

Simultane Start-/Lande- und Rollroutenplanung

Die Planungsaufgaben auf Flughäfen werden isoliert bearbeitet, obwohl sie Interdependenzen aufweisen. Das übliche sukzessive Vorgehen, bei dem zunächst ein Flugplan erstellt wird, der dann als Datum in die Rollroutenplanung eingeht, führt nicht zu kostenminimalen Ergebnissen. Zur simultanen Planung beider Entscheidungsbereiche wird ein gemischt-ganzzahliges Modell entwickelt und in einer Szenarioanalyse dessen Kostensenkungspotential und Abhängigkeit vom vorgegebenen Flugplan untersucht.



Prof. Dr. Martin Steinrücke ist Universitätsprofessor für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre sowie Gründungsplanung und Supply Chain Management an der Universität Greifswald. Bevorzugte Forschungsgebiete: Strukturplanung in Supply Chains, Leistungsplanung in Supply Chains, Integrierte Gründungs- und Supply Chain Planung, Integrierte Finanz- und Supply Chain Planung, Heuristische Lösungsverfahren im Supply Chain Management.



Dipl. Kfm. Christoph Strauß ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre sowie Gründungsplanung und Supply Chain Management an der Universität Greifswald. Bevorzugte Forschungsgebiete: Strukturplanung in Supply Chains, Leistungsplanung in Supply Chains, Integrierte Gründungs- und Supply Chain Planung, Heuristische Lösungsverfahren im Supply Chain Management.

Summary: In practice of scheduling at airports, various problems are planned one by one although interdependencies exist. The successive procedure of compiling flight plans, and scheduling taxiing routes with data from the flight plans usually does not result in cost efficient solutions. For simultaneous scheduling, a new mixed-integer linear approach is developed. A scenario analysis is applied to reveal its potential of cost reduction and dependence on given flight plans. flightplan is examined.

Stichwörter: Routenplanung, Landeplanung, Flughafen, gemischt-ganzzahlige Optimierung, Ablaufplanung

1. Problemstellung der simultanen Start-/Lande- und Rollroutenplanung

An Flughäfen findet eine Vielzahl von Planungsprozessen gleichzeitig statt. Es existieren starke **Interdependenzen** zwischen einigen Prozessen, die eine simultane Planung der betreffenden Entscheidungsfelder vorteilhaft machen. Diese wird jedoch, mit Verweis auf unterschiedliche personelle Verantwortlichkeiten oder die schlechte Lösbarkeit der Probleme, in der Praxis nicht durchgeführt (vgl. Gönsch, 2010, S. 230). Die zentralen Ausgangsdaten für die Rollroutenplanung sind die Start- und Landezeiten der Flugzeuge. In der Start-/Landeplanung sind diese Zeiten allerdings Entscheidungsinhalte und aus der Praxis ist bekannt, dass Abweichungen vom Flugplan keine Seltenheit darstellen. Der gängige **Ablauf** sieht vor, zunächst den Flugplan zu bestimmen, um im darauf folgenden Schritt mit den nun gegebenen Start-/Landezeiten die optimalen Rollrouten festzulegen. Mit dieser Herangehensweise wird ausgeschlossen, dass zum Preis einer geringen Kostensteigerung beim Flugplan eine hohe Kostensenkung bei der Routenplanung realisiert werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit soll gezeigt werden, dass nur die **simultane** Planung von Start-/Landevorgängen und Rollrouten zu insgesamt optimalen Ergebnissen führt.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Den Anfang bildet eine Erläuterung der Grundlagen der Planungsaufgaben an Flughäfen. Besonderes Interesse liegt dabei auf der Start-/Landeplanung sowie der Rollroutenplanung. Andere Planungsbereiche werden zur Einordnung genannt. Es folgt eine Darstellung der Modellierung der simultanen Start-/Lande- und Rollroutenplanung. Dazu werden zunächst isolierte Planungsansätze aus der Literatur betrachtet, auf deren Grundlage anschließend ein Modell zur simultanen Planung konzipiert wird. Anhand eines Beispiels wird die Vorteilhaftigkeit der simultanen Planung gegenüber dem suk-

zessiven Vorgehen dargelegt und die Abhängigkeit des Verbesserungspotentials von der Datensituation aufgezeigt. Den Schluss bildet eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

2. Grundlagen der Planungsbereiche am Flughafen

2.1. Start-/Landeplanung

Im Bereich der Flughafen- und Luftverkehrsplanung gibt es eine Vielzahl von Entscheidungsbereichen. Das am häufigsten untersuchte Entscheidungsfeld ist die Start-/Landeplanung. Während der Luftraum nahezu unbegrenzt und die Flughafenoberfläche in ausreichendem Maße vorhanden ist, stellt die Durchflusskapazität des Luftverkehrs auf den Start-/Landebahnen einen **Engpass** dar. Das Ziel der Start-/Landeplanung ist die Erstellung eines Flugplans, der die Kapazitäten der vorhandenen Start-/Landebahnen optimal ausnutzt.

Dabei müssen einige Besonderheiten beachtet werden. Flughäfen unterscheiden sich in Anzahl der Start-/Landebahnen. Bei mehreren Start-/Landebahnen kann eine Entscheidung über die Verwendung der einzelnen erfolgen. Dabei unterscheidet man zwischen Start-/Landebahnen auf denen ausschließlich Starts oder Landungen stattfinden und Start-/Landebahnen auf denen sowohl Starts als auch Landungen durchgeführt werden (getrennter/gemischter Modus; vgl. *Beasley et al., 2000, S. 182*). Die Betriebsrichtung ist in beiden Fällen kurzfristig unveränderlich, um ein Entgegenkommen von an- und abfliegenden Flugzeugen auszuschließen. Ob die Planung von mehreren Start-/Landebahnen unabhängig voneinander durchgeführt werden kann, hängt von ihrer Entfernung und Ausrichtung zueinander ab (vgl. *Balakrishnan, 2006, S. 18*).

Im Flugverkehr hat **Sicherheit** höchste Priorität, was die Einhaltung von Sicherheitsabständen bei Start- und Landevorgängen erfordert. Diese verhindern die Gefährdung eines Flugzeuges durch die Wirbelschleppen des vorausfliegenden Flugzeuges. Während die Intensität der Luftverwir-

belungen von der Größe des verursachenden Flugzeugs abhängig ist, richtet sich die Anfälligkeit für den Effekt nach der Größe des nachfolgenden Flugzeugs. Aufgrund der hohen Anzahl unterschiedlicher Flugzeugtypen ist es sinnvoll, eine Unterteilung in wenige Größenklassen vorzunehmen. Eine Aufschlüsselung des Größeneinflusses zweier Flugzeuge auf den Start-/Landebahn-Sicherheitsabstand in Sekunden zwischen beiden gibt *Balakrishnan (2010, S. 1652; vgl. Tab. 1)*.

Bei Start-/Landevorgängen steht Piloten kurzfristig ein **Intervall** von 15 Minuten zur Verfügung, in dem eine Zielzeit liegt, zu der der Start/die Landung optimal stattfinden sollte. Ein Start/eine Landung bis zu 5 Minuten vor oder 10 Minuten nach der Zielzeit bilden die Grenzen des zulässigen Intervalls (vgl. *Deau et al., 2008*). Die Abweichung von der Zielzeit führt zu nicht erwünschten kurzfristigen Abweichungen vom mittelfristigen Plan. Zu dessen entsprechender Berücksichtigung ist das Ziel der kurzfristigen Start-/Landeplanung die Minimierung der absoluten Abweichung der realen Start-/Landezeiten von den Zielzeiten.

Die Start-/Landeplanung ist luftseitig an die Flugroutenplanung und bodenseitig an die Bodenroutenplanung gekoppelt. Während der Luftraum und die Flugrouten nahezu unbegrenzt sind, besitzt der Bodenverkehr auf dem Rollfeld ein hohes **Konfliktpotential**. Die Bestimmung eines Flugplans ohne Berücksichtigung der Situation auf dem Rollfeld führt zu insgesamt suboptimalen Ergebnissen.

2.2. Rollroutenplanung

Die Rollroutenplanung dient der Festlegung optimaler Fahrwege vom Terminalbereich zur Startbahn bzw. von der Landebahn zum Terminalbereich. Durch minimale Fahrzeiten wird gewährleistet, dass sowohl Kosten für Treibstoff und Personal, wie auch Emissionen von Abgas und Betriebsgeräuschen gering bleiben.

Zur Abbildung von Fahrwegen wird das Rollfeld als **Graph** aus einer Menge von Knoten und Verbindungen dargestellt.

führend	folgend					
	Landungen			Starts		
Landungen	groß	mittel	klein	groß	mittel	klein
groß	96	157	196	75	75	75
mittel	60	69	131	75	75	75
klein	60	69	82	75	75	75
Starts						
groß	60	60	60	90	120	120
mittel	60	60	60	60	60	60
klein	60	60	60	60	60	60

Tab. 1: Größenklassenabhängige Sicherheitsabstände auf der Start-/Landebahn

Die Knoten stellen dabei Kreuzungs- und Kontrollpunkte dar, während die Verbindungen zulässige Fahrwege kennzeichnen. Eine Route lässt sich als Kette von aufeinanderfolgenden Knoten definieren, wobei der erste und der letzte Knoten aus der Menge der Terminal- bzw. Start-/Landebahn-Knoten stammen muss.

Auch bei der Routenplanung müssen **Sicherheitsabstände** eingehalten werden. Da die Gefahr am Boden nicht von Wirbelschleppen, sondern dem Rückstoß der Triebwerke ausgeht, sind die Sicherheitsabstände geringer als auf der Start-/Landebahn. Die Kontrolle darüber erfolgt, indem Knoten nur mit ausreichender Zeitdifferenz durchfahren werden dürfen. Die zulässige Rollgeschwindigkeit liegt in einem Intervall aus minimal technisch möglicher und maximal aus Sicherheitsgründen erlaubter Geschwindigkeit.

Konflikte treten auf dem Rollfeld auf, wenn die Gefahr besteht, dass zwei Flugzeuge kollidieren. Die folgenden drei **Konfliktsituationen** sind zu beachten:

1. Zwei Fahrtrouten kreuzen sich.
2. Ein schnelles Flugzeug fährt hinter einem langsamen.
3. Zwei Flugzeuge nutzen eine Verbindung in entgegengesetzter Richtung.

Bei allen drei Fällen ist die Einhaltung der Sicherheitsabstände jederzeit zu gewährleisten.

Die Planung der Fahrtrouten erfolgt **zeitstetig** für eine vorgegebene Periode. Die Ungenauigkeit bei der Ausführung des optimalen Fahrplans durch menschliche Piloten lässt sich nicht vermeiden und wird bei den Sicherheitsabständen einberechnet. In naher Zukunft ist von der Automatisierung des Bodenverkehrs auszugehen, was die sekundengenaue Einhaltung der Fahrpläne ermöglicht (vgl. *Roling/Visser*, 2008, S. 1).

Für die Bodenroutenplanung stellen die Start-/Landezeiten Daten dar. Dadurch geht das Optimierungspotential eines offenen Entscheidungsfeldes verloren. Die simultane Planung von Flug- und Routenzeiten führt potenziell zu besseren Gesamtergebnissen als die isolierte Planung beider Bereiche.

3. Modell zur simultanen Start-/Lande- und Rollroutenplanung

3.1. Modellierungen der isolierten Planungsbereiche in der Literatur

Die **Grundlage** für die gemischt-ganzzahligen Modellierungen vieler Arbeiten zur Start-/Landeplanung schaffen *Beasley et al.* (2000), indem sie eine statische Landeplanung sowohl für eine, als auch für mehrere Landebahnen durchführen. Aus verschiedenen möglichen Zielsetzungen wählen sie die Minimierung der Abweichung der tatsächlichen von den präferierten Landezeiten aus. Eine Erweiterung des Modells

um Präferenzentscheidungen einzelner Fluggesellschaften ist bei *Soomer/Franx* (2008) zu finden. Die Lösung des umformulierten Modells als Job-Shop-Problem nehmen *Bencheikh et al.* (2009) vor. Die Untersuchung verschiedener Warteschlangenpolitiken vor der Startbahn, basierend auf dem Modell von *Beasley et al.* (2000), liegen im Fokus von *Gupta et al.* (2009). Eine ausführlichere Betrachtung der Vorplanungszeit bieten *Mesgarpour et al.* (2010) als mögliche Verbesserung an. Eine ähnliche Integration nehmen *Murça/Müller* (2015) vor, indem sie die Landeplanung um Lufttrouten ergänzen. Die Erweiterung der Start-/Landeplanung um eine Bodenroutenplanung existiert bisher nicht. Eine Vielzahl von Arbeiten zur Bodenroutenplanung stellen das Rollfeld als Graph aus Knoten und Verbindungen dar und bestimmen die genaue Aufenthaltszeit jedes Flugzeuges an den Knoten, um so Routen zu planen und Konflikte auszuschließen. Ergänzend definieren *Smeltink et al.* (2003) Wartepunkte sowie Dummy-Flugzeuge zur Darstellung komplexer Rollvorgänge. In zeitdiskreten Modellen wählen *Roling/Visser* (2008) sowie *Godbole et al.* (2014) optimale Routen aus gegebenen Alternativen aus. *Tsao et al.* (2009) nutzen vordeterminierte Routen und führen nur die Ablaufplanung von Roll- und Wartevorgängen aus. Im zeitdiskreten Modell von *Codina/Marin* (2010) erfolgt die Darstellung eines Streckenpunktes zu verschiedenen Zeitpunkten durch eine künstliche Knotenschar. In der Arbeit von *Jiang et al.* (2014) stellen sie die gerechte Verteilung von Verspätungen auf Fluggesellschaften sicher. Die **Integration** von variablen Start-/Landezeiten in der Rollroutenplanung nimmt bisher niemand vor.

3.2. Modellierung der simultanen Planung

Zur Planung von optimalen Landezeiten auf einer Landebahn unter Berücksichtigung von Sicherheitsabständen entwickelte *Beasley et al.* (2000) ein gemischt-ganzzahliges Entscheidungsmodell. Es bestimmt für eine Menge von Flugzeugen die Landezeit innerhalb eines vorgegebenen Intervalls, unter der Zielsetzung der Strafkostenminimierung für Abweichungen vom gegebenen Flugplan. Startvorgänge sowie Rollrouten sind nicht im Entscheidungsfeld enthalten. Das von *Jiang et al.* (2014) konstruierte gemischt-ganzzahlige Entscheidungsmodell ermöglicht die Planung von Rollrouten für Start- und Landevorgänge auf mehreren Start-/Landebahnen. Innerhalb einer Planungsperiode wird über Mengen von Flugzeugen, Fluggesellschaften und Verkehrsknoten die optimale Fahrtroute aus zeitstetigen Knotendurchfahrzeiten abgeleitet. Dabei werden Rollfeldkonflikte und Fairnessaspekte berücksichtigt. Der Flugplan fließt als Datum in die Optimierung ein. Eine **Optimierung** von Entscheidungsinhalten setzt die Berücksichtigung aller relevanten Einflussfaktoren voraus. In

der Start-/Lande- und der Rollroutenplanung existiert eine **Interdependenz** zwischen Start-/Landezeiten und Rollroutenzeiten, die eine integrierte Optimierung notwendig macht. Zur simultanen Planung der Problembereiche wurden die oben genannten Entscheidungsmodelle angepasst und zusammengeführt. Für die Indizes des simultanen Start-/Lande- und Routenplanungsproblems sei folgende Notation verwendet:

- F Indexmenge der Flüge ($i, j \in F$)
- F^d Indexmenge der abgehenden Flüge („departure“) ($F^d \subset F$)
- F^a Indexmenge der endenden Flüge („arrival“) ($F^a \subset F$)
- N Indexmenge der Knoten des Rollroutennetzes ($p, q, s \in N$)

Es gelten die folgenden Parameter:

- K_i Prioritätskostenfaktor für den Wert des Fluges i
- L_{pq} Entfernung zwischen Knoten p und q
- $V_i^{min}; V_i^{max}$ minimale/maximale Rollgeschwindigkeit von Flug i
- C_{pq} 1, wenn eine direkte Verbindung zwischen Knoten p und q existiert; sonst 0
- t_{ij}^e Sicherheitszeitabstand bei Rollvorgängen zwischen Flug i und Flug j
- t_{ij}^w Sicherheitszeitabstand auf der Start-/Landebahn zwischen Flug i und Flug j
- T^{Block} Dauer, die ein Flugzeug die Start-/Landebahn blockiert
- T_i^{min} frühestmögliche Start-/Landezeit von Flug i
- T_i^{max} letztmögliche Start-/Landezeit von Flug i
- c_i^1 Kostensatz für jede Zeiteinheit des Rollvorgangs von Flug i
- c_i^2 Strafkosten pro Zeiteinheit, die Flug i vor der Zielzeit T_i endet/abgeht
- c_i^3 Strafkosten pro Zeiteinheit, die Flug i nach der Zielzeit T_i endet/abgeht
- T_i^{Ziel} Zielzeit (bevorzugte Start-/Landezeit) von Flug i
- n_1^i Startknoten der Rollroute von Flug i
- n_k^i Endknoten der Rollroute von Flug i

Es gelten die folgenden Entscheidungsvariablen:

- x_i Start-/Landezeit von Flug i
- α_i Dauer, die Flug i vor der Zielzeit endet/abgeht
- β_i Dauer, die Flug i nach der Zielzeit endet/abgeht
- δ_{ij} 1, wenn Flug i vor Flug j endet/abgeht; sonst 0
- V_i Rollgeschwindigkeit von Flug i
- T_{ip} Zeitpunkt, zu dem Flug i an Knoten p ankommt
- R_{ipq} 1, wenn Flug i von Knoten p zu Knoten q rollt; sonst 0
- B_{ijp} 1, wenn Flug i Knoten p vor Flug j erreicht; sonst 0

Unter Verwendung dieser Notation kann das Problem wie folgt formuliert werden:

$$\min ! ZF: ZF = \sum_{i \in F} K_i [c_i^1 (T_{in_i} - T_{in_i}) + (c_i^2 \cdot \alpha_i + c_i^3 \cdot \beta_i)] \quad (1)$$

Die Zielfunktion ist unter Verwendung der nachfolgenden Restriktionen zu optimieren:

$$T_i^{min} \leq x_i \leq T_i^{max} \quad \forall i \in F \quad (2)$$

$$\delta_{ij} + \delta_{ji} = 1 \quad \forall i, j \in F, i \neq j \quad (3)$$

$$x_i + t_{ij}^w - \delta_{ji} (T_i^{max} + t_{ij}^w - T_j^{min}) \leq x_j \quad \forall i, j \in F, i \neq j \quad (4)$$

$$\alpha_i \geq T_i^{Ziel} - x_i \quad \forall i \in F \quad (5)$$

$$\alpha_i \leq T_i^{Ziel} - T_i^{min} \quad \forall i \in F \quad (6)$$

$$\beta_i \geq x_i - T_i^{Ziel} \quad \forall i \in F \quad (7)$$

$$\beta_i \leq T_i^{max} - T_i^{Ziel} \quad \forall i \in F \quad (8)$$

$$x_i = T_i^{Ziel} - \alpha_i + \beta_i \quad \forall i \in F \quad (9)$$

$$T_{in_i} = x_i + T^{Block} \quad \forall i \in F^a \quad (10)$$

$$T_{in_i} + T^{Block} = x_i \quad \forall i \in F^d \quad (11)$$

$$R_{ipq} \leq C_{pq} \quad \forall i \in F; p, q \in N, p \neq q \quad (12)$$

$$\sum_{p \in N} R_{ips} - \sum_{q \in N} R_{isq} = 0 \quad \forall i \in F; s \in N | s \neq n_k^i, s \neq n_1^i \quad (13)$$

$$\sum_{p \in N} R_{ipn_i} - \sum_{q \in N} R_{in_iq} = 1 \quad \forall i \in F \quad (14)$$

$$\sum_{p \in N} R_{ipn_i} - \sum_{q \in N} R_{in_iq} = -1 \quad \forall i \in F \quad (15)$$

$$(T_{ip} + L_{pq} \cdot V_i - T_{iq}) \cdot R_{ipq} = 0 \quad \forall i \in F; p, q \in N, p \neq q \quad (16)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad \forall i \in F \quad (17)$$

$$B_{ijp} (T_{ip} + t_{ij}^e - T_{jp}) \leq 0 \quad \forall i, j \in F, i \neq j; p \in N \quad (18)$$

$$(1 - B_{ijp}) (T_{ip} - T_{jp}) + B_{ijp} > 0 \quad \forall i, j \in F, i \neq j; p \in N \quad (19)$$

$$B_{ijp} - B_{ijq} \leq 2 - (R_{ipq} + R_{jqp}) \quad \forall i, j \in F, i \neq j; p, q \in N, p \neq q \quad (20)$$

$$B_{ijp} - B_{ijq} \geq -2 + (R_{ipq} + R_{jqp}) \quad \forall i, j \in F, i \neq j; p, q \in N, p \neq q \quad (21)$$

$$B_{ijp} - B_{ijq} \leq 2 - (R_{ipq} + R_{jqp}) \quad \forall i, j \in F, i \neq j; p, q \in N, p \neq q \quad (22)$$

$$B_{ijp} - B_{ijq} \geq -2 + (R_{ipq} + R_{jqp}) \quad \forall i, j \in F, i \neq j; p, q \in N, p \neq q \quad (23)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in F \quad (24)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad \forall i \in F \quad (25)$$

$$\beta_i \geq 0 \quad \forall i \in F \quad (26)$$

$$V_i \geq 0 \quad \forall i \in F \quad (27)$$

$$T_{ip} \geq 0 \quad \forall i \in F; p \in N \quad (28)$$

$$\delta_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in F, i \neq j \quad (29)$$

$$R_{ipq} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in F; p, q \in N, p \neq q \quad (30)$$

$$B_{ijp} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in F, i \neq j; p \in N \quad (31)$$

Die **Zielfunktion** minimiert die Gesamtkosten des Flug- und Routenplans, welche sich einerseits aus Kosten für den Rollvorgang und andererseits aus Strafkosten für Abweichungen vom vorgegebenen Flugplan zusammensetzen, wobei ein Prioritätskostenfaktor jeden Flug individuell bewertet. Restriktion (2) stellt sicher, dass die Start-/Landezeit jedes Fluges im für ihn definierten Intervall liegt. Rest-

riktion (3) legt die Reihenfolge von zwei Start-/Landevorgängen eindeutig fest. Restriktion (4) sorgt für die Einhaltung der Sicherheitsabstände auf der Start-/Landebahn. Der Klammerterm stellt die maximale Differenz zwischen dem Start/der Landung beider Flüge dar für den Fall, dass Flug j vor Flug i endet/abgeht. Die Abweichung der Start-/Landezeit vom Flugplan regeln die fünf Restriktion (5) bis (9). Die erste und zweite (dritte und vierte) Nebenbedingung bilden das verfrühte (verspätete) Enden/Abgehen des Fluges ab. Die neunte Nebenbedingung verknüpft die Variablen der vier vorhergehenden Nebenbedingungen. Die Restriktionen (10) und (11) dienen der **Verknüpfung** von Start-/Landeplanung in Form von Start-/Landezeiten und Rollroutenplanung in Form von Knotenankunftszeiten. Gemäß Restriktion (12) kann ein Rollvorgang nur zwischen verbundenen Knoten stattfinden. Die Kontinuität der Rollrouten gewährleistet Restriktion (13) für Knoten innerhalb einer Route, (14) für Endknoten und (15) für Anfangsknoten. Restriktion (16) schließt Wartezeiten auf der Rollroute aus. Restriktion (17) sichert die Einhaltung des vorgegebenen Intervalls für die Rollgeschwindigkeit. Verschiedene Rollfeldkonflikte werden verhindert, indem Restriktion (18) und (19) Sicherheitsabstände auf dem Rollfeld durchsetzen, Restriktion (20) und (21) Überholen ausschließen und Restriktion (22) und (23) Entgegenkommen unterbinden. Restriktion (24) bis (28) stellen die Nichtnegativität und Restriktion (29) bis (31) die Binarität der betreffenden Variablen sicher.

Das oben stehende Modell enthält mit Restriktion (16), (18) und (19) drei nichtlineare Nebenbedingungen. Durch **Linearisierung** ist eine bessere Rechenbarkeit des Optimierungsansatzes erreichbar. Restriktion (16) wird durch die folgenden zwei Ungleichungen ersetzt:

$$(T_{ip} + L_{pq} \cdot V_i - T_{iq}) - T_i^{\max}(1 - R_{ipq}) \leq 0 \quad \forall i \in F; p, q \in N, p \neq q \quad (32)$$

$$(T_{ip} + L_{pq} \cdot V_i - T_{iq}) + T_i^{\max}(1 - R_{ipq}) \geq 0 \quad \forall i \in F; p, q \in N, p \neq q \quad (33)$$

Durch die Subtraktion bzw. Addition der maximalen Start-/Landezeit sind die Restriktionen für den Fall, dass keine direkte Fahrt zwischen den Knoten stattfindet, erfüllt.

Restriktionen (18) und (19) werden durch die folgenden zwei Ungleichungen ersetzt:

$$(T_{ip} + t_{ij}^e - T_{jp}) - [(T_i^{\max} + t_{ij}^e) \cdot (1 - B_{ijp})] \leq 0 \quad \forall ij \in F, i \neq j; p \in N \quad (34)$$

$$(T_{ip} - T_{jp}) + (T_j^{\max} \cdot B_{ijp}) + B_{ijp} > 0 \quad \forall ij \in F, i \neq j; p \in N \quad (35)$$

Die Summe aus maximaler Start-/Landezeit und Sicherheitsabstand stellt den kleinsten Subtrahend dar, der Restriktion (34) für den Fall, dass Flug i nicht vor Flug j an Knoten p ankommt, erfüllt. Für den Fall, dass Flug i vor Flug j

an Knoten p ankommt stellt die Summe aus maximaler Start-/Landezeit und Binärvariable den kleinsten Summanden dar, der die Ungleichheit von Restriktion (35) ganzzahlig erfüllt.

4. Vorteilhaftigkeit der simultanen Planung

Die optimale Lösung eines Entscheidungsproblems lässt sich nur unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussfaktoren finden. Die **simultane** Optimierung mehrerer interdependenter Problembereiche führt in keinem Fall zu einem schlechteren Ergebnis, als die Summe der optimalen Lösungen von isolierten Problemen der gleichen Entscheidungsfelder. Wenn innerhalb der Optimallösung des integrierten Ansatzes die Entscheidungsvariablen von Teilproblemen suboptimal erscheinen, zeigt sich der Mehrwert der simultanen Planung, die durch Verteilung der Kosten auf alle Teilbereiche insgesamt bessere Lösungen generieren kann.

Das nachfolgende **Beispiel** betrachtet einen Flughafen mit einer Start-/Landebahn und zwölf Verkehrsknoten mit der Anordnung und Entfernung der Knoten zueinander, wie sie in *Abb. 1* dargestellt ist. Für sechs Flugzeuge, von denen je eine Hälfte landet und startet, wird der optimale Flug- und Routenplan ermittelt. Als vorgegebener Referenz-Flugplan sowie als Kostensätze dienen zufällig generierte Daten. Zur Vereinfachung gelten für alle Flugzeuge identische Prioritäten, Geschwindigkeitsintervalle, Bodensicherheitsabstände und Start-/Landebahn-Blockadezeiten. Für die größenabhängigen Start-/Landebahn-Sicherheitsabstände werden die Flugzeuge in Anlehnung an *Balakrishnan* (2010, S. 1652; vgl. *Tab. 1*) in große (Flug 1 & 4), mittlere (Flug 2 & 5) und kleine (Flug 3 & 6) eingeteilt.

Zur Untersuchung der **Vorteilhaftigkeit** der simultanen Planung wird eine Szenarioanalyse durchgeführt. Die Flug- und Routenplanung erfolgt für jedes der insgesamt zehn Szenarien einmal sukzessiv und einmal simultan. In der ersten Variante werden zunächst die optimalen Flugzeiten bei alleiniger Betrachtung der Start-/Landeplanung ermittelt, welche im Anschluss als Daten in die isolierte Rollroutenplanung eingehen. Die minimalen Gesamtkosten aus der simultanen Planung werden in Kosten für die Start-/Lande- sowie die Rollroutenplanung aufgeschlüsselt. Die Summe der optimalen **Ergebnisse** aus beiden isolierten Planungsschritten wird dem optimalen Ergebnis der simultanen Planung gegenüber gestellt (vgl. *Tab. 2*). Die Rechenzeiten sind für beide Verfahren nahezu identisch und liegen auf einem PC mit zwei 3.2 GHz Prozessoren, 48 GB Arbeitsspeicher und dem Solver GAMS CPLEX 23.9.2 unter einer Minute, sodass sie für die Bewertung der Vorteilhaftigkeit der beiden Verfahren vernachlässigt werden können.

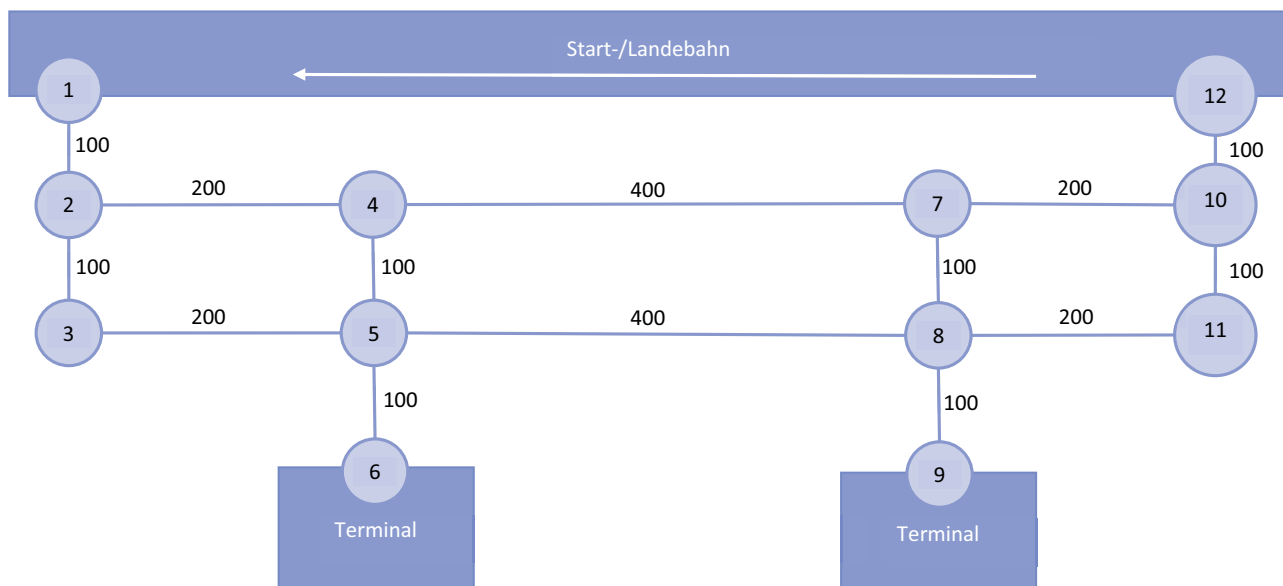


Abb. 1: Graphendarstellung des Flughafenlayout

Szenario	Kosten der isolierten Planung			Kosten der simultane Planung			Differenz der Summen	Verbesserung
	Start-/Landeplanung	Rollroutenplanung	Summe	Start-/Landeplanung	Rollroutenplanung	Summe		
1	2718	121850,250	124568,250	10581,000	111421,375	122002,375	-2565,875	2%
2	8489	134164,000	142653,000	18359,000	112483,000	130842,000	-11811,000	8%
3	2326	121934,625	124260,625	9558,000	111635,250	121193,250	-3067,375	2%
4	6555	124935,000	131490,000	9827,000	116707,000	126534,500	-4955,500	4%
5	5150	142819,667	147969,667	11617,603	131303,618	142921,221	-5048,446	3%
6	6726	151245,500	157971,500	13061,000	136053,375	149114,375	-8857,125	6%
7	4624	113611,250	118235,250	23512,000	88524,250	112036,250	-6199,000	5%
8	9571	82797,250	92368,250	20010,000	63068,500	83078,500	-9289,750	10%
9	4673	116880,000	121553,000	11162,000	103927,437	115089,438	-6463,563	5%
10	8265	109948,875	118213,875	16967,000	93869,937	110836,938	-7376,938	6%

Tab. 2: Szenarienbezogener Kostenvergleich

Die **Auswertung** der Szenarien zeigt, dass durch simultane Planung bessere Ergebnisse erzielt werden, als durch sukzessives Vorgehen. Die Kosten bei isolierter Start-/Landeplanung liegen unter den Teilkosten der Start-/Landeplanung des simultanen Modells, da die Situation auf dem Rollfeld bei ihrer Minimierung nicht berücksichtigt wird. Die Kosten der isolierten Routenplanung liegen über den Teilkosten der Routenplanung des simultanen Modells, da durch die Anpassung an vorgegebene Start-/Landezeiten das Entscheidungsfeld stärker eingeschränkt wird. Beim simultanen Vorgehen kann die Kostensteigerung in der Start-/Landeplanung durch eine Kostensenkung in der Routenplanung überkompensiert werden. Das größte **Verbesserungspotential** findet sich in Szenario 8, wo die si-

multane Planung zu 10 % geringeren Kosten führt als die sukzessive Planung. Das Kostensenkungspotential ist von der Dichte des gegebenen Referenz-Flugplans abhängig, da die Überschneidung der vorgegebenen Start-/Landezeitintervalle zu stärkeren Abweichungen des optimalen vom vorgegebenen Flugplan führt und damit zu höheren minimalen Kosten in der Start-/Landeplanung (vgl. Abb. 2). Hohe Flugplanabweichungen in der isoliert optimalen Lösung führen zu einer größeren Menge an nicht optimalen, aber sehr guten Lösungen, die in der simultanen Planung genutzt wird, um einen Flugplan zu generieren, der zugleich kostenniedrige Rollrouten ermöglicht. Die **Kompensation** der Strafkosten für Abweichungen vom Flugplan mit einer angepassten Rollroutenplanung ist nur bei simultaner

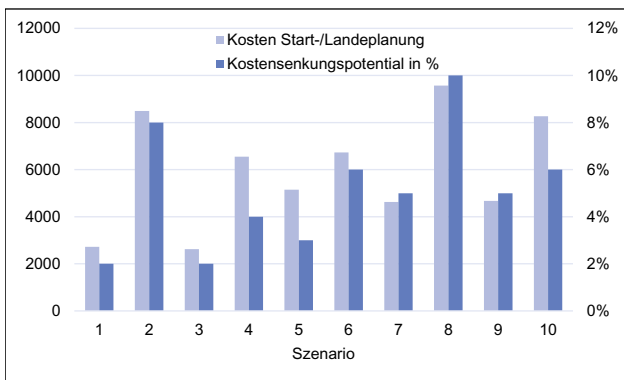


Abb. 2: Kostensenkungspotential in Abhängigkeit von der Start-/Landeplanung

Planung möglich. Das Kostensenkungspotential des simultanen Vorgehens steigt mit der Dichte des in der Datensituation gegebenen Flugplans, was diesem Planungsansatz für Flughäfen mit hohem Flugaufkommen, neben der ohnehin höheren Komplexität der Planungsaufgabe, einen weiteren Grund zur Verwendung gibt.

5. Zusammenfassung

Auf Flughäfen herrscht interdependenter Kalkulationsbedarf für die Start-/Lande- und die Rollroutenplanung von Flugzeugen. Beide Bereiche zeichnen sich durch spezielle **Anforderungen** wie Sicherheitsabstände, Start-/Landezeitintervalle, Kostenunterschiede sowie Weg- und Geschwindigkeitsbeschränkungen aus, was zu einem komplexen Entscheidungsfeld führt. Das allgemein übliche **sukzessive** Verfahren, bei dem zunächst ein Flugplan ermittelt wird, um anschließend mit den Flugzeiten, in Form von Daten, Rollrouten festzulegen, ist ineffizient aufgrund mangelnder Berücksichtigung von Einflussfaktoren. Bei diesem Vorgehen werden die geringen Kosten der isolierten Start-/Landeplanung durch hohe Kosten der isolierten Rollroutenplanung überkompensiert.

Das aufgestellte Modell zur **simultanen** Start-/Lande- und Rollroutenplanung nutzt die vorhandenen Informationen des Entscheidungsfeldes, um überlegene Lösungen zu generieren. Durch die gleichzeitige Berücksichtigung beider Planungsbereiche wird bei der simultanen Planung eine bessere Verteilung der Kosten ermöglicht, die ohne größeren Rechenaufwand eine Kostensenkung realisierbar macht. Das Verbesserungspotential ist abhängig von der Menge an Überschneidungen zwischen Start-/Landezeitintervallen in der Datensituation. Für dichte Flugpläne, bei denen sich Abweichungen aufgrund der einzuhaltenden Sicherheitsabstände nicht vermeiden lassen, bestehen mehr Abstimmungsmöglichkeiten zwischen den Planungsberei-

chen, was der Effizienz des simultanen Verfahrens zugutekommt. Die simultane Planung eignet sich daher besonders für Flughäfen mit hoher **Auslastung** der Start-/Landebahnen.

Literatur

- Balakrishnan, H., Chandran, B., Scheduling Aircraft Landings under Constrained Position Shifting, in: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 21–24 August 2006, Keystone, Colorado.
- Balakrishnan, H., Chandran, B.G., Algorithms for Scheduling Runway Operations Under Constrained Position Shifting, in: Operations Research, Vol. 58 (2010), S. 1650–1665.
- Beasley, J.E., Krishnamoorthy, M., Sharaiha, Y.M., Abramson, D., Scheduling Aircraft Landings – The Static Case, in: Transportation Science, Vol. 34 No. 2 (2000), S. 180–197.
- Bencheikh, G., Boukachour, J., El Hilali Alaoui, A., El Khoukhi, F., Hybrid method for aircraft landing scheduling based on a Job Shop formulation, in: International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 9 No. 8 (2009), S. 78–88.
- Codina, E., Marín, A., A Mathematical Programming Model for the Evaluation and Design of Airport Configurations, in: Optimization Online of the Mathematical Programming Society, 2010.
- Deau, R., Gotteland, J.-B., Durand, N., Runways sequences and ground traffic optimisation, ICRAT 2008, International Conference on Research in Air Transportation, Jun 2008, Fairfax, United States.
- Godbole, P.J., Ranade, A.G., Pant, R.S., Branch & Bound Global-Search Algorithm for Aircraft Ground Movement Optimization, in: 14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), 16–20 Juni 2014, Atlanta, Georgia.
- Gönsch, J., Aircraft Schedule Planning – Grundlagen und aktuelle Entwicklungen. in: WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium, Vol. 39 (2010), S. 230–235.
- Gupta, G., Malik, W., Jung, Y.C., A Mixed Integer Linear Program for Airport Departure Scheduling, in: 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), 21–23 September 2009, Hilton Head, South Carolina.
- Jiang, Y., Xu, X., Zhang, H., Luo, Y., Taxiing Route Scheduling between Taxiway and Runway in Hub Airport, in: Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2015, S. 1–14.
- Mesgarpour, M., Potts, C.N., Bennell, J.A., Models for Aircraft Landing Optimization, in: 4th International Conference on Research in air Transportation (ICRAT 2010), Budapest, Hungary, S. 529–532.
- Murça, M.C.R., Müller, C., Control-based optimization approach for aircraft scheduling in a terminal area with alternative arrival routes, in: Transportation Research Part E, Vol 73 (2015), S. 96–113.
- Roling, P.C., Visser, H.G., Optimal Airport Surface Traffic Planning Using Mixed-Integer Linear Programming, in: International Journal of Aerospace Engineering, Vol. 2008, S. 1–11.
- Smeltink, J.W., Soomer, M.J., de Waal, P.R., van der Mei, R.D., Optimisation of Airport Taxi Planning, in: National Aerospace Laboratory NLR, NLR-TP-2003–475 (2003).
- Soomer, M.J., Franx, G.J., Scheduling aircraft landings using airlines' preferences, in: European Journal of Operational Research, Vol. 190 (2008), S. 277–291.
- Tsao, H.-S.J., Wei, W., Pratama, A., Yang, S., Integrated Taxiing and Take-Off Scheduling for Optimization of Airport Surface Operations, in: 2nd Annual Conference of Indian Subcontinent Decision Science Institute (ISDSI 2009), Mumbai, India, Jan. 2009.