraum, Shops



5.5 Levels of Service (LoS) → Komfort standard

Zwei Dimensionen laut IATA ADRM (12. Edition): **ADRM: Airport Development Reference Manual**
IATA: International Air Transport association

- **Spatial LoS** [m²/PAX] - Platz pro Person
- **Temporal LoS** [min] - akzeptable Wartezeit

Drei Kategorien: **Over-Design** (zu viel Platz/Kapazität → hohe Kosten) | **Optimum** | **Sub-Optimum** (zu wenig → schlechte Servicequalität)

LOS Guidelines	SPACE GUIDELINES [m ² /PAX]			MAXIMUM WAITING TIME GUIDELINES Economy Class [minutes]			MAXIMUM WAITING TIME GUIDELINES Business & First Class [minutes]			OTHER GUIDELINES & REMARKS		
	Over-Design	Optimum	Sub-Optimum	Over-Design	Optimum	Sub-Optimum	Over-Design	Optimum	Sub-Optimum	Over-Design	Optimum	Sub-Optimum
Public Departure Hall	>2.3	2.0-2.3	<2.0	n/a			n/a			Optimum portion of seated occupants 15-20%		
Check-in	Self-service kiosk Boarding pass / bag tagging Bag Drop Desk (queue width 1.4-1.6m)	>1.8	1.3-1.8	<1.3	<1.0	1.0-2.0	>2.0	<1	1.0-2.0	>2.0		
	Check-in desk (queue width 1.4-1.6m)	>1.8	1.3-1.8	<1.3	<1.0	1.0-5.0	>5.0	<1	1.0-3.0	>3.0		
Security Control (queue width 1.2m)	Staffed Emigration Desk	>1.8	1.3-1.8	<1.3	<10	10-20	>20	<3.0	3.0-5.0	>5.0		
	Automatic Emigration Desk	>1.8	1.3-1.8	<1.3	<10	10-20	>20	<1.0	1.0-3.0	>3.0		
Emigration Control	Staffed Emigration Desk	>1.2	1.0-1.2	<1.0	<5.0	5.0-10	>10	<1.0	1.0-3.0	>3.0		
	Automatic Emigration Desk	>1.2	1.0-1.2	<1.0	<1.0	1.0-5.0	>5.0	<1.0	1.0-3.0	>3.0		
Gate Holdroom	Seating	>2.2	1.8-2.2	<1.8	n/a			n/a			Optimum portion of seated occupants	
	Standing	>1.5	1.2-1.5	<1.2	n/a			n/a			50-70%	
Immigration Control (Inbound Passport control) (queue width 1.2)	Staffed Immigration Desk	>1.2	1.0-1.2	<1.0	<5.0	5.0-10	>10	<1.0	1.0-5.0	>5.0		
	Automatic Immigration Desk	>1.2	1.0-1.2	<1.0	<1.0	1.0-5.0	>5.0	<1.0	1.0-5.0	>5.0		
Baggage Reclaim	Narrow Body Aircraft	>1.7	1.5-1.7	<1.5	<0	0 / 15	>15	<0	0 / 15	>15	The first waiting time value relates to "first passenger to first bag". The second waiting time value relates to "last bag on belt" (counting from the first bag delivered)	
	Wide Body Aircraft	>1.7	1.5-1.7	<1.5	<0	0 / 25	>25	<0	0 / 25	>25		
Customs Control		>1.8	1.3-1.8	<1.3	<1.0	1.0-5.0	>5.0	<1.0	1.0-5.0	>5.0	Waiting time refer to a procedure when 100% of the passengers are being checked	
Public Arrival Hall		>2.3	2.0-2.3	<2.0	n/a			n/a			Optimum portion of seated occupants 15-20%	

Ausgewählte Richtwerte:

Security (Spatial): 1.0–1.2 m²/PAX optimal; Wartezeit Economy: 5–10 min optimal

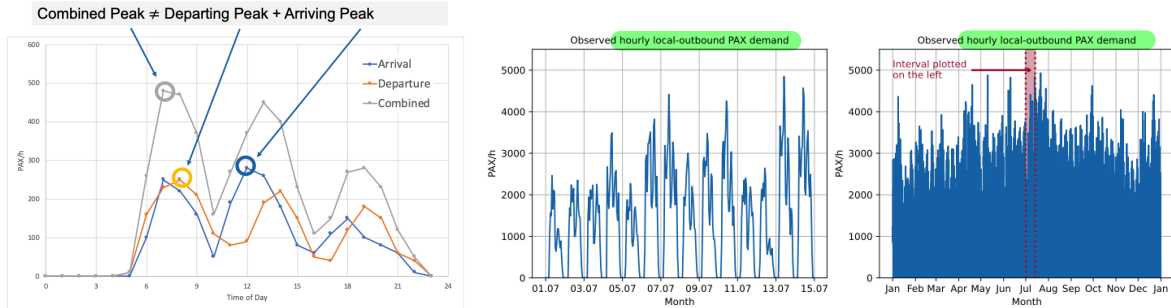
Gate Holdroom (Seated): 1.8–2.2 m²/PAX optimal

5.6 Design Hour Load (DHL)

Airports dimensionieren **nicht für Maximal-, sondern für eine Designlast** → Balance zwischen unnötig hohen Kosten (Over-Design) und häufigen Überlastungen (Under-Design).

Nachfrage schwankt auf verschiedenen Zeitskalen: stündlich, täglich, wöchentlich, saisonal und über Jahre. **Jede Einrichtung** hat dabei ihre **eigene Nachfragefunktion** mit **eigenem Peak** (zeitlich und mengenmässig). Der **Combined Peak ≠ Departing Peak + Arriving Peak**.

↳ da die Peaks nicht zur selben Tageszeit sind.



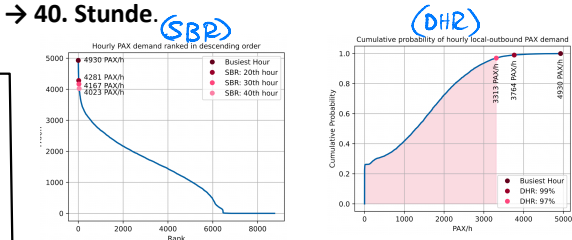
Drei Methoden zur DHL-Bestimmung:

Method	Vorgehen	Genauigkeit
Approximation	DHL = MPPA × Faktor (0.05% / 0.04% / 0.035% / 0.03% je nach Grösse)	Grob
Standard Busy Rate (SBR)	Stunden des Jahres absteigend sortieren → 20./30./40. Stunde = DHL	Mittel
Design Hour Rate (DHR)	Kumulative Verteilung berechnen → 97. oder 99. Perzentile = DHL	Genau

MPPA = million passengers per year ↳ von PAX/h Daten

Alle drei Methoden funktionieren sowohl mit **historischen Daten** (bestehende Anlagen) als auch mit **Prognosedaten** (zukünftige Planung). Airports wählen die Methode frei - keine Vorschrift.

Einfluss der Flughafengrösse: Kleine Flughäfen mit ausgeprägten Peaks wählen konservativere Werte (z.B. 99% DHR oder 20. SBR-Stunde), grosse Flughäfen mit stabilerer Nachfrage können grosszügiger planen (z.B. 97% DHR oder 40. SBR-Stunde). Beispiel: ZRH → 20. Stunde, AMS → 40. Stunde.



5.7 Sizing-Formeln

5.7.1 Holding Facilities

Drei Inputs benötigt: **DHL**, **Spatial LoS** und **Dwell Time**.

Dwell Time = durchschnittliche Zeit die ein Passagier in einer Holding Facility verbringt. Je kürzer die Dwell Time, desto früher wird der Platz wieder frei für die nächste Gruppe. Der benötigte Platz ist **direkt proportional** zur **Dwell Time**:

- DHL = 1000 PAX/h, Dwell Time = 60 min → Platz für **1000 PAX** nötig
- DHL = 1000 PAX/h, Dwell Time = 30 min → Platz für nur **500 PAX** nötig

Wichtig: Zwischen **sitzenden** und **stehenden** Passagieren unterscheiden, da unterschiedliche Spatial LoS-Werte gelten. Das Verhältnis wird durch die **Seating Ratio SR** angegeben.

SP: 30% sitzend => SR = 0,3

Berechnung:

$$P = \frac{DHL \cdot T}{60}$$

$$A = P \cdot SR \cdot SP_S + P \cdot (1 - SR) \cdot SP_{ST} = \text{Totaler Platzbedarf}$$

P = Anzahl Passagiere gleichzeitig in der Facility, T = Dwell Time [min], SR = Seating Ratio, SP_S = Spatial LoS sitzend, SP_ST = Spatial LoS stehend

5.7.2 Processing Facilities → PAX wird aktiv, verarbeitet → Check-in, Baggage drop, ...

Drei Inputs benötigt: **DHL**, **Spatial + Temporal LoS** und **Performance** (Prozesszeit PT).

Die Prozesszeit **PT** [s/PAX] bestimmt den **Durchsatz einer Einrichtung** (z.B. PT = 30s → 120 PAX/h pro Server). Daraus ergibt sich die benötigte **Anzahl Server K** (z.B. Check-in Schalter, Security Lanes). Die **maximale Warteschlangenlänge Q_max** hängt von K und der **akzeptierten Wartezeit (MQT = temporal LoS)** ab. Aus Q_max lässt sich schliesslich die benötigte Fläche berechnen. ↳ Maximum queuing time

Berechnung:

$$K = \frac{DHL \cdot \frac{PT}{60}}{60 + MQT}$$

$$Q_{max} = \frac{K \cdot MQT}{PT/60}$$

$$A_Q = Q_{max} \cdot SP \Rightarrow A = A_Q \cdot (1 + p_{tot}) \Rightarrow \text{Fläche}$$

wie viel Platz ein PAX zur Verfügung hat.

K = Anzahl Server (aufrunden!), PT = Prozesszeit [s/PAX], MQT = max. Wartezeit/temporal LoS [min], SP = Spatial LoS [m²/PAX], p_tot = Zuschlag für Schalter, Zirkulation etc.

5.7.3 Flow Facilities (Korridore)

Drei Inputs benötigt: **DHL**, **Spatial LoS** (PPT) und **Geometrie** (Breite W).

↳ Gibt an wie viele PAX pro Meter (Breite) des Gangs eine Facility/t nutzen.

Die **geometrische Breite W** kann **nie vollständig genutzt werden** - es gilt die **effektive Breite W'**. Abzüge:

Edge Effect: je **0.5 m pro Seite** (Passagiere meiden Wände)

Counterflow: 0.5 m (bei Gegenverkehr)

Optimal dimensioniert, wenn **Kapazität CC** ≥ DHL. In der Praxis ist **CC** oft deutlich grösser als der DHL, da Korridore generell **hohe Kapazitäten** haben.

Berechnung:

$$W' = W - 2 \times 0.5 \text{ m (edge)} - 0.5 \text{ m (counterflow, falls zutreffend)}$$

$$CC = W' \cdot \frac{PPT}{60}$$

(Person per Time)

PPT = Spatial LoS [Personen/m/min], **Optimal: 20–28** Personen/m/min für **reguläre Korridore**, **12.5–20** für **Treppen**

6 Ground Access

Infrastruktur und Dienste, welche Passagiere, Mitarbeiter, Fracht und Besucher per **bodengebundenen Verkehr zum/vom Flughafen bringen** → Voraussetzung für nachhaltigen Betrieb.

User-Gruppen (Faustregel je ~20 % der Trips): Passagiere, Mitarbeiter, Meeters & Greeters, Supply & Delivery.

Unterscheidung **Public Transport** (fester Fahrplan/Route, geteilt: **Rail, Metro, Tram, Bus**) vs. **Private Transport** (individuell: **PKW, Motorrad, Velo, Firmenwagen**).

6.1 Vision & Bedeutung

- Logische Integration ins regionale Verkehrsnetz, erweiterbar/anpassbar
- Public Transport priorisieren (mehr PAX/Bewegung → effizienter)
- Klare Trennung Fahrzeuge ↔ Fussgänger, intuitiv & sicher

Historisch: moderne Flughäfen liegen **weiter vom CBD entfernt als alte** → Ground Access wird wichtiger.

6.2 Facilities

6.2.1 Road Access

Trennung **Passagier-Verkehr** ↔ **Supply/Service-Verkehr** empfohlen (eigene Terminal-Zufahrten).

Zwei Schlüsselparameter:

6.2.4 Rail-based Access

Schienensysteme = zentraler Pfeiler nachhaltigen Ground Access. **Stationen möglichst nahe am Pax-Gebäude** (Bahnutzer = Fussgänger → kurze Wege wichtig).

	Headway [min]	Route Capacity [Mov/h]
Subway, Metro	0.7 min to 1.5 min	40–90
Tram, Light Rail	1.2 min to 5 min	12–50
Commuter Rail	3.75 min to 5 min	12–16
Highspeed Rail	> 3.33 min	<18

Kapazität primär durch **Headway** bestimmt:
Zeit zwischen den Vehicles

6.2.5 3. Performance Indicators

Modal Split – Anteil Personen, die per Public Transport anreisen.

→ ZRH (SIL-Vorgabe BAZL): $\geq 46\%$ bis 2030, **erstmalig 2024 erreicht**. Erhebung per Survey alle 4 Jahre, Publikationspflicht. *SIL: Sachplan Infrastruktur der Luftfahrt.*

Access Time Reliability – nicht nur Mittelwert, auch Variabilität. **Kosten verpasster Flug** = nicht-linear → Reisende zahlen für Verlässlichkeit.

→ Koster et al. (2011): Travel-Time-Variability macht bis **30 % der Access-Kosten** bei Business, **25 %** bei Non-Business aus.

→ **Schiene/Metro** (eigene Trasse) **zuverlässiger als Strasse** (stau-/störungsempfindlich).

Sustainability Metrics – CO₂, NO_x, Feinstaub, Energie, Lärm. **Ground Access** oft **Hauptanteil der Landside-Emissionen** → **Hebel: Modal Shift, Reliability, Flottendekarbonisierung.**

7 Baggage Handling Systems (BHS)

Integriertes System aus **automatisierten** und **manuellen Anlagen**, das Aufgabegepäck zwischen Check-in, Security, A/C-Loading und Reclaim transportiert, sortiert, screen und routet. Ziel: sicher, effizient, regelkonform.

7.1 Baggage Handling Process

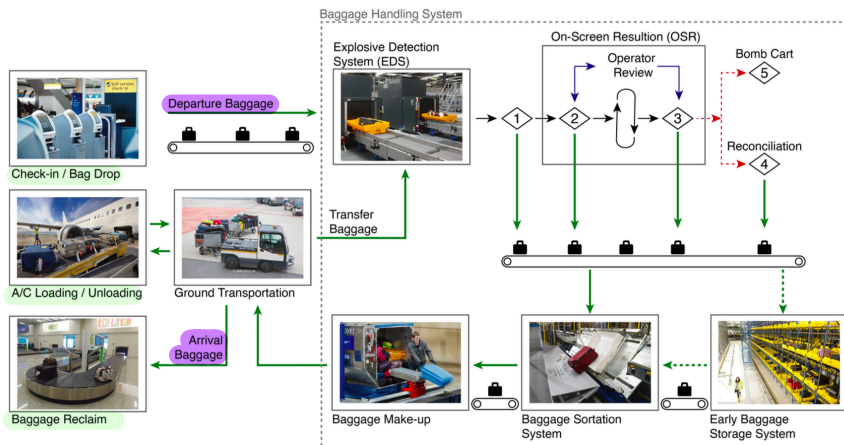


Figure 1: Overview Baggage Handling System, its Components, and Baggage Flows,

Drei Gepäckströme müssen gehandhabt werden:

Strom	Weg
Departure (local outbound)	Check-in → Security → Sortierung → A/C-Loading
Arrival (local inbound)	A/C-Unloading → Reclaim
Transfer	Inbound A/C → BHS → Sort → Outbound A/C

One-Stop Security (Transfergepäck): Gepäck aus einem EU-Flughafen oder einem Drittstaat mit **anerkannt** gleichwertigen Sicherheitsstandards gilt als **bereits gescreent** → kein Re-Screening nötig. Re-Screening **nur**, wenn Ursprungsflughafen den Standard **nicht erfüllt** **oder** die **Security-Integrität nicht gewährleistet** ist (z.B. Gepäck war zwischenzeitlich unbeaufsichtigt). Selbe Logik wie bei Transfer-Passagieren.

7.2 Facilities

7.2.1 EDS & OSR – Sicherheitsscreening

Departure-Gepäck (und **gewisses Transfer-Gepäck**) muss vor dem Verladen **auf Explosivstoffe** und **gefährliche Gegenstände geprüft** werden. Das übernehmen **Explosive Detection Systems (EDS)** – Geräte, die Gepäck mit fortgeschrittenen Bildgebungsverfahren scannen.

7.2.2 5-Level-Prozess

Level	Was passiert	Resultat
1	EDS scannt alle Bags, automatische Bildanalyse	clear → fertig; sonst → L2
2	OSR (On-Screen Resolution): Mensch beurteilt verdächtige Bilder	clear → fertig; sonst → L3
3	Manuelle Öffnung & Kontrolle durch befugtes Personal	clear → fertig; sonst → L4 oder L5
4	Reconciliation: Inspektion mit anwesendem Passagier (Behörde entscheidet, z.B. Konfiskation)	je nach Risiko
5	Bomb Cart: Gepäck wird kontrolliert neutralisiert	bei akuter Gefahr

Jedes Level filtert weiter – die meisten Bags werden bereits in **Level 1 cleared**, nur ein **kleiner Teil läuft bis OSR** oder weiter.

7.2.3 EDS-Standards *Explosive detection System*

Drei Standards (1, 2, 3) definieren technische **Leistung** und **Erkennungsfähigkeit**. **Genauer** ist aus Sicherheitsgründen **nicht öffentlich**. **Seit September 2020 sind für Hold Baggage Screening nur noch Standard-3-Geräte zulässig**. Die Umstellung war eine grosse Herausforderung: neue Geräte sind deutlich grösser und schwerer (bis ~4.8 m Länge, Bodenlast bis 2'000 kg/m²) → erhöhte Anforderungen an BHS-Layout und Gebäudestatik.

7.2.4 Warum EDS/OSR *Engpass* Bottlenecks sind

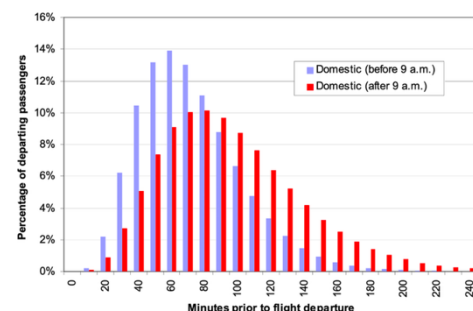
Zeitintensiv, brauchen **viel Fläche**, **sind teuer** → die Dimensionierung dieser Anlagen ist eine zentrale Planungsaufgabe.

7.2.5 Dimensionierung - Vorgehensweise

Die **Designlast wird nicht** wie bei Pax-Gebäuden **über DHL pro Stunde bestimmt**, sondern **viel feiner** – über die **Earliness Distribution**.

Was ist eine Earliness Distribution?

Die Earliness Distribution ist eine **Wahrscheinlichkeitsverteilung (PDF)**, die angibt, **wie viele Minuten vor Scheduled Time of Departure (STD) ein Passagier am Flughafen eintrifft**. Beispiel: **~2 % der Pax kommen 20 min vor STD**, **~14 % kommen 60 min vor STD**. So lässt sich für **jeden geplanten Flug** abschätzen, wann seine Pax eintreffen.



Die Verteilung muss differenziert werden:

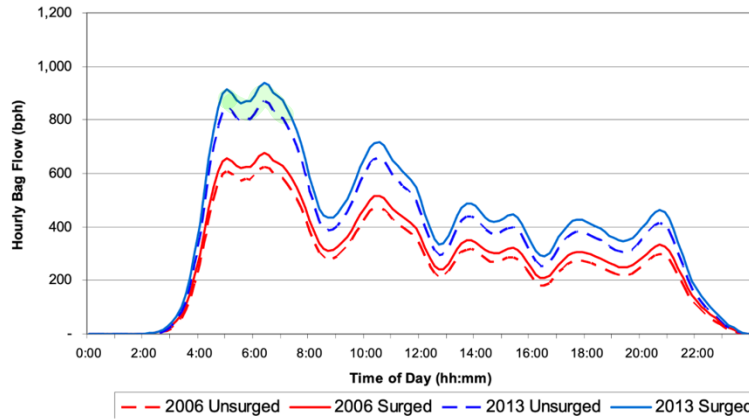
- **Tageszeit:** **Frühflüge** (vor 9 Uhr) haben **höheren Business-Anteil** → Pax kommen näher an STD. **Späte Flüge** → Pax kommen früher.
- **Streckentyp:** **Long-Haul-Pax** kommen **früher als Domestic/Short-Haul** (längere Departure-Prozesse, frühere Check-in-Deadlines, mehr Pufferzeit).

Vom Pax-Profil zum Bag-Profil

Schritt für Schritt:

1. Earliness Distribution × Pax pro Flug → Pax-Ankunftslast über den Tag
2. × durchschnittliche Bags pro Pax → **Bag(t) = Anzahl Bags, die pro Zeit ins BHS einlaufen**
3. Diskretisierung in **10-min-Intervallen** (BHS hat oft kurze Lastspitzen)

Surge Factor – Aufschlag für Spitzen



surged: höchste mögliche Welle

Da kurzfristige Schwankungen die Mittelwerte überschreiten, wird ein konservativer Aufschlag dazugerechnet (Poisson-Annahme: Standardabweichung ≈ √Mittelwert):

$$Bag_{surged}(t) = Bag(t) + \sqrt{Bag(t)}$$

→ Dieser Surge-Wert ist die Designlast für die Anzahl EDS und OSR.

Anzahl EDS Explosive detection System

Aus dem Maximum von Bag_surged(t) geteilt durch den Stundendurchsatz eines EDS (μ_EDS ≈ 150 Bags/h) ergibt sich die nötige Anzahl Screening-Lines, aufgerundet. Wegen der hohen Kritikalität (Ausfall = Stillstand der Departures) werden bei angenommener 98 %-Verfügbarkeit Reserven eingebaut: **+1 Gerät bei < 8 Lines, +2 ab 8 Lines.**

Anzahl OSR On-screen Resolution

Wird basierend auf der False Alarm Rate des EDS (~20 %) und dem OSR-Durchsatz (μ_OSR ≈ 180 Bags/h) bestimmt - also so viele OSR-Plätze, wie nötig, um die "verdächtigen" Bilder aus Level 1 ohne Stau abarbeiten zu können.

7.2.6 Baggage Sorting

Sortierung weist jedes Stück dem richtigen Outbound-Flug zu und routet es zur passenden Make-up-Position.

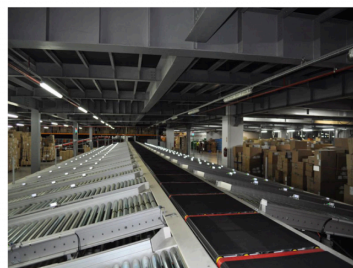
	System	Typ	Charakteristik
①	Tilt-Tray	automatisch	hoher Durchsatz, hoher CAPEX
②	Cross-Belt	automatisch	hoher Durchsatz, hoher CAPEX
③	Pusher / Diverter	automatisch	hoher Durchsatz, hoher CAPEX
④	Manual Sorting	manuell	tiefe Investition, hohe Personalkosten

CAPEX: Capital Expenditures = Investitionsausgaben.

→ Manuelle Sortierung wirtschaftlich an kleinen Flughäfen oder in Regionen mit tiefen Lohnkosten (auch grössere Flughäfen können dann manuell betrieben werden).



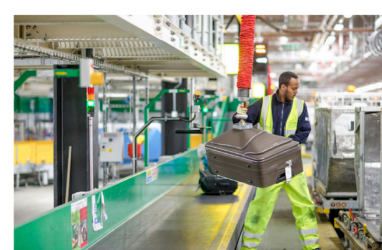
①



②



③



④



7.2.7 2.3 Make-up Positions & A/C-Transport

Nach der Sortierung kommt das Gepäck zu den **Make-up Positions**, wo es in **ULDs (Unit Load Devices, Container)** oder auf **Carts** geladen und zum Flugzeug gebracht wird.

Typ	Kapazität	Flüge / Position	Manuelle Endsortierung?
Chute	begrenzt (~10 Stk)	1–5 Chutes pro Flug	Nein
Lateral	gut (~20 Stk)	1 Lateral pro Flug	Nein
Carousel	gut, mit Rezirkulation	1–5 Flüge pro Carousel	Ja

- **Chute & Lateral** = automatisierte BHS, ein Slot pro Flug → vollautomatische Konsolidierung. Chute = Gravitationsrutsche, Lateral = Förderband.
- **Carousel** = mehrere Flüge teilen sich einen Carousel → Bodenpersonal muss manuell trennen und auf die richtigen Carts/ULDs laden.

A/C-Transport:

- **Baggage Dollies** (offene Anhänger, loses Gepäck) → Belt Loader am Flugzeug
- **ULD Dollies** (standardisierte Container) → Container Loader → schnellerer Turnaround, da Container direkt in den Cargo Hold passen
-

7.2.8 Early Baggage Storage (EBS)

Nötig an Flughäfen mit "Early Bag Drop" (z.B. Vorabend-Check-in) – also wenn Pax ihr Gepäck weit vor STD aufgeben.

Funktion: Puffer, der zu früh aufgegebenes Gepäck zwischenlagert, bis es zum richtigen Zeitpunkt wieder in den BHS-Fluss eingeschleust wird.

Bauformen: von vollautomatisch (Roboter-gesteuerte Lagersysteme) bis zu einfachen verlängerten Förderbändern.

Designparameter: Speicherkapazität (kann sehr viel Platz brauchen) und vor allem **Throughput** (in & out) – typisch nur **100–200 Bags/h**. Diese tiefe Rate ist ein klassisches Engpassrisiko und muss früh in der Planung berücksichtigt werden.

7.2.9 3. Types of BHS

Klassifikation nach **Durchsatz und Integrationsgrad** (nicht nach Security-Level – das definiert der EDS-Standard).

Typ	Integration	Durchsatz [Bags/h/Maschine]
① Standalone	nicht förderbandintegriert (Carts/manuell zum EDS)	~110–220
② Mini Inline	förderbandintegriert	dazwischen
③ Medium Volume Inline	förderbandintegriert	dazwischen
④ High Volume Inline	förderbandintegriert	~800–1'600

→ **Inline-Systeme** = Gepäck wird automatisch von Check-in zum EDS gefördert. **Standalone** = Bag wird manuell oder per Cart zum EDS gebracht.

↳ Explosive detection System

→ **High Volume** lohnt sich nur an grossen Flughäfen (CAPEX vs. Volumen). Kleine Flughäfen sind mit Mini Inline oder Standalone meist gut bedient.

7.2.10 4. Integration ins Passagiergebäude

Zwei Grundoptionen:

Option	Vorteil	Nachteil
Untergrund	spart wertvolle Pax-Gebäude-Fläche	sehr hohe Baukosten → nur Grossflughäfen
Ebenerdig	günstiger	grosser Footprint , interferiert mit Pax-Strömen

Komplexität ebenerdig: Bei einstöckigen Pax-Gebäuden **muss der BHS oft um oder durch Pax-Bereiche geführt werden**. Bei **zweistöckigen Konzepten** liegt der **BHS meist unten** und **kreuzt teilweise Arrival-Ströme**.

Mehrstufige Pax-Gebäude: **Check-in oben** → **Reclaim auf Mittelebene** → Make-up & Apron-Anbindung unten. Erfordert **lange Förderstrecken**, Tunnel und Schächte → **Komplexität und Kosten ↑**.

→ BHS-Design ist ein Haupttreiber für Pax-Gebäude-Layout, CAPEX und Flexibilität
 → **muss früh in der Pax-Gebäude-Planung berücksichtigt werden.**

8 Runway Capacity

Subsystem: Rwy, Twy, baggage reclaim ...

Jedes Subsystem eines Flughafens hat seine **eigene Kapazität** – die **Gesamtkapazität** wird vom **schwächsten Element (Bottleneck)** bestimmt. Wichtig: Kapazität ist **keine deterministische Zahl, sondern eine Zufallsvariable**. Wenn man von "50 ATM/h" spricht, meint man den **Erwartungswert** dieser Verteilung, nicht eine harte Obergrenze.

↳ Air traffic movements

8.1 Definitionen

8.1.1 Statisch vs. Dynamisch

Kapazitäten lassen sich grundsätzlich in zwei Klassen einteilen:

Typ	Inhalt	Beispiel
Statisch	Speicherkapazität zu einem Zeitpunkt	Apron (max. parkende Flugzeuge)
Dynamisch	Durchsatz pro Zeitintervall	Runway (ATM/h)

8.1.2 Fundamentale vs. abgeleitete Masse

Maximum Throughput Capacity (= Saturation Capacity) ist das fundamentale Mass: die maximale Anzahl Bewegungen pro Stunde, **wenn ATM-Regeln eingehalten werden und kontinuierlich Nachfrage da ist.**

Bestimmung auf zwei Wegen:

- **Empirisch:** **Beobachtungen während Peak-Hours** an überlasteten Flughäfen (dort sieht man das System wirklich am Limit).
- **Analytisch:** Berechnung über **Look-up-Tabellen**, mathematische Modelle oder **Simulation**.

Wichtig: **Maximum Throughput** ist nur ein **theoretisches Limit** – **auf Dauer nicht haltbar**, weil Service-Qualität (z.B. akzeptable Verspätungen) gar nicht berücksichtigt wird. Auch nicht zu verwechseln mit dem **Usability Factor** (= % der Zeit, in der die Runway nutzbar ist, abhängig von Crosswind etc.).

Praktisch werden daher abgeleitete Masse verwendet:

Mass	Definition
Practical Hourly Capacity	maximale ATM/h , sodass mittlere Verspätung pro A/C ≤ 4 min
Declared Capacity	typisch 85–90 % der Maximum Throughput Capacity
Sustained Capacity	langfristig haltbar bzgl. ATC-Workload , kein konkreter Delay-Threshold

→ Der **genaue Throughput** hängt zudem stark vom angenommenen **Aircraft Mix** und **Movement Mix** ab – jede Änderung dieser Annahmen verschiebt das Resultat.

8.2 Einflussfaktoren

8.2.1 Anzahl & Orientierung der Runways

Wichtig: **vorhandene ≠ gleichzeitig betriebene Runways**. ZRH hat drei Runways, betreibt aber selten alle drei gleichzeitig für An- und Abflüge. Welche Runways aktiv sind, regelt die **Runway Configuration (Betriebskonzept)**. Zusätzlich gibt es **Abhängigkeiten zwischen Runways**, die die effektive Kapazität reduzieren.

↳ Arrival & Departure procedures (6A)

Praxisbeispiel ZRH: Der SID (Standard Instrument Departure) der Runway 16 kreuzt das Go-around-Verfahren der Runway 14. Daher sind Departures von 16 nur unter spezifischen Bedingungen erlaubt, wenn Anflüge auf 14 stattfinden.

8.2.2 Aircraft Separation

ATC muss **longitudinale** und **vertikale Mindestabstände** sicherstellen, aus zwei Gründen:

1. Verhinderung von **Mid-Air Collisions**
2. Schutz vor **Wake Vortices** (Wirbelschleppen)

Wake Vortices sind Luftwirbel hinter einem Flugzeug. **Stärke ↑ bei hoher Masse und tiefer Geschwindigkeit**. **Schwere Flugzeuge bei Anflugsgeschwindigkeit erzeugen daher die stärksten Wirbel** → strengere Mindestabstände, wenn ein leichteres Flugzeug einem schwereren folgt.

A/C-Kategorien nach MTOW (FAA):

- **Heavy (H)** > 136 t
- **Large (L)** 7–136 t
- **Small (S)** < 7 t
- **B757** wird separat behandelt (überraschend starkes Wake)
- A380 = **Super-Heavy**

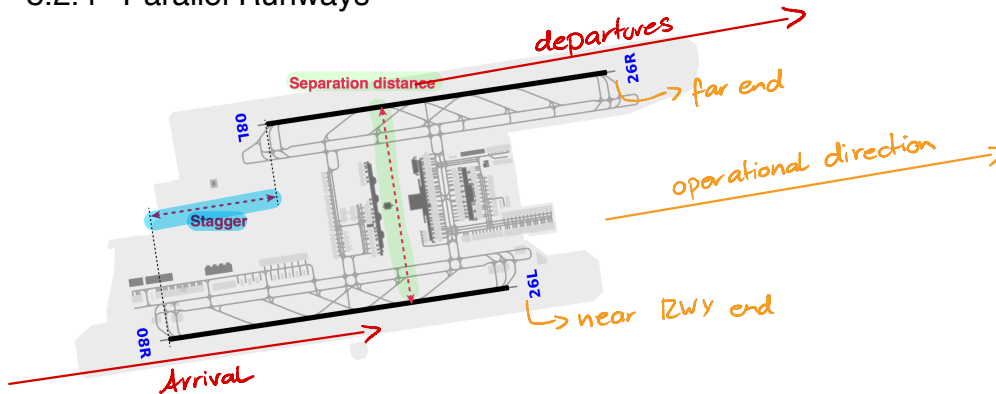
8.2.3 Single Runway – 4 operationelle Fälle

A: Arrival D: Departure

Fall	Regel
A-A	(i) Mindestabstand auf Final 2.5–6 nm je nach Kategorie-Paar, (ii) Trailer landet erst , wenn Leader die Runway clear hat
D-A	Trailing Arrival ≥ 2 nm vom Threshold beim Beginn des Departure-Take-off-Run; Touchdown erst nach Departure clear
D-D	Zeitabstand zwischen Take-offs (45–120 s je Kategorie-Paar) – nicht Distanz, sondern Zeit
A-D	Departure Clearance erst, wenn Arrival die Runway clear hat

Arrival followed by arrival (A-A)				
A. Throughout final approach, successive aircraft must be separated by at least the distance (in nautical miles) indicated by the table below. (Asterisked separations are required when leading aircraft is at the threshold of the runway.)				
		Trailing Aircraft		
		H	L + B757	S
Leading aircraft	H	4	5	5/6*
	B757	4	4	5
	L	2.5 (or 3)	2.5 (or 3)	3/4*
	S	2.5 (or 3)	2.5 (or 3)	2.5 (or 3)
B. The trailing aircraft cannot touch down on runway before the leading aircraft is clear of it.				
Arrival followed by departure (A-D)				
Clearance for takeoff run of the trailing departure is granted after the preceding landing is clear of the runway.				
Departure followed by departure (D-D) (separations are approximate—see text)				
Clearances for takeoff run of successive aircraft must be separated by at least the amount of time (in seconds) indicated by the table below.				
		Trailing Aircraft		
		H	L + B757	S
Leading aircraft	H	90	120	120
	B757	90	90	120
	L	60	60	60
	S	45	45	45
Departure followed by arrival (D-A)				
The trailing arrival on final approach must be at least 2 nmi from runway when departing aircraft begins its takeoff run, and cannot touch down until departing aircraft is clear of the runway.				

8.2.4 Parallel Runways



Der operationelle Unabhängigkeitsgrad steigt mit dem geometrischen Abstand der Runway-Mittellinien (d_{geo}) – mehr Unabhängigkeit = mehr Kapazität:

d_{geo}	A/A	D/D	A/D	D/A
≤ 762 m	wie Single RW	wie Single RW	Arrival muss committed sein	wie Single RW
762–1310 m	1.5 nm	indep.	indep.	indep.
≥ 1310 m	indep.	indep.	indep.	indep.

über RWY & committed to Land. → decision Point überschritten, ab da ist ein GO-A. nicht mehr sicher.

→ Bei < 762 m verhalten sich die zwei Runways praktisch wie eine. Ab 1310 m sind sie für alle Bewegungstypen unabhängig (= zwei separate Single-Runway-Systeme).

8.2.5 Staggered Parallel Runways

Wenn parallele Runways **längs versetzt (stagger)** sind, zählt nicht nur d_{geo} , sondern die **effektive Separation**:

$$d_{eff} = d_{geo} + \Delta d$$

↳ correction factor wegen des Stagger

Die Korrektur Δd ist linear vom Stagger abhängig: **± 100 ft pro 500 ft Versatz**, Vorzeichen je nach Operationskonfiguration:

Near-End	Far-End	Δd
Arrivals	Departures	+100 ft pro 500 ft Stagger
Departures	Arrivals	-100 ft pro 500 ft Stagger

→ **Positiver Stagger** ist besonders wertvoll, wenn er d_{eff} über eine **kritische Schwelle** (z.B. 1310 m) **hebt** → das System "springt" in ein **höheres Unabhängigkeitsregime** → deutlich **mehr Kapazität**.

8.2.6 Crossing/Converging/Diverging

Sehr komplex – Kapazität hängt vom Kreuzungswinkel, Lage, Mix, Missed-Approach-Verfahren ab. **Keine generischen Werte**, nur fallspezifische Analyse mit Simulation.

8.2.7 Meteorologische Faktoren

- **Cloud Ceiling / Visibility** → bestimmt Approach Category (CAT I/II/III) → andere Separationsregeln
- **Niederschlag** → **Bremsleistung**, Runway Conditions
- **Wind** → bestimmt **überhaupt**, ob die Runway **nutzbar ist (Usability Factor)**

8.2.8 Aircraft Mix vs. Movement Mix

Zwei verschiedene Begriffe, die oft verwechselt werden:

Begriff	Inhalt
Aircraft Mix	Zusammensetzung & Reihenfolge der A/C-Kategorien (Heavy/Large/Small)
Movement Mix	Anteil Arrivals vs. Departures

Effekt des Aircraft Mix: **Homogen** (z.B. nur L) → **einheitliche Separationen** → **hohe Kapazität**. **Heterogen** → **sehr unterschiedliche Mindestabstände** → **Vorhersagbarkeit** ↓ und **Kapazität** ↓.

Beispiele: 50 % H + 50 % S → mittlere Separation ≈ 3.75 nm. Aber 80 % L + 20 % S → ≈ 2.74 nm (homogener und leichter → kleinerer mittlerer Abstand → höhere Kapazität).

Effekt des Movement Mix (Faustregeln Single Runway):

- Nur Departures: ~60 ATM/h
- Nur Arrivals: ~45 ATM/h
- Mixed: zwischen beiden Werten – ATC kann Departures in natürliche Lücken im Arrival-Strom einfügen, indem sie kurzzeitig den Arrival-Abstand vergrößert. So erreichen Single-Runway-Flughäfen wie London Gatwick oder Stansted beachtliche Durchsätze.

8.2.9 2.5 Rapid Exit Taxiways (RETs) *→ Zeit vom Touchdown bis vacate*

RETs senken die Runway Occupancy Time (ROT) der landenden Flugzeuge → mehr Durchsatz. Theoretischer Throughput nur über ROT betrachtet:

$$\mu = \frac{1}{E[o_i]} = \frac{1}{\sum_i p_i \cdot o_i}$$

ROT category

Wichtig: RETs wirken nur auf Arrival-ROT, nicht auf Departure-ROT. Daher Kapazitätsgewinn nur bei Arrival- oder Mixed-Mode-Runways – kein Nutzen für reine Departure-Runways.

8.2.10 Weitere Faktoren

- ATM-Performance: Trainingsstand und Erfahrung der Lotsen
- Surveillance-Genauigkeit: Radar-Qualität → erlaubt engere Separationsminima
- Lärmschutzverfahren: Verteilung der Lärmbelastung kann Runway-Nutzung und Flugpfade einschränken → effektive Kapazität ↓

8.3 Capacity Models

8.3.1 Modelltypen

Vier Hauptansätze zur Kapazitätsschätzung – sie unterscheiden sich in Datenbedarf, Aufwand und Einsatzbereich:

Modell	Datenbedarf	Aufwand	Einsatz
Look-up Table	gering	tief	strategisch, alle Konfigurationen
Analytisch (Blumstein)	gering	tief	strategisch, meist Single Runway
Empirisch (Capacity Envelopes)	gross (Beobachtungen)	mittel	Auswertung Ist-Kapazität
Simulation	sehr gross	hoch	taktisch (Tag/Woche/Saison)

→ Look-up und Analytik werden für strategische Langfristplanung genutzt, Simulation eher für taktische Fragestellungen. Empirische Modelle sind die Grundlage von Capacity Envelopes (Abschnitt 4).

8.3.2 Look-up Table Method (FAA 1983) *AC Kategorie (Heavy, Large, small)*

Drei Inputs nötig: Runway-Konfiguration, VFR/IFR, Aircraft Mix.

Aircraft Mix wird über den Mix Index ausgedrückt:

$$\text{Mix Index} = C + 3 \cdot D$$

mit C = % A/C MTOW 5'670 kg–136 t, D = % A/C MTOW > 136 t. Schwere Flugzeuge zählen also dreifach – sie verursachen die grössten Wake-bedingten Separationen und reduzieren die Kapazität überproportional.

Die stündliche Kapazität ergibt sich aus:

$$C = C^* \cdot T \cdot E$$

Bedeutung der Faktoren:

- **C*** = Hourly Base Capacity, abgelesen aus dem Diagramm anhand Mix Index und Movement Mix (% Arrivals)
- **T** = Touch-and-Go-Faktor, relevant nur an Flughäfen mit Trainingsflügen (sonst T = 1.00)
- **E** = Exit-Faktor, hängt von Mix Index, Anzahl verfügbarer Exits N im richtigen Exit Range und Movement Mix ab

Beispiel: Mix Index 106, 50/50 Mix, VFR, N = 2 Exits in 5'000–7'000 ft → C* ≈ 55, T = 1.00, E = 0.94 → C = 51.7 → 51 ATM/h (Resultate werden immer abgerundet).

8.3.3 Analytisches Modell – Blumstein (1959)

RWY occupancy time

Klassisches Modell für **Arrivals-only Runway**. Berücksichtigt zwei operationelle Faktoren: **ROT** und **Mindestseparation auf Final**.

Final Approach Segment beginnt am sogenannten "**Gate**", typisch r ≈ 5–8 nm vor dem Threshold. Die Herleitung erfolgt in 3 Stufen.

Stage 1 – Minimum Inter-Arrival Time T_{ij}

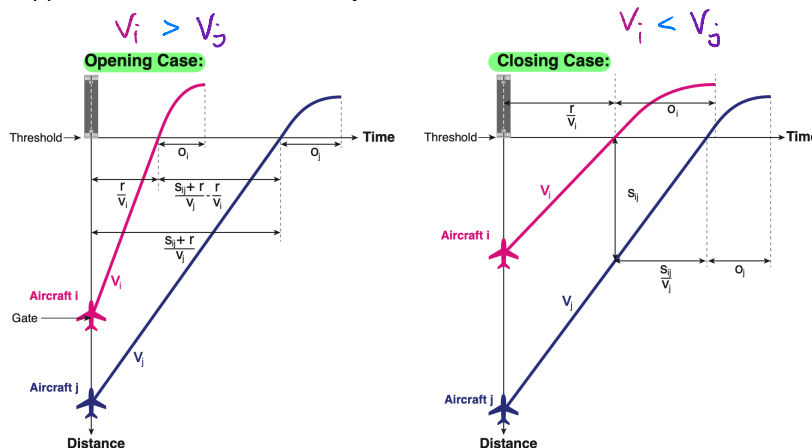
Zwei Constraints, die **gleichzeitig** erfüllt sein müssen:

Airspace Constraint: Abstand zwischen den zwei Flugzeugen darf **nie unter s_{ij}** fallen

Runway Constraint: Trailer darf **erst landen**, wenn **Leader** die **Runway clear** hat (also nach o_i, der ROT des Leaders)

→ T_{ij} = max(Airspace-Anforderung, Runway-Anforderung)

Die genaue Form der Airspace-Anforderung hängt davon ab, ob die Lücke zwischen den Flugzeugen während des Final Approach **wächst oder schrumpft**.



Opening Case (v_i > v_j): **Leader schneller als Trailer** → Lücke wächst während des Anflugs. Die **Airspace-Anforderung** ist **daher am Gate (Beginn) kritisch** – dort müssen die zwei Flugzeuge mindestens **s_{ij}** auseinander sein. Danach geht die Lücke nur noch auf.

$$T_{ij} = \max\left(\frac{s_{ij} + r}{v_j}, o_i\right) \text{ für } v_i > v_j$$

Closing Case (v_i ≤ v_j): **Trailer mindestens so schnell wie Leader** → Lücke schrumpft. Die Airspace-Anforderung ist **daher am Threshold (Ende) kritisch** – wenn der **Leader landet**, muss der **Trailer noch genau s_{ij} hinter ihm** sein.

$$T_{ij} = \max\left(\frac{s_{ij}}{v_j}, o_i\right) \text{ für } v_i \leq v_j$$

→ Resultat: **Matrix T_{ij}** für alle Kategorie-Paare (**Zeilen = Leader, Spalten = Trailer**).

5 Minimum Inter-Arrival Time

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} & S & M & L & H & SH \\ S & 83.1 & 80.0 & 74.5 & 72.0 & 74.5 \\ M & 304.6 & 80.0 & 74.5 & 72.0 & 74.5 \\ L & 332.3 & 240.0 & 74.5 & 60.0 & 74.5 \\ H & 360.0 & 266.7 & 248.3 & 72.0 & 223.4 \\ SH & 387.7 & 293.3 & 124.1 & 96.0 & 74.5 \end{pmatrix}$$

closing (v_i ≤ v_j)

opening (v_i > v_j)

Stage 2 – Erwartete Separationszeit $E[t_{ij}]$

T_{ij} sind theoretische Minima unter Idealbedingungen. In der Praxis kommen **Buffer** dazu (Pilot/ATC-Kommunikation, Spacing- Ungenauigkeiten):

$$t_{ij} = T_{ij} + b$$

b → Puffer

Der **Buffer b** liegt typisch bei 10–20 s.

Nicht alle Paare treten gleich häufig auf. Mit p_i = Anteil von Kategorie i in der Flotte und Annahme statistischer Unabhängigkeit:

$$E[t_{ij}] = \sum_i \sum_j p_i \cdot p_j \cdot t_{ij}$$

Das ist die **mittlere Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Landungen** über den ganzen Mix.

Stage 3 – Maximum Throughput μ

Der **maximale Durchsatz** ist einfach der **Kehrwert** dieser mittleren Zeit:

$$\mu = \frac{1}{E[t_{ij}]}$$

← Gate → final APP segment

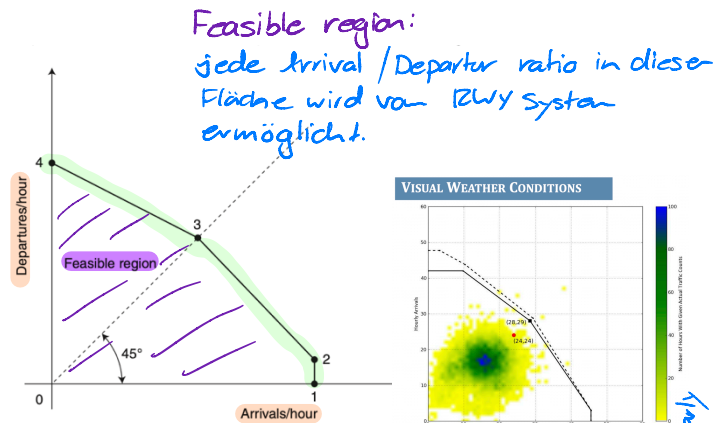
Skript-Beispiel: 5 Kategorien (S/M/L/H/SH), $r = 6$ nm, $b = 15$ s $\rightarrow E[t_{ij}] = 145.1$ s $\rightarrow \mu \approx 24.8$ ATM/h.

Sensitivität: $\uparrow s_{ij}$, $\uparrow o_i$, $\uparrow b$ oder \uparrow Anteil schwerer hinter leichten (Opening Case mit langen Wegen) $\rightarrow \downarrow \mu$. Höhere v_j (schnellere Trailer) $\rightarrow \uparrow \mu$.

8.4 Capacity Envelopes & Coverage Charts

8.4.1 Capacity Envelopes (Gilbo 2002)

Statt die Kapazität als **eine Zahl** anzugeben, definiert ein **Capacity Envelope** die Menge **aller machbaren (Arrivals, Departures)/h-Kombinationen**, die das System unter einer bestimmten Konfiguration aushalten kann. Die Hülle dieser Menge ist eine **Pareto-Frontier**: für jede Arrival-Rate gibt sie die **maximal mögliche** Departure-Rate an (und umgekehrt).



Eine Single-Runway-Envelope wird durch **4 Fundamentalpunkte** charakterisiert:

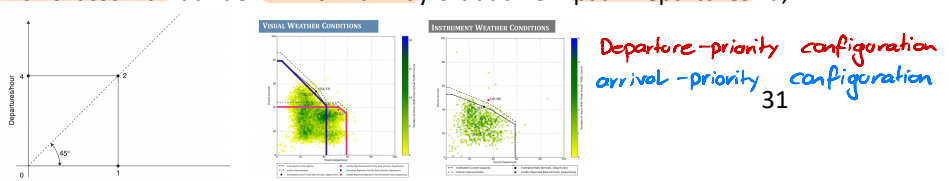
#	Punkt	Bedeutung
1	All-Arrivals	nur Arrivals \rightarrow max. Arrival Rate
2	Free-Departures	volle Arrival Rate + Departures, die "gratis" in natürliche Lücken passen
3	Alternating	strikt 1 A / 1 D im Wechsel
4	All-Departures	nur Departures \rightarrow max. Departure Rate

\rightarrow Punkte 1 und 4 lassen sich mit einfachen Kapazitätsmodellen (Look-up, Blumstein) bestimmen.

Die **vollständige Envelope-Form** kann nur aus **mehnjährigen Beobachtungsdaten** oder mit komplexer Simulation hergeleitet werden.

Wichtig: Für jede **Kombination Runway-Konfiguration x Wetterbedingung** gibt es eine eigene Envelope. **VFR-Envelope > IFR-Envelope**, weil unter Sicht kürzere Separationen erlaubt sind.

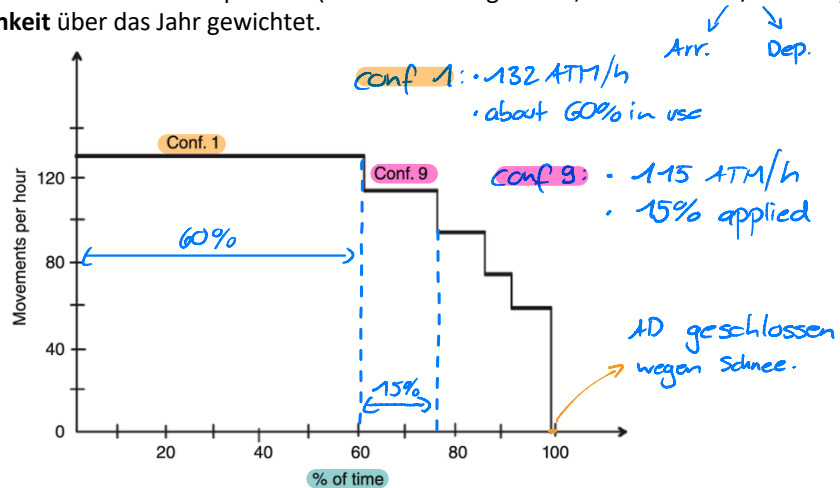
Parallel Runways (1 dediziert für Arrivals, 1 für Departures): Die Achsen sind weitgehend entkoppelt \rightarrow die Envelope ist nahezu rechteckig. In der Praxis lässt man auf der Arrival-Runway oft auch ein paar Departures zu, was die Envelope etwas erweitert.



Mathematisch: Eine Envelope ist eine **nicht-steigende stückweise lineare Funktion** der **95. Perzentile** $Q(n_{DEP} | n_{ARR})$ – also **kein hartes Limit**, sondern statistisch das, was an **Top-5%-Stunden** noch erreichbar war.

8.4.2 Capacity Coverage Chart (CCC)

Ein CCC fasst die Kapazität eines Flughafens **über alle Konfigurationen und über das ganze Jahr** zusammen. Für jede Konfiguration wird ihre erreichbare Kapazität (am Alternating Point, also bei 50/50 Mix) mit ihrer **Auftrittswahrscheinlichkeit** über das Jahr gewichtet.



Ein CCC ist im Wesentlichen die **Kumulative Verteilungsfunktion (CDF)** des maximalen stündlichen Durchsatzes – aber mit der **kumulativen Wahrscheinlichkeit** auf der x-Achse. Jede Stufe entspricht einer Konfiguration.

Form-Interpretation:

Flacher CCC → alle Konfigurationen ergeben ähnlichen Durchsatz (z.B. Single-Runway-Flughafen mit gleichmäßigem Wetter)

Stark gestufter CCC → grosse Unterschiede zwischen Konfigurationen

Mittlerer stündlicher Throughput:

$$\bar{\mu} = \sum_k \mu_k \cdot p_k$$

Skript-Beispiel: $132 \text{ ATM/h} \cdot 0.60 + 115 \cdot 0.15 + \dots + 0 \cdot 0.015 \approx 115 \text{ ATM/h}$ mittel. Die 0 ATM/h für 1.5 % der Zeit reflektieren z.B. Schliessungen wegen Schneestürmen.

8.4.3 Tatsächliche Jahreskapazität – 3 Korrekturen

Das **theoretische Maximum** wäre $\bar{\mu} \cdot 24 \cdot 365$. In der Realität reduzieren drei Faktoren diesen Wert:

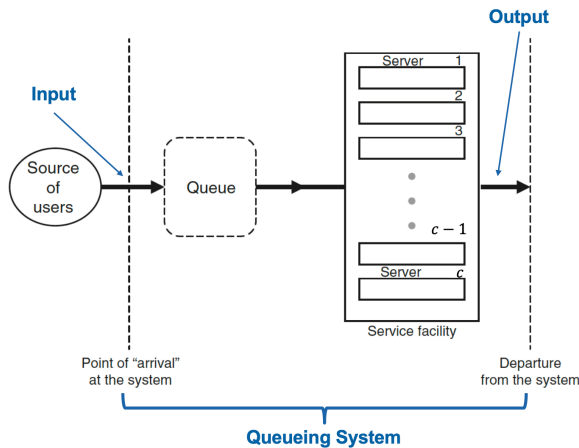
Korrektur	Was passiert	Beispielwert
Theoretisch	$\bar{\mu} \cdot 24 \text{ h} \cdot 365 \text{ d}$	1'007'400 ATM/Jahr
Night Curfew	Nachtflugverbot → 17 op. h/Tag statt 24	713'500
Utilisation Factor	$\rho \approx 0.85\text{--}0.90$ (sonst exzessive Verspätungen)	606'475
Saisonalität	Sommerverkehr stärker; Sommerhälfte wird durch 1.15 dividiert	≈ 566'923 ATM/Jahr

→ Die tatsächliche Jahreskapazität ist also **deutlich** unter dem theoretischen Maximum – ganz analog zum Unterschied zwischen Maximum Throughput und Declared/Sustained Capacity in Abschnitt 1.

9 Queueing Systems & Delay

9.1 Einführung in Queueing Systems

Wartesysteme bestehen aus **Inputs**, einer **Queue**, einem oder mehreren **Servern** (Service Stations) und einem **Output**. **Entities** (Pax, Flugzeuge, Bags) treten ein, werden bedient und verlassen das System. Wenn die Bedienrate kleiner ist als die Ankunftsrate, bildet sich eine Warteschlange.



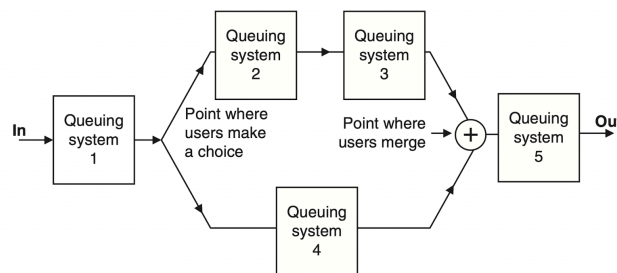
9.1.1 Sechs Schlüsselparameter

PAX, AC, Bags

Parameter	Inhalt
Arrival Process	wie Entities ins System fließen (meist stochastisch modelliert)
Service Time Distribution	wie lange ein Server pro Entity braucht
Anzahl Servers	parallel bedienbare Entities
Queue Capacity	meist als unendlich angenommen
Population	Quelle der User, meist unendlich angenommen
Scheduling Discipline	Reihenfolge der Bedienung – Standard: FCFS (First Come First Served)

9.1.2 Netzwerke

An Flughäfen treten Queueing Systems selten isoliert auf, sondern als **Netzwerke**: Output eines Systems = Input des nächsten.



Damit lässt sich z.B. die **Delay-Propagation** modellieren: Wenn System 1 langsam ist, leiden alle Downstream-Systeme.

9.1.3 Demand & Service Processes

Zeiten und Raten sind reziprok:

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{Arrival}}}, \mu = \frac{1}{T_{\text{Service}}} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Raten Pro Stunde} \\ \cdot \text{hohe Rate} \rightarrow \text{Kürzeres Intervall} \end{array} \right\}$$

- **Inter-Arrival Time T_{Arrival}** : Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ankünften
- **Inter-Service Time T_{Service}** : Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Abschlüssen
- λ = Ankunftsrate, μ = Bedienrate (beides Erwartungswerte!)

Deterministisch vs. Stochastisch:

- **Deterministisch:** gleiche Inputs → immer gleicher Output, z.B. fixe Inter-Arrival-Zeit von 60 s.
- **Stochastisch:** zufällig schwankend, oft modelliert mit der **Exponentialverteilung** (kurze Intervalle wahrscheinlicher als lange). Mittelwert $E[T_{Arrival}] = 60$ s kann derselbe sein wie im deterministischen Fall, aber mit **Variabilität**.

9.1.4 Utilization Ratio ρ

$$\rho = \frac{\lambda}{c \cdot \mu}$$

Ankunftsrate (points to λ)
Bedierrate (points to μ)
Anzahl Bedienstellen (points to c)
Level of Service (Komfortstandard) (points to ρ)

→ $\rho \approx 0$: System unterlastet, viel freie Kapazität. → $\rho \approx 1$: System hochbelastet. Eines der fundamentalsten LoS-Mass.

9.2 Charakteristik der Delays

Lambda = Ankunftsrate

Delays entstehen, wenn ρ gross wird - also entweder λ hoch (Peak-Hours, weitergeleitete Delays von anderen Flughäfen) oder μ tief (zu wenig Kapazität, schlechtes Wetter, technische Probleme, Personalmangel).

9.2.1 Overload Delays vs. Stochastic Delays

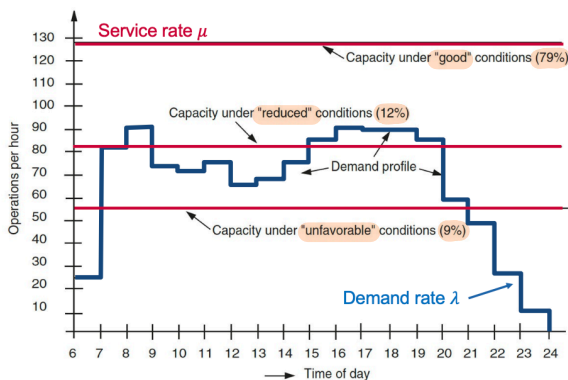


Figure 3: Real world example of experienced demand rate over the course of a day (blue line) and three different scenarios of service rates (red lines). From De Neufville et al. (2013, p. 382).

Overload Delays: wenn $\lambda > c \cdot \mu \rightarrow \rho > 1$. Warteschlange wächst **unbegrenzt** über die Zeit. Je länger der Overload-Zeitraum T und je grösser die Differenz $\lambda - \mu$, desto länger die Schlange. Beispiel: bei "unfavourable conditions" entstehen den ganzen Tag massive Delays. Sollte unter allen Umständen für längere Perioden vermieden werden – die Schlange wird sonst unkontrollierbar.

Stochastic Delays: wenn $\lambda \leq c \cdot \mu \rightarrow \rho \leq 1$. Im Prinzip könnte das System die Nachfrage handhaben, aber weil Ankunft und Service zufällig schwanken (mal kommen alle gleichzeitig, mal kein Flugzeug), entstehen **trotzdem** Delays durch kurzfristige Spitzen oder Service-Einbrüche. Je näher ρ an 1, desto wahrscheinlicher und länger werden diese Schlangen. Selbst bei "good conditions" ($\rho \approx 0.66$) treten leichte stochastische Delays auf.

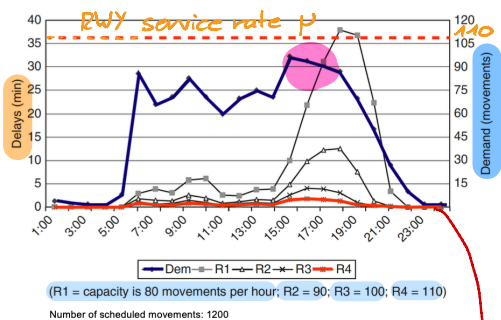


Figure 4: Overload vs. Stochastic Delays. The blue curve shows demand; the orange curve quantifies delays when the runway system is operated at 110 movements per hour. From De Neufville et al. (2013, p. 385).

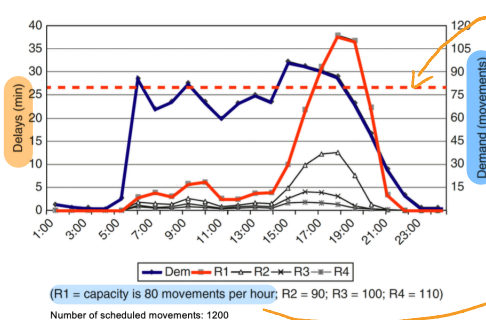


Figure 5: Overload vs. Stochastic Delays. The blue curve shows demand; the orange curve quantifies delays when the runway system is operated at 80 movements per hour. From De Neufville et al. (2013, p. 385).

Je kleiner μ umso eher gibt es delay.

peak → 94 ATM

Resulting delay with $\mu = 110$ ATM/h

Wichtige Beobachtung - Peak Demand ≠ Peak Delay: Demand-Peak im Beispiel um 15-16 Uhr, Delay-Peak aber um 18-19 Uhr. Grund: Die Schlange kann erst abgebaut werden, nachdem λ unter μ fällt. Wer kurz nach dem Demand-Peak ankommt, wartet am längsten. Dieses Phänomen tritt in allen Queueing Systems auf.

9.2.2 Nicht-Linearität von Delays

Delays hängen nicht linear von der Service Rate ab. Aus dem Skript-Beispiel:

μ [ATM/h]	Max Delay	\emptyset Delay	ρ (24h)	ρ (06-22)
110	2 min	0.8 min	0.455	0.664
100	4 min	1.6 min	0.500	0.731
90	13 min	4.3 min	0.556	0.812
80	39 min	12.8 min	0.625	0.913

↳ per moment

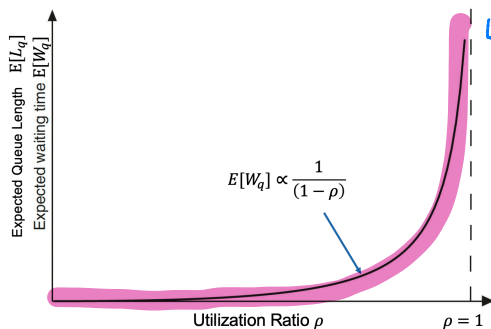
- Von 110 → 100 (-9.1 % Kapazität) → Delay **verdoppelt** (0.8 → 1.6 min)
- Von 90 → 80 (-11.1 % Kapazität) → Delay **verdreifacht** (4.3 → 12.8 min)

→ Je näher ρ an 1, desto sensibler reagiert der Delay auf kleine Änderungen. Auch die Variabilität der Delays nimmt mit ρ stark zu - an manchen Tagen ist der Delay deutlich höher als der Erwartungswert.

λ, μ, ρ sind theoretische Werte und daher kann es an einem Tag mehr oder weniger delay geben bei gleichen Bedingungen.

Hockey Stick Curve: Solange $\rho < 1$, gilt:

$$E[L_q] \propto \frac{1}{1-\rho}, E[W_q] \propto \frac{1}{1-\rho}$$



- λ : Arrival rate
- μ : service rate
- c : number of service center
- $\rho = \frac{\lambda}{c \cdot \mu}$ utilization ratio

Bei $\rho \rightarrow 1$ explodieren Schlängellänge und Wartezeit. **Konsequenz:** Niemals dauerhaft nahe an $\rho = 1$ betreiben → Balance zwischen Auslastung und akzeptablem Delay nötig.

9.3 Analytische Modelle

$\rho \geq 1 \rightarrow \text{Overload}$

Alle Modelle in diesem Abschnitt gelten nur für $\rho < 1$ und im **Steady State** (Gleichgewicht).

9.3.1 Kendall-Notation

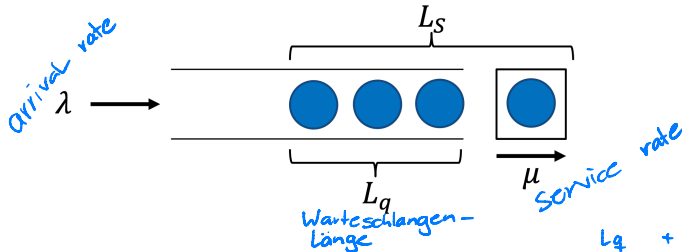
Form A/B/c:

- **A** = Verteilung der Inter-Arrival-Zeiten
- **B** = Verteilung der Service-Zeiten
- **c** = Anzahl Server

Symbol	Bedeutung
M (Markovian)	exponentialverteilte Zeiten → Anzahl Ankünfte pro Zeit Poisson-verteilt
D (Deterministic)	konstante Zeiten
G (General)	beliebige Verteilung, charakterisiert über Mittelwert und Varianz

9.3.2 M/M/1

Markov-Ankunft + Markov-Service + 1 Server.



Wichtige Begriffe: L_s = Anzahl Entities im System (Queue + Service); L_q = Anzahl in der Queue.

Die zentralen Formeln (Steady State, $\lambda < \mu$):

expected entities in the system $\leftarrow E[L_s] = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$, $E[L_q] = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$ \rightarrow expected entities in the queue

expected time an entity spends in the system $\leftarrow E[W_s] = \frac{1}{\mu - \lambda}$, $E[W_q] = \frac{\rho}{\mu - \lambda}$ \rightarrow expected waiting time in the queue

Only !
steady state
 \Rightarrow system im Gleichgewicht.
 \hookrightarrow kein Demand-change over time.

Little's Law - fundamentaler Zusammenhang in allen Queueing Systems:

$$E[L_q] = \lambda \cdot E[W_q], E[L_s] = \lambda \cdot E[W_s]$$

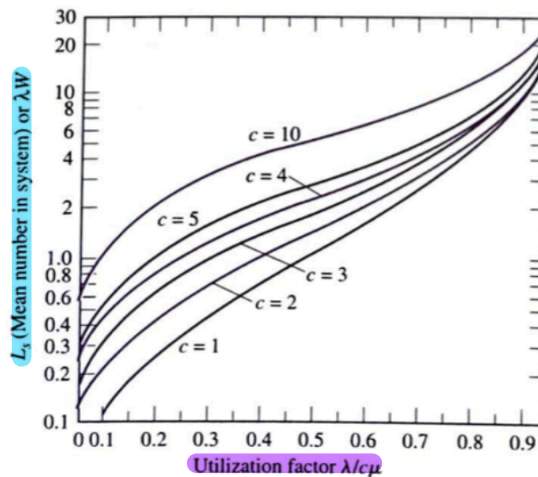
\rightarrow Mittlere Anzahl im System = Ankunftsrate \times mittlere Verweildauer.

Zusätzlich: $E[W_s] = E[W_q] + \frac{1}{\mu}$ (Verweildauer = Wartezeit + Service-Zeit).

9.3.3 M/M/c

Mehrere parallele Server, $\rho = \frac{\lambda}{c\mu}$. Geschlossene Formeln existieren (Erlang-C), sind aber komplex \rightarrow in der Praxis grafisch ablesen.

$\rightarrow c$
 utilization factor



c : number of Server

\rightarrow je höher c umso höher die Abfertigung

Ablezen von $E[L_s]$, dann $E[L_q]$ und Wartezeiten via Little's Law berechnen.

9.3.4 M/G/1

Markov-Ankunft, allgemeine Service-Zeit-Verteilung. Pollaczek-Khinchin-Formel:

$$E[W_q] = \frac{\lambda((E[S])^2 + \text{Var}(S))}{2(1 - \rho)}$$

\hookrightarrow expected waiting time in the queue

Nur die ersten beiden Momente (Mittelwert + Varianz) der Service-Zeit nötig – die genaue Verteilung muss nicht bekannt sein.

→ Strategie

9.4 Policy Implications

9.4.1 Kurzfristig vs. Langfristig

- **Kurzfristig (Stunden):** $\rho > 1$ ist akzeptabel - Schlangen bauen sich auf, lösen sich aber wieder auf, sobald ρ fällt.
- **Langfristig (Tage, Saison, Jahre):** $\rho < 1$ zwingend, sonst wachsen Schlangen unbegrenzt → System wird instabil.

↳ utilization factor $\rho = \frac{\lambda}{c \cdot \mu}$

9.4.2 Konsequenzen der Nicht-Linearität

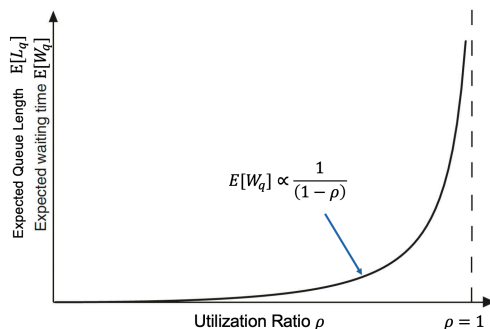
Wegen der Hockey-Stick-Form: nie nahe $\rho = 1$ betreiben. Variabilität nimmt mit ρ ebenfalls zu → bei $\rho = 0.95$ können Delays an einzelnen Tagen weit über dem Erwartungswert liegen.

→ De-facto Industriestandard: ρ zwischen 0.85 und 0.9 als Kompromiss zwischen Kapazitätsauslastung und akzeptablem Delay.

Verbindung zu den abgeleiteten Kapazitätssmassen aus dem Capacity-Kapitel:

Mass	Bezug zur Hockey Stick
Declared Capacity (85–90 % von Max Throughput) → of a RWY	begrenzt ρ auf 0.85–0.9 → vermeidet exzessive Delays
Practical Hourly Capacity (mittlerer Delay ≤ 4 min)	M/G/1-Beispiel: bei $\mu = 48$ ATM/h entspricht $\rho \approx 0.85$ –0.9 etwa 4 min Delay

9.4.3 Small Changes → Large Outcomes



Eine Reduktion von ρ um $\Delta\rho = 0.05$ hat sehr unterschiedliche Wirkungen:

- Bei $\rho = 0.9 \rightarrow 0.85$: massive Reduktion in Delay und Schlangenlänge
- Bei $\rho = 0.65 \rightarrow 0.60$: kaum spürbar

→ Erklärt, warum grosse Flughäfen massiv in Kapazitätserweiterungen investieren, auch wenn diese den Throughput nur leicht erhöhen: an überlasteten Flughäfen sparen schon kleine μ -Verbesserungen viel Delay.

9.5 Demand Management

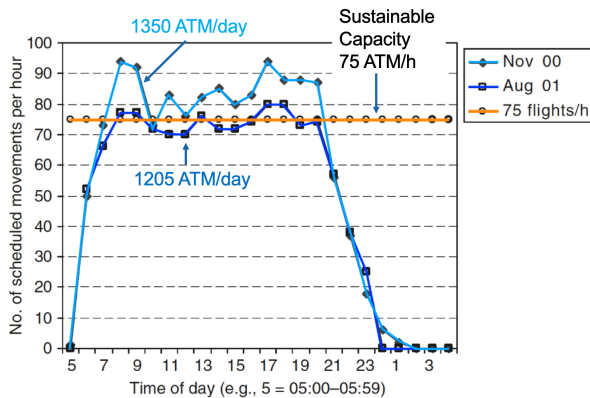
Definition: Alle administrativen und ökonomischen Massnahmen, die den Zugang zu einem hochbelasteten Flughafen einschränken oder die zeitliche Verteilung der Nachfrage ändern.

Unterscheidung:

- **Tactical** (FAA, EUROCONTROL Air Traffic Flow Management) – dynamisch am Operationstag
- **Strategic** – Langfristhorizont (Slots, Pricing) → Fokus dieses Abschnitts

9.5.1 Motivation

Ergibt sich direkt aus der Hockey-Stick-Curve: Bei hoher Auslastung wirken **kleine Reduktionen von λ** überproportional stark. Kapazität (μ) zu erhöhen ist an überlasteten Flughäfen oft unmöglich/teuer \rightarrow also bei λ ansetzen.



arrival

Time	ARRIVAL	DEPARTURE	TOTAL
0000	0	0	0
0100	0	0	0
0200	0	0	0
0300	0	0	0
0400	0	0	0
0500	0	0	0
0600	0	0	0
0700	0	0	0
0800	0	0	0
0900	0	0	0
1000	0	0	0
1100	0	0	0
1200	0	0	0
1300	0	0	0
1400	0	0	0
1500	0	0	0
1600	0	0	0
1700	0	0	0
1800	0	0	0
1900	0	0	0
2000	0	0	0
2100	0	0	0
2200	0	0	0
2300	0	0	0
2400	0	0	0
2500	0	0	0
2600	0	0	0
2700	0	0	0
2800	0	0	0
2900	0	0	0
3000	0	0	0

Figure 10: Demand for New York La Guardia Airport before demand management (light blue line) and after demand management (dark blue line). From De Neufville et al. (2013, p. 414).

Praxisbeispiel LaGuardia (Nov 2000): Flughafen verursachte ~25 % der signifikanten Delays im US-Luftraum. FAA führte ein Slot-System ein: -10 % Nachfrage (1350 \rightarrow 1205 ATM/Tag) \rightarrow Max-Delay von ~80 min auf ~15 min. Bei Betriebskosten von ~\$1'600/h enorme Einsparung für Airlines.

9.5.2 Drei Ansätze

Rein administrativ - Slots

Ein Slot = reserviertes Zeitintervall für An- oder Abflug, einer Airline zugewiesen für eine Saison. Beispiel: "60 Slots zwischen 09:00–10:00" = max. 60 An-/Abflüge in dieser Stunde planbar.

Unterscheidung:

- **Strategische Slots** - Langzeitplanung
- **Tactical Slots** - von ATC am Operationstag zugewiesen, weichen evtl. ab

Zuteilungskriterien: **Grandfather Rights** (historische Nutzung), **Regularität**, **Markt-Aspekte**, **New Entrant Rules** (faire Marktöffnung).

Rein ökonomisch - Pricing

Landing Fees = Gebühren für die Nutzung der Flughafen-Infrastruktur, meist nach **Aircraft Weight** bemessen.

Average Cost Pricing (häufig in der Praxis): Zielumsatz wird auf erwartetes Verkehrsvolumen verteilt.

Zwei Schwächen:

1. Wenn **Verkehr steigt**, sinkt die Gebühr pro Bewegung – obwohl Congestion zunimmt
2. Gewicht hat wenig mit den **echten Congestion-Kosten** zu tun (Runway-Kapazität wird durch Bewegungen bestimmt, nicht durch Gewicht)

Congestion Pricing: Gebühren steigen mit der tatsächlichen Belastung - höher in Peak-Periods, tiefer Off-Peak. Ziel: Nachfrage verschieben.

Externe Delay-Kosten: Wenn ein Flugzeug 30 andere um je 2 min verspätet \rightarrow 60 min Gesamt-Delay \times ~\$80/min = **\$4'800 externe Kosten**. Diese liegen weit über den privaten Kosten des Verursachers. Congestion Pricing soll diese externen Kosten **internalisieren**.

In der Praxis schwer exakt umzusetzen - daher Vereinfachungen: Peak Surcharges, Flat Congestion Fees, Multiplikatoren auf Standardgebühren, Minimumgebühren während Peak.

Hybride Ansätze

Kombination administrativer und ökonomischer Mechanismen:

- **Slot Allocation + Congestion Pricing**
- **Slot Auctions** - Teil der Slots wird versteigert → Slots gehen an die mit der höchsten Zahlungsbereitschaft
- **Secondary Trading** - Airlines können Slots kaufen, verkaufen, leasen

Praxisbeispiel: Oman Air kaufte 2016 einen Heathrow-Slot von British Airways für \$75 Mio. - zeigt den enormen wirtschaftlichen Wert von Zugang zu überlasteten Flughäfen.

10 Airport Planning

10.1 Planungsebenen

Drei Entscheidungsebenen mit zunehmender Zeitskala und zunehmender Unsicherheit:

Ebene	Zeitskala	Inhalt
Operational	Tage bis Wochen	Tagesbetrieb, Staffing, Delay Management, Stakeholder-Koordination (z.B. Airport Steering ZRH)
Tactical	bis ~5 Jahre	Optimierung innerhalb bestehender Perimeter und Gebäudehüllen
Strategic (ASP)	20–50 Jahre	Langfristige Planung, neue Perimeter, neue Infrastruktur

→ Je weiter der Horizont, desto grösser die Unsicherheit. Schon bei 5–10 Jahren Strategic Planning können Forecast-Abweichungen ±100 % betragen → dominiert die ganze Logik der strategischen Planung.

10.2 Airport Strategic Planning (ASP)

10.2.1 Master Planning vs. Flexible ASP

Zwei Grundrichtungen:

Klassischer Master Plan (IATA Airport Development Reference Manual): linearer Prozess mit Verbesserungsschleifen → mündet in ein starres Dokument ("Master Plan"), das definiert, wie der Flughafen die nächsten 20–50 Jahre entwickelt wird.

Kritik in der Literatur:

1. Unsicherheiten (Demand, Technologie, Regulation, Politik, Demografie) werden **nicht adäquat behandelt**
2. Master Plan erlaubt **keine flexible Infrastruktur**, die sich an neue Umstände anpassen lässt

→ Daraus entstanden **Flexible & Dynamic Planning Approaches**, die genau diese Schwächen adressieren.

10.2.2 Die 5 Schritte des klassischen ASP

Schritt	Inhalt
1. Inventory	aktuelle Infrastruktur erfassen (Server, Durchsatz, Flächen, Zustand, Lebensdauer)
2. Demand Forecast	eine (oder optimistisch/pessimistisch) Prognose der zukünftigen Nachfrage → DHL check-in
3. Facility Requirements	wann, wo und um wie viel muss welche Kapazität angepasst werden? → Engpässe vermeiden
4. Alternatives	konkrete Plan-Alternativen, die die Facility Requirements realisieren
5. Selection	beste Alternative wählen → Master Plan → Blue print vom neuen Plan

10.2.3 Unterschiede Klassisch & Flexibel

Punkt	Klassisch	Flexibel
Schritt 2	1 (oder wenige) Forecast(s)	Tausende Demand-Szenarien
Schritt 5	Vollständiger Master Plan bis Horizont	Nur First Phase Development definiert; Rest folgt den flexiblen Facility Requirements

→ Flexible ASP akzeptiert: man kann die Zukunft nicht kennen → Design muss anpassbar sein.

10.3 Flexible Engineering Systems & Real Options

10.3.1 Flexibility

Engineering Systems = komplexe Systeme aus Luftfahrt, Verteidigung, Energie, Wohnen, Telekom, Verkehr (inkl. Flughäfen, AKWs, Bahnsysteme). Flexibel = fähig, sich bei Unsicherheit mit minimalen Kosten anzupassen.

10.3.2 Real Options - Konzept

Übertragung des Options-Konzepts aus der Finanzwelt auf physische Systeme:

- **Call Option** = Recht, aber **nicht Pflicht**, etwas zu kaufen/erweitern
- **Put Option** = Recht, etwas zu verkaufen/aufzugeben → wie eine Versicherung

Airport baut neues Terminal so das es erweitert werden kann. Sie müssen aber nicht.

↳ Flughafen betreibt Frachtterminal → nach 5 Jahren kein Gewinn → Eigentümer zurück. Flughafen gibt das Terminal dem

Real Options = dasselbe Prinzip, aber für Infrastruktur. Geben dem **Owner** die **Möglichkeit** (nicht Pflicht), auf **positive Entwicklungen** zu **reagieren** und **negative abzufedern**.

Zwei Typen:

Typ	Definition	Beispiel
Real Option ON system	Management-Flexibilität → Recht zu kaufen, verkaufen, erweitern, umbauen	Land Banking: Flughafen kauft Landreserve → kann später neue Runway bauen, muss aber nicht
Real Option IN system	Design-Feature, bewusst in die Bauweise integriert	25 de Abril Bridge Lissabon (zusätzliche Spuren später möglich), Bluewater Parking Garage UK (Etagen aufstockbar), Bentall 5 Vancouver (Aufstockung möglich) – alle bewusst überdimensioniert gebaut

10.3.3 Candidate Flexibilities

Konkrete Bausteine, mit denen Real Options im Flughafenkontext umgesetzt werden (Übersicht z.B. in **ACRP Report 76**):

- **Land Banking** – strategische Landreserve kaufen
- **Buffer Space** – ungenutzte Reserveflächen in Gebäuden
- **Temporäre Anlagen** – z.B. temporäre Bus Gates ZRH
- **Modulare Gebäudestrukturen** – wie Lego: definierte Schnittstellen, später erweiterbar
- **Mixed / Shared Use Facilities** – z.B. **Swing Gates** (Domestic ↔ International)

10.4 ASP Schritt 1 – Inventory

Zwei Phasen:

Data Collection: Pläne, Karten, Topografie, Eigentumsverhältnisse, Finanzdaten, Umweltdaten (Floodplains, archäologische Stätten), Ver-/Entsorgung, Ground Access, Regulatorisches.

Site Evaluation & Facility Potential: aktueller Zustand, Restlebensdauer, Kapazität und Leistungsfähigkeit der bestehenden Infrastruktur.

Form ist meist eine **Tabelle** pro Facility mit: Anzahl Units, Assessed Capacity, Max DHL, Current DHL, Utilization, Annual Demand, Service Rate, Fläche.

→ Methode identisch in Klassisch und Flexibel; aufwändig wegen Datenmenge.

10.5 ASP Schritt 2 – Demand Forecast

Zwei Forecast-Typen nötig:

Typ	Inhalt	Verwendung
Aggregated Demand Forecast	Gesamtnachfrage pro Jahr (PAX, ATM, Cargo, Anteile Transfer etc.)	Gesamtflughafen
Design Hour Load (DHL) Forecast	Nachfrage in der Spitzenstunde pro Facility	Dimensionierung einzelner Anlagen

Aggregierte Werte müssen via **Konversionsmethode** auf DHL umgerechnet werden.

↳ rechnet Jahrespassagiere → Spitzenstunden PAX (DHL)

10.5.1 Aggregated Demand mit Regressionsanalyse

Historische Daten beschreiben den Zusammenhang einer **dependent variable** Y (z.B. PAX/Jahr) mit **independent variables** X_1, X_2, \dots, X_n (z.B. Population, Income, GDP):

$$Y_i = f(X_{1,i}, X_{2,i}, \dots, X_{n,i}, \beta) + \varepsilon_i$$

↳ unbekannter regressions Parameter

↳ error Term

Die unbekannt Parameter β werden mit **Least Squares** geschätzt:

$$\min \sum_i [Y_i - f(X_{1,i}, \dots, X_{n,i}, \beta)]^2$$

Beispiel: $PAX_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot POPULATION_i + \beta_2 \cdot INCOME_i + \varepsilon_i$. Aus Historiedaten β schätzen, dann Forecast-Werte von Population und Income einsetzen.

10.5.2 Qualität – Pearson Correlation Coefficient R^2

$R^2 \in [-1, +1]$:

- $R^2 = +1$: perfekte positive Korrelation
- $R^2 = 0$: keine Korrelation
- $R^2 = -1$: perfekte negative Korrelation

Wichtige Warnung: Correlation \neq Causality! Studentenwettbewerb von De Neufville: irrelevante Faktoren wie *Height of Japanese Men* ($R^2 = 0.997$), *Visitors to Yellowstone* (0.991), *Birthrate North Korea* (0.971) korrelieren ebenfalls extrem gut mit dem Los Angeles Airport Traffic. **Hohe Korrelation allein macht ein Modell nicht gut.**

10.5.3 Schwächen der Regression

- Welche **independent variables**? (Population, Income, GDP, Unemployment ...)
- Welche **Form** (linear, power, exponential, logistic)?
- **Trend Breakers** in den historischen Daten?
- **Zukünftige Werte der X-Variablen sind selber unsicher** → erklärt die grossen Forecast-Ungenauigkeiten

10.5.4 Konversion Aggregated → DHL

Drei Methoden, mit zunehmender Genauigkeit und Aufwand:

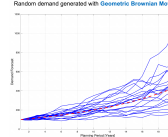
Methode	Vorgehen	Aufwand
Approximation	DHL = MPPA × Faktor (0.04 % bei <10 Mio., 0.035 % bei 10–20, 0.03 % bei >20)	tief
Ratio-based	Verhältnis DHL/Jahresdemand mit Regressionsmodell beschreiben (SBR, DHR)	mittel

MPPA: Million PAX per Annum

Design Schedule	Day	fiktiven Flugplan für Designtag aufbauen, Belastung simulieren	hoch (viele Annahmen → mehr Ungenauigkeit)
------------------------	------------	--	--

10.5.5 Flexible ASP – Range of Forecasts

Statt einer Prognose werden Hunderte/Tausende Szenarien generiert, z.B. mit **Geometric Brownian Motion** (stochastischer Prozess). Diese Szenarien speisen den nächsten Schritt.



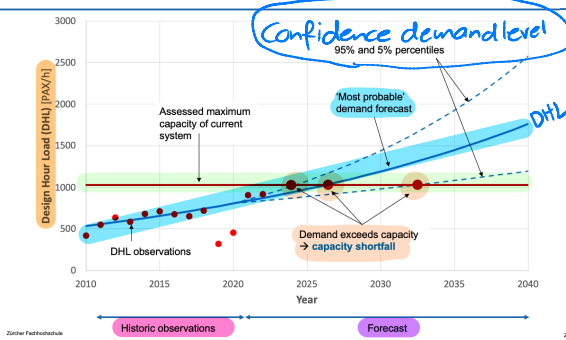
10.6 ASP Schritt 3 – Facility Requirements

Definition: Wann, wo und um wie viel soll die Kapazität einer Facility in Zukunft angepasst werden, damit der Demand gedeckt wird?

Inputs: **Inventory (Schritt 1) + DHL Forecast (Schritt 2).**

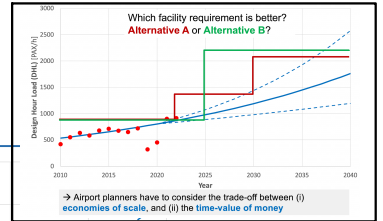
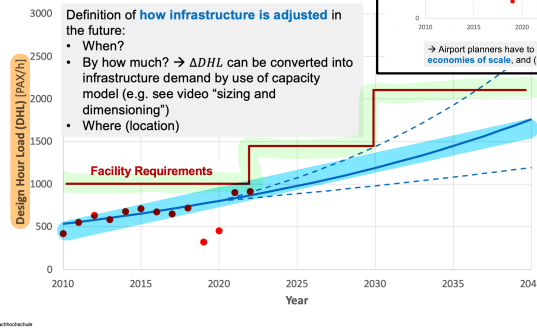
Step 3: Facility Requirements

Inputs required for determination of facility requirements



Step 3: Facility Requirements

How facility requirements look like



In einem Diagramm zeichnet sich ab: solange die Capacity-Linie über dem Forecast liegt, OK; wo der Forecast die Capacity schneidet → **Capacity Shortfall** → Expansion nötig. Die Facility Requirements werden als **stair-shaped linedargestellt** (Treppe der Kapazitätserweiterungen über die Zeit).

10.6.1 Optimal Facility Requirements – Capacity Expansion Problem

Es gibt **viele** mögliche Treppen. Welche ist optimal? → Trade-off zwischen:

Effekt	Inhalt
Economies of Scale	größere Erweiterungen sind pro Einheit günstiger → spricht für wenige, grosse Schritte → <i>Alternative B</i>
Time Value of Money	ein Franken heute ist mehr wert als in 10 Jahren → spricht für späte, kleine Schritte

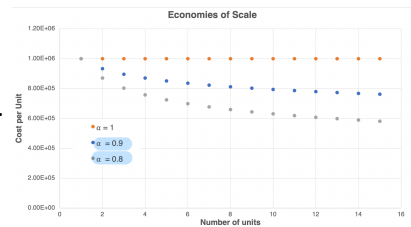
10.6.2 Economies of Scale

Power-Cost-Funktion:

$$C(\Delta K) = c \cdot \|\Delta K\|^\alpha = \text{Kosten}$$

mit ΔK = Anzahl Einheiten, c = Stückkosten, α = **Economies-of-Scale-Parameter**, $0 \leq \alpha \leq 1$.

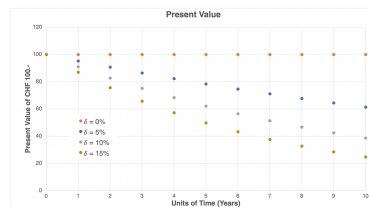
- $\alpha = 1$: keine Skaleneffekte (Stückkosten konstant)
- $\alpha < 1$: Stückkosten sinken mit ΔK ; je kleiner α , desto stärker der Effekt
- In Praxis typisch $\alpha \approx 0.8-1$



10.6.3 Time Value of Money

Ein Franken in t Jahren ist heute weniger wert, weil man ihn heute investieren könnte. Present Value:

$$PV(C) = C \cdot \frac{1}{(1 + \delta)^t}$$



mit δ = Discount Rate, für Infrastrukturprojekte typisch 5–15 %. Je grösser δ und t , desto stärker der "Schrumpfeffekt".

10.6.4 Deterministisches Capacity Expansion Problem

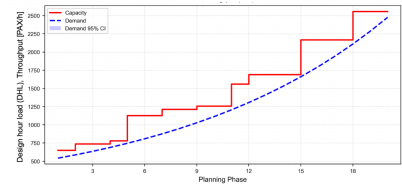
Cash Flow im Jahr t = Einnahmen $R(K_t, d_t)$ – Kosten $C(K_t, d_t)$.

Net Present Value (NPV) summiert alle abgezinste Cash Flows abzüglich der initialen CAPEX C_0 :

$$NPV = -C_0 + \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1 + \delta)^t} \cdot [R(K_t, d_t) - C(K_t, d_t)]$$

→ cost
↳ Revenue ↳ Kapazität

capital expenditures



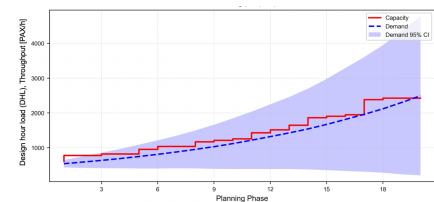
Optimal: jenen Kapazitätsvektor $K = [K_1, K_2, \dots, K_T]$ finden, der NPV maximiert.

10.6.5 Stochastisches Capacity Expansion Problem (Flexible ASP)

Demand ist kein einzelner Wert, sondern S Szenarien d_t^s mit Wahrscheinlichkeiten p_s (meist $p_1 = p_2 = \dots = p_S$).

Ziel: Expected NPV (ENPV) maximieren:

$$\max_K \sum_{s=1}^S p_s \left[-C_0 + \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1 + \delta)^t} [R(K_t, d_t^s) - C(K_t, d_t^s)] \right]$$

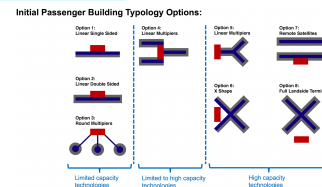


Resultat: ebenfalls ein optimaler Kapazitätsvektor K^* , aber gegenüber der **Bandbreite aller Szenarien** robust. Typisch werden $\sim 2'000$ Szenarien gerechnet; im Diagramm zeigt man dann **den 95%-Konfidenztrichter** und die **optimale Treppe**.

10.7 ASP Schritt 4 – Alternatives ("Optioneering")

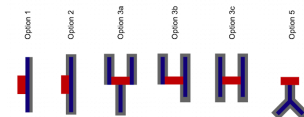
Konkrete Konzepte entwickeln, wie die Facility Requirements baulich umgesetzt werden. Bereiche:

- **Runways:** Konfiguration, Ausrichtung, Holding Points, Hindernisse
- **Taxiways:** RETs, Perimeter Taxiways
- **Terminals:** Lage, Typ, Layout (zentral/dezentral)
- **Apron:** Remote/Contact-Mix
- **Ground Access:** Modi, Integration, Multimodale Knoten



→ Planer entwickeln möglichst **viele unterschiedliche Alternativen** mit **unterschiedlichen Qualitäten**, dann **Shortlist** für die Bewertung.

Beispiel Terminal-Typologien (vom Pier-Layout bis X-Layout): Linear, Pier, Satellite, X-Shape, mit verschiedenen Kapazitäts- und Erweiterbarkeitsstufen.



10.8 ASP Schritt 5 – Selection (Evaluation Process)

6-Schritte-Bewertung:

#	Schritt
1	Evaluation Criteria definieren
2	Weights pro Kriterium festlegen
3	Score jede Alternative pro Kriterium
4	Rank nach Total Weighted Score
5	Sensitivity Tests mit veränderten Weights
6	Select Preferred Option(s)

10.8.1 Kriterien & Weights

Beispielstruktur (kann frei definiert werden):

