

ENTWICKLUNG VON STEUERUNGSSTRATEGIEN IN DER PRÄ-TAKTISCHEN PLANUNG IN REAKTION AUF KAPAZITÄTSREDUZIERENDE WETTERPHÄNOMENE AM FLUGHAFEN

Prof. K. Nachtigall, Professur Verkehrsströmungslehre, TU Dresden, 01069 Dresden, Deutschland; F. Knabe, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 38108 Braunschweig, Deutschland; F. Hesse, TU Dresden, 01069 Dresden

Zusammenfassung

Der Einfluss von Wetterbedingungen an Flughäfen erfordert oftmals kapazitive Regulierungsmaßnahmen des Flugbetriebes, welche in der Regel einen Tag bis eine Stunde vor Ereigniseintritt getroffen werden. Die Steuerungsmaßnahmen beruhen auf Wettervorhersagen, deren Prognosesicherheit schwanken kann. Folglich können, hinsichtlich angenommener und eingetreffener meteorologischer Bedingungen, Unterschiede zum Ereigniseintritt resultieren. Diese Unterschiede verursachen flugbetriebliche Einschränkungen und hohe Folgekosten.

In der Arbeit werden Steuerungsstrategien entwickelt und untersucht, welche die Unterschiede zwischen erwarteten und eingetrossenen Wetterbedingungen reduzieren sollen. Die Entwicklung der Strategien beruht auf ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten für Wettervorhersagen, die aus einer kooperativen Arbeit innerhalb dieser Thematik resultierten. Die Steuerungsstrategien werden anhand verschiedener Simulationsdurchläufe und –szenarien auf Qualität und Nutzen untersucht. Angenommene Wetterbedingungen basieren auf historischen Wetterdaten des Flughafens München. Zusätzlich wurde eine Variation von eingetrossenen Wetterbedingungen auf Grundlage der historischen Wettervorhersagen des Flughafens München erzielt, die die Auswirkungen der Strategien auf abweichende Wetterbedingungen aufzeigt. Anhand der Unterscheidung von Verspätungen hinsichtlich des Prozesszustandes der untersuchten Flugbewegungen werden die erzielten Ergebnisse gewichtet und ausgewertet. Auf Basis der erzielten Ergebnisse werden Empfehlungen sowie Fehlerpotenziale formuliert. Abschließend zeigt der Ausblick, aufbauend auf den Ergebnissen, weiterführende Untersuchungsmöglichkeiten der Steuerungsstrategien auf.

1. EINLEITUNG

Das Wetter ist der größte Einflussfaktor für Verspätungen im Luftverkehr [1]. Die Wetterbedingungen im alltäglichen Flughafenbetrieb bedingen eine planerische Herausforderung, die bei abweichenden Anpassungen an die Verkehrsstruktur im Flughafennahbereich erhebliche betriebliche Einschränkungen sowie finanzielle Kosten verursachen können. Dabei stehen Wetterauswirkungen im direkten Verhältnis mit der Kapazität an Flugbewegungen pro Zeiteinheit für

den Flughafennahbereich, da erforderliche wetterbedingte Flugbetriebsanpassungen durch den Separationsabstand aufeinanderfolgender Flugbewegungen reguliert werden.

Es ist unumgänglich Verzögerungen im Flugbetrieb und speziell für einzelne Flugbewegungen aufgrund von Wetterverhältnissen in Kauf zu nehmen. Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, mehrere Stunden vor dem jeweiligen Flugbetriebsereignis (prä-taktische Phase), auf Grundlage von Wettervorhersagen, deren Prognosesicherheit Schwankungen aufweist, nur das Notwendigste an

kapazitiven Anpassungen einzuleiten, um unnötige Verzögerungen des Flugbetriebes zu minimieren. Die Notwendigkeit der Vorsteuerung als günstigste Flugbetriebsanpassungsmaßnahme resultiert aus der Differenzierung von Verzögerungsfolgekosten für Flugbewegungen in der Luft sowie Flugbewegungen am Boden. Verzögerungen für LFZ, die sich bereits in der Luft befinden, können doppelt so hohe Kosten verursachen als LFZ, die am Boden verzögert werden [2]. [3]

2. ZIELSTELLUNG

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen mögliche Steuerungsstrategien entwickelt werden, die in Abhängigkeit einer Prognosegüte der Wettervorhersage gezielte Anpassungs-, bzw. Handlungsmaßnahmen einleiten. Das Ziel der Steuerungsstrategien soll es sein auf Vorhersageunsicherheiten zu reagieren und mithilfe eines Anpassungskonzeptes der erwarteten kapazitiven Bedingungen die betrieblichen Auswirkungen zu verbessern. Es existieren bereits Prognoseeintrittswahrscheinlichkeiten, die durch eine vorangestellte wissenschaftliche Arbeit ermittelt wurden. Auf Grundlage einer Eignungsprüfung dieser wissenschaftlichen Arbeit sollen aufbauend auf den Prognosegüteeintrittswahrscheinlichkeiten Steuerungsstrategien für die Umsetzung in der prä-taktischen Phase entwickelt werden. Mithilfe einer Simulation soll der Nutzen der vorgestellten Strategien untersucht werden. Hierfür werden verschiedene meteorologische Szenarien erstellt, die auf historischen Daten des Flughafens München basieren. Unter Berücksichtigung getroffener Annahmen für das Simulationsmodell werden zwei verschiedene Flugpläne angewendet. Die Simulationsergebnisse werden bezüglich der Mehrwertgewinnung der Strategien gegenüber der herkömmlichen Handhabung ausgewertet. Dabei werden verschiedene Gewichtungen für die differenzierte Verspätungsauslegung angenommen und deren Auswirkungen analysiert. [3]

3. BEGRIFFSERKLÄRUNG

EWV	Eintrittswahrscheinlichkeitsverteilung
LFZ	Luftfahrzeug
METAR	Meteorological Aerodrome Report
MUC	Flughafen München
STR+	optimistisch ausgelegte TAF-Anpassungsstrategie
STR-	pessimistisch ausgelegte Anpassungsstrategie
TAF	Terminal Aerodrome Forecast

Vorsteuerung

Anwendung von Verzögerungsmaßnahmen in der prä-taktischen Phase auf am Boden befindliche LFZ am Quellflughafen

Nachsteuerung

Anwendung von Verzögerungsmaßnahmen als Reaktion auf tatsächlich eingetrafene Wetterbedingungen für in der Luft befindliche LFZ im Landeanflug, bzw. im En-Route-Prozess

Zeitpunktabhängige EWV

METAR-Meldungen werden im Abstand von 30 Minuten aktualisiert, sodass für den definierten Aktualitätszeitraum der TAF-Meldung von 6 Stunden 12 TAF/METAR-Paarungen resultieren (Abbildung TAF/METAR-Paarungen). Für jede dieser 12 Paarungen ergibt sich eine aktualitätsabhängige EWV, da die Aussagefähigkeit einer publizierten TAF-Meldung mit fortlaufender Zeit abnimmt

4. METHODIK

Das folgende Kapitel umfasst die Entwicklung der Steuerungsstrategien. Hierbei werden angenommene Grundlagen, auf denen die Strategien aufbauen, aufgezeigt sowie das Funktionsprinzip der Strategien erläutert.

4.1. Prognosegüte von TAF-Meldungen

Grundlage für die Entwicklung der Strategien bilden die ermittelten EWW der Sichtweitebedingungen für Wettervorhersagen aus Rasches Arbeit. Hierbei beschäftigte er sich generell mit der Ermittlung von Prognosegüten für die Wettervorhersagen in Abhängigkeit des Gültigkeitszeitpunktes und des jeweiligen Wetterindikators. Die ermittelten EWW dienen als Zwischenergebnis, um auf deren Grundlage weiterführend mit der Integration von Anpassungsparametern Prognosegüten zu berechnen. Erzielt wurden diese Daten mit Hilfe der Auswertung von TAF/METAR-Paarungen mehrerer Flugsaisons des Flughafens MUC. In Rasches Arbeit wurden hierfür Sichtweiteklassen definiert und denen eingetroffene und erwartete Sichtbedingungen aus den historischen Datensätzen zugeordnet.

Die Methodik der Sichtweiteklassifizierung sowie die Werte der zeitpunktabhängigen EWW wurden übernommen und angepasst, sodass folgende Matrizen resultieren. [4]

Abbildung 1 zeigt auszugsweise für die ersten zwei Stunden einer TAF-Meldung die EWW auf.

ZP1

TAF\METAR	0-799	800-4999	5000-9999
0-799	0,74516565	0,22494929	0,02988506
800-4999	0,02332913	0,38335435	0,59331652
5000-9999	0,0006507	0,01574701	0,98360229

ZP2

TAF\METAR	0-799	800-4999	5000-9999
0-799	0,69994913	0,27127389	0,02877698
800-4999	0,02897618	0,36252415	0,60849968
5000-9999	0,00038815	0,01824298	0,98136887

ZP3

TAF\METAR	0-799	800-4999	5000-9999
0-799	0,70499109	0,25311943	0,04188948
800-4999	0,03054863	0,35660848	0,61284289
5000-9999	0,00077942	0,01948558	0,979735

ZP4

TAF\METAR	0-799	800-4999	5000-9999
0-799	0,63168443	0,31020611	0,05810945
800-4999	0,02830769	0,33046154	0,64123077
5000-9999	0,00078166	0,02045336	0,97876498

Abbildung 1: EWW der TAF-Meldungen [3]

Die Sichtweite wurde in drei Klassen unterteilt: 0-799 Meter, 800-4999 Meter und 5000-9999 Meter. Jeder Sichtweitewerteklasse ist ein Staffelungsabstand für die anfliegenden LFZ zugeordnet, der für die prä-taktische Kapazitätsplanung erforderlich ist. In Abhängigkeit der EWW soll entschieden werden, welche Handlungsmaßnahmen in Form einer Strategie innerhalb der prä-taktischen Phase angenommen werden. Folgender Entscheidungswert wurde als Auswahlinitiator ermittelt: 0,75

Dieser Wert repräsentiert den Mittelwert über alle zeitpunktabhängigen EWW für die jeweils prognostizierte Sichtweitewerteklasse. Ist die EWW für eine vorhergesagte Sichtweitewerteklasse kleiner als 0,75, werden Anpassungsmaßnahmen der TAF vorgenommen. Fällt die EWW größer als, bzw. gleich 0,75 aus, werden die Maßnahmen der TAF-Meldung unverändert für die prä-taktische Flugbetriebsplanung angenommen. Somit gilt:

- $P_x \leq 0,75$: Anwendung der entwickelten Strategie
- $P_x > 0,75$: vollständige Annahme der TAF-Prognose

P_x ...Prognoseeintrittswahrscheinlichkeit

[3]

4.2. Entwicklung der Strategien

Es wurde festgelegt, dass in Abhängigkeit des Strategieauswahlinitiators von der TAF abweichende Handlungsmaßnahmen eingeleitet werden. Im Rahmen der Strategieentwicklung wurden folgende grundlegende zwei TAF-Anpassungsansätze verfolgt:

- STR+

STR+ beinhaltet eine optimistisch ausgelegte Kapazitätsanpassung der TAF-Meldung. Demnach werden die kapazitiven TAF-Bedingungen, sofern es die infrastrukturellen Restriktionen des Flughafens zulassen, konstant angehoben. Folglich werden mehr Flugbewegungen zugelassen, als es die prognostizierten Wetterbedingungen zulassen würden.

- STR-

STR- beinhaltet eine pessimistisch ausgelegte Kapazitätsanpassung der TAF-Meldung. Es werden dabei die kapazitiven TAF-Bedingungen konstant abgesenkt. Demnach werden mehr Flugbewegungen am Quellflughafen verzögert, als es die prognostizierten Wetterbedingungen annehmen würden.

Beide Strategieansätze werden ohne eine methodische Verknüpfung angenommen und weiterführend im Rahmen der Simulationen

angewandt. Für die Erläuterung der umzusetzenden Anpassungsmaßnahmen wird nachstehend Bezug auf den Kapazitätsbegriff genommen, da die Anpassungsmaßnahmen auf Änderungen von Staffelungsabständen der LFZ beruhen (1). [3]

Zusammenhang Kapazität- Staffelungsabstände

Die Kapazität an Flugbewegungen an einem Flughafen ergibt sich als Funktion der Flugbewegungsichte in Abhängigkeit des betrachteten Zeitraums. Demnach ergibt ein vorgegebener Staffelungsabstand zwischen LFZ, der durch vorherrschende Wetterbedingungen bedingt wird, in Bezug auf einen betrachteten Zeitraum die mögliche Kapazität eines Flughafens.

$$(1) \quad \text{Kapazität} = \frac{\text{betrachtete Zeit}}{\text{LFZ-Staffelungswert}}$$

TAF-Anpassungsmaßnahmen der Strategien

Unabhängig der Anpassungsauslegung für STR+ und STR- gelten zwei Anpassungsansätze, die folgend vorgestellt werden. Diese werden genau dann für die jeweilige Anpassungsstrategie angewandt, wenn der Strategieauswahlinitiator die Annahme der TAF-Meldung ablehnt.

Kapazitätsänderungszeitpunkt

Innerhalb einer TAF-Meldung können unterschiedlich prognostizierte Kapazitätswerte gelten. Diese Kapazitätsänderungen werden zeitpunktgenau angenommen. Dadurch ergibt sich das Abweichungspotenzial zur METAR-Bedingung, da erwartete Sichtweitebedingungen später, früher, bzw. nicht eintreten können. Die Anpassung des Kapazitätsänderungszeitpunktes soll dieses Abweichungspotenzial verringern. Hierbei wird die Kapazitätsänderung stufenweise angenommen, d.h. die Hälfte der Differenz zwischen neuen und alten Kapazitätswert wird anfangs berücksichtigt (2). Dieser Wert gilt für einen erweiterten Zeitraum von 30 Minuten (von 15 Minuten vor Kapazitätsänderungszeitpunkt bis 15 Minuten nach

Kapazitätsänderungszeitpunkt). Anschließend wird die erwartete Kapazitätsänderung vollständig angenommen.

$$(2) \text{ Kapazitätsanpassung für Änderungszeitpunkt} = \frac{1800 \text{ sec}}{\left(\frac{(\text{Staffelungswert } XZP+1 - \text{Staffelungswert } XZP)}{2} + \text{Staffelungswert } XZP \right)}$$

ZP ...Zeitpunkt
X ...Staffelungswert in Sekunden

Änderung der Kapazitätsintensität

In Anlehnung an die vorgestellten Strategien STR+ und STR- werden konstant höhere, bzw. geringere Kapazitäten angenommen, als durch die TAF erwartet werden. Diese Änderungen werden mit Hilfe der Staffelungsabstände zwischen anfliegenden LFZ umgesetzt. Für STR- gilt, dass immer 30 Sekunden mehr Staffelungsabstand angenommen wird, als durch die TAF-Meldung prognostiziert. Für STR+ gilt, dass immer 30 Sekunden weniger Staffelungsabstand angenommen wird, als die TAF-Meldung vorgibt. Ausnahme bildet hierbei der Staffelungsabstand von 90 Sekunden zwischen ankommenden LFZ, da dieser dem Kapazitätsmaximum des betrachteten Flughafens entspricht und nicht verringert werden kann. Folgende Darstellung zeigt anhand des Verlaufes der Graphen die Charakteristik der Strategien gegenüber der TAF-Meldung auf (Abbildung 2).

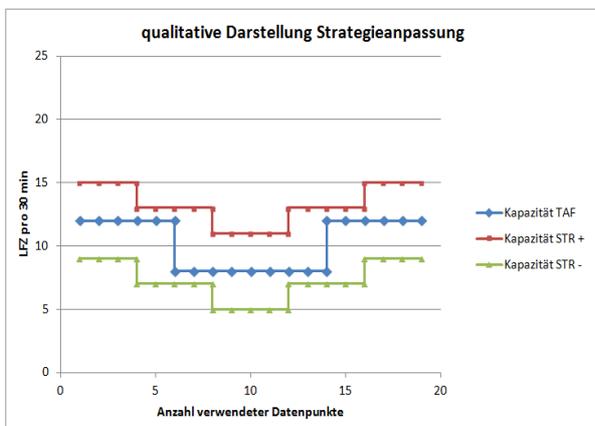


Abbildung 2: qual. Darstellung Strategieanpassung

Der blaue Graph entspricht der TAF-Prognose und zeigt einen temporären Kapazitätseinbruch auf. Dem gegenüber steht der Verlauf von STR+ und STR-, der mit Hilfe der kapazitiven Intensitätsanpassung sowie der Kapazitätsänderungszeitpunktanpassung beschrieben wird.

Für die festgelegten Sichtweitewerteklassen wurden folgende Staffelungsabstände angenommen:

0-799 Meter:	210 Sekunden
800-4999 Meter:	150 Sekunden
5000-9999 Meter:	90 Sekunden

[5, 6]

5. STRATEGIEWIRKSAMKEITSANALYSE ANHAND VON SIMULATION

Die Wirksamkeit der entwickelten Strategien soll innerhalb eines Simulationsmodells getestet werden. Hierfür wurden drei historische Echtwetter szenarien aus der Flugsaison 2010 des Flughafens MUC ausgewählt, die sich im Verlauf der meteorologischen Bedingungen, wie auch im Vergleich zwischen METAR- und TAF-Bedingungen unterscheiden. Folgend werden die Szenarien vorgestellt.

5.1. Simulationsszenarien

Szenario Morgennebel

Das Szenario Morgennebel enthält eine typische Wettercharakteristik des Flughafens MUC. In den

Morgenstunden bildet sich starker Nebel, der oftmals zu einer Erhöhung der Stafflungsabstände auf hier angenommene 210 Sekunden führt. Der Verlauf der historischen TAF-METAR-Paarung über einen Tag ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt (vgl. Abb. 3).

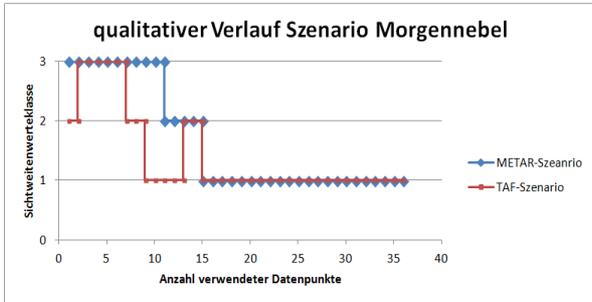


Abbildung 3: qualitativer Verlauf Szenario Morgennebel [3]

Szenario Gutes Wetter

Das Szenario Gutes Wetter berücksichtigt die gerade in den Wintermonaten vermehrt auftretenden guten Sichtbedingungen, welche oftmals kontinuierlich für einen Tag vorherrschend sind. Der Verlauf der historischen TAF-METAR-Paarung ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt (vgl. Abb. 4).

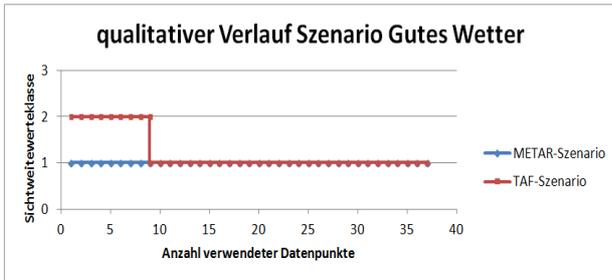


Abbildung 4: qualitativer Verlauf Szenario Gutes Wetter [3]

Szenario Mischwetter

Das Szenario Mischwetter enthält Schwankungen der Wetterbedingungen. Hierbei wird zu viel wie auch zu wenig erwartete Kapazität im Bezug auf die tatsächlichen Wetterbedingungen berücksichtigt. Der Verlauf der historischen TAF-METAR-Paarung ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt (vgl. Abb. 5).

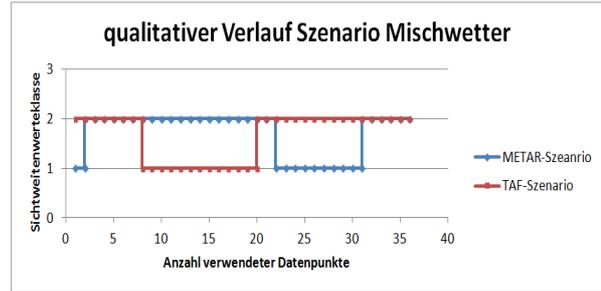


Abbildung 5: qualitativer Verlauf Szenario Mischwetter [3]

5.2. Flugpläne

Für die Szenarien werden zwei Flugpläne angewendet, die sich im Demand-Verlauf ankommender LFZ unterscheiden.

Künstlich erzeugter Flugplan nach MUC

Der künstlich erzeugte Flugplan nach MUC enthält Demand-Senken und –Spitzen, die zum einen den charakteristischen Verlauf von MUC entsprechen und zum anderen dessen Kapazitätsgrenzen nicht überschreiten.

Künstlich erzeugter Flugplan nach LHR

Der künstlich erzeugte Flugplan nach LHR berücksichtigt den Demand ankommender LFZ des Londoner Flughafens. Hierbei ergibt sich eine annähernd durchgängige Maximalauslastung möglicher Kapazitäten. Es ergeben sich dadurch über 100 Flugbewegungen mehr für einen Flugtag. Die Kapazitätsgrenzen wurden für den Flughafen MUC beibehalten. So ist ein Vergleich der beiden Flugpläne mit abweichendem Demand-Verlauf besser darstellbar. Beide Flugpläne sind nachstehend mit Hilfe des Demand-Verlaufes über einen Flugtag dargestellt (vgl. Abb. 6).

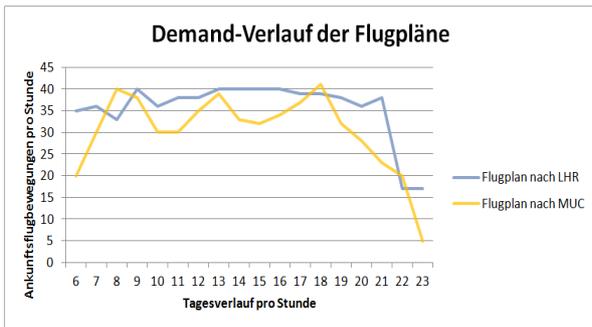


Abbildung 6: Demand-Verlauf der Flugpläne [3]

Gewichtung

Die Simulation der entwickelten Strategien mit dem Fokus der Differenzierung bezüglich Vor- und Nachsteuerung basiert auf der Wertigkeitsunterscheidung von vorgesteuerten sowie nachgesteuerten Delay. Für die Durchführung der Simulation wird ein Kostengewichtungsverhältnis zwischen nachgesteuerten und vorgesteuerten Delay von 2 zu 1 angenommen. Demnach würde die Verzögerung einer Flugbewegung, die sich bereits im En-Route-Prozess, bzw. im Landeanflug befindet, doppelt so hohe Kosten verursachen gegenüber einer Flugbewegung, die eine Verzögerung am Boden des Quellflughafens erfährt.

Darauf aufbauend werden die Szenarien mit den jeweiligen Flugplänen simuliert und Verspätungswerte in Sekunden pro Tag mit Berücksichtigung der Gewichtung für die jeweiligen Strategien verglichen.

5.3. Angenommene Strategien

Neben der Entwicklung von STR+ und STR- werden noch zwei Anwendungsmöglichkeiten für die Flugbetriebsplanung im Rahmen der prä-taktischen Phase angenommen. Zum einen wird die Möglichkeit berücksichtigt keine vorsteuernden Maßnahmen einzuleiten und somit ausschließlich nachsteuernde Handlungen anzuwenden. Zum anderen wird unabhängig des Strategieauswahlinitiators die Möglichkeit mit

betrachtet, dass die Bedingungen der TAF-Meldung vollständig angenommen werden. Dadurch ergibt sich ein Vergleich zwischen den bisherigen Handlungsmöglichkeiten gegenüber den entwickelten Strategien. Somit werden vier Strategien für die Simulationsanwendung betrachtet:

- STR+
- STR-
- TAF vollständig annehmen
- keine Vorsteuerung berücksichtigen (auf METAR-Meldung reagieren)

5.4. Variation der METAR-Meldung

Ein Schwerpunkt im Rahmen der Strategieauswirkungsuntersuchung stellt die Variation der historischen METAR-Daten dar. Das heißt, dass für die gegebenen historischen TAF-METAR-Paarungen der vorgestellten Szenarien abweichende METAR-Bedingungen erzeugt werden. Daraufhin wird untersucht, wie die Auswirkungen der Strategien auf diese Streuung ausfallen. Die METAR-Variationserzeugung basiert auf den EWV für die zeitpunktabhängigen TAF-Prognosen. Auf Grundlage jeder TAF-Prognose pro Szenario für jeden Zeitpunkt werden 100 Zufallszahlen erzeugt, die in Abhängigkeit des Wertes und der EW der Sichtweitewerteklassen jeweils einer Werteklasse zugeordnet werden. Folglich ergeben sich 100 neue METAR-Bedingungen, die auf der TAF-Prognose basieren. Neben der Simulation des historischen Szenarios werden zudem 100 Simulationen mit abweichenden METAR-Bedingungen durchgeführt. Die Vorsteuerungsbedingungen durch die TAF-Meldung und die darauf aufbauenden Strategien STR+ und STR- bleiben unverändert.

5.5. Simulationsablauf

Die Simulationsdurchführung enthält zwei Schwerpunkte. Anfangs werden die jeweiligen Bedingungen der anzuwendenden Strategien mit

Hilfe zeitpunktabhängiger Staffelungsabstände der LFZ für den jeweiligen Flugplan simuliert. Das Ergebnis enthält die Anpassung der Flugbewegungszeitpunkte an die Staffelungsvorgaben und somit entstehende Verzögerungen in Sekunden.

In einem weiteren Schritt werden für die Strategien STR+, STR- und „TAF vollständig annehmen“ die angepassten Anflugzeiten durch die Vorsteuerung als neuer Flugplan angenommen. Der neue vorgesteuerte Flugplan erfährt zusätzlich eine Simulationsdurchführung mit den Bedingungen der historischen METAR-Meldung, bzw. der METAR-Variationswerte. Die dadurch resultierenden Verzögerungen stellen die erforderlichen Nachsteuerungsmaßnahmen trotz Vorsteuerung dar. Mit Berücksichtigung der Gewichtung werden pro Strategie (abgesehen von „keine Vorsteuerung berücksichtigen“) die vorgesteuerten und nachgesteuerten Verzögerungen pro Tag in Sekunden summiert und können nachstehend verglichen werden.

6. AUSWERTUNG

Die Simulationsergebnisse wurden im Rahmen der jeweiligen Szenarien gegenübergestellt. Dabei wurde der Schwerpunkt darauf gelegt, die Nachsteuerungsstrategie (keine Vorsteuerung berücksichtigen) jeweils mit den Vorsteuerungsstrategien zu vergleichen. Folgende Abbildung zeigt beispielhaft für Szenario Morgennebel die Auswertungsdarstellung (vgl. Abb. 7).

Morgennebel künstlich erzeugter Flugplan

METAR-Variation 100 Tage		Ø Vorsteuerung	
ØMETAR VAR			
2553633,58	<	1874725,48	TAF-Vorsteuerung lohnt sich
2553633,58	<	1815137,12	STR+-Vorsteuerung lohnt sich
2553633,58	>	2789740,34	STR--Vorsteuerung lohnt sich nicht

Übersicht Ergebnisaufteilung zwischen Vor- und Nachsteuerungsstrategie 100 Tage

	METAR	
TAF/METAR	82	18
STR+/METAR	94	6
STR-/METAR	41	59

Morgennebel Flugplan nach LHR

METAR-Variation 100 Tage		Ø Vorsteuerung	
ØMETAR VAR			
5716451,123	>	3847931,5	TAF-Vorsteuerung lohnt sich
5716451,123	>	3605138,88	STR+-Vorsteuerung lohnt sich
5716451,123	>	4811663,62	STR--Vorsteuerung lohnt sich

Übersicht Ergebnisaufteilung zwischen Vor- und Nachsteuerungsstrategie 100 Tage

	METAR	
TAF/METAR	97	3
STR+/METAR	100	0
STR-/METAR	82	18

Abbildung 7: Ergebnisdarstellung Morgennebel [3]

Es erfolgt hierbei ausschließlich ein Ergebnisvergleich für die erzeugte METAR-Variation und die historische TAF-Prognose. Auf der linken Seite ist das gewichtete Ergebnis der Nachsteuerungsstrategie dargestellt. Rechts davon befinden sich die Vorsteuerungsstrategie-Ergebnisse, welche die gewichteten nach- sowie vorgesteuerten Delay-Werte enthalten. Die aufgezeigten Werte stellen jeweils den gemittelten Wert über 100 Simulationsdurchläufe dar. Darunter befindet sich eine Ergebnisauswertung bezüglich der Anzahl an Simulationsdurchläufen für den Vergleich der Nachsteuerungsstrategie mit den Vorsteuerungsstrategien. Bei 100 simulierten Tagen ist erkennbar, wie viele Durchläufe für die jeweiligen Strategien das günstigste Ergebnis geliefert haben.

Abbildung 8 zeigt im Überblick für jedes Szenario den Vergleich der Vor- und Nachsteuerungsstrategien auf. Es ist erkennbar, dass im Vergleich zur Nachsteuerungsstrategie, wie auch im Vergleich der Vorsteuerungsstrategien, STR+ die günstigsten Ergebnisse erzielt (vgl. Abb. 8).

*mit zweifacher Gewichtung für nachgesteuertes Delay in Sekunden

*mit zweifacher Gewichtung für nachgesteuertes Delay

ø METAR-Variation		Strategie				Legende	
Flugolan	Szenario	METAR	TAF	STR+	STR-	Rang	Farbe
nach MUC	Gutes Wetter	757411	822847	637383	1976935	1	Grün
	Morgennebel	2553634	1874725	1815137	2789740	2	Gelb
	Mischwetter	1742985	1819500	1466619	6702183	3	Orange
nach LHR	Gutes Wetter	2141460	2301879	1828610	3210699	4	Rot
	Morgennebel	5716451	3847931	3605139	4811664		
	Mischwetter	4631960	4406088	3476748	12331703		

Abbildung 8: Auswertung aller Ergebnisse [3]

7. FAZIT

Die entwickelten Strategien erzielten im Rahmen der Simulationsdurchläufe eindeutige qualitative Ergebniswerte, die im Vergleich zu bisher möglichen Handlungsmaßnahmen in der prä-taktischen Phase eine Mehrwerteinschätzung zuließen. Demnach erwies sich STR- als wenig profitable Strategieanwendung. Dem gegenüber erwies sich STR+ als eindeutig profitable Strategieanwendung im Vergleich zu allen anderen Handlungsmöglichkeiten. Auf Grundlage der einheitlichen Überlegenheit der Strategie STR+ gegenüber den anderen betrachteten Strategien ist es zu empfehlen deren Mehrwert wissenschaftlich weiterführend zu untersuchen. Getroffene Annahmen zur Vereinfachung des Simulationsmodells sowie der Strategieentwicklung können mögliche Fehlerpotenziale enthalten, deren Einfluss auf die Strategieempfehlung methodisch exakt ausgeschlossen werden muss. Es wäre zu klären, ob für eine praxisorientierte Anwendung für den jeweiligen Flughafenstandort im Vorhinein auf Grundlage der Auswertung historischer TAF-METAR-Paarungen eine spezifische EWW erstellt werden muss. Anderenfalls ist es erforderlich jeglichen spezifischen Wettereinfluss, der in Abhängigkeit der geografischen Lage existiert, herauszufiltern.

Literaturverzeichnis

- [1] U. o. W. L. Department of Transport Studies, „European airline delay cost reference values-Final Report,“ Performance Review Unit, Performance Review Unit, London, 2011.
- [2] N. Mohleji, „Decision Modeling Framework to Minimize Arrival Delays from Ground Delay Programs,“ ProQuest LLC, Virginia, USA, 2015.
- [3] F. Hesse, „ENTWICKLUNG VON STEUERUNGSSTRATEGIEN IN DER PRÄ-TAKTISCHEN PLANUNG IN REAKTION AUF KAPAZITÄTSREDUZIERENDE WETTERPHÄNOMENE AM FLUGHAFEN,“ eingereichte Diplomarbeit, TU Dresden, 2016.
- [4] T. Rasche, „VORHERSAGE VON METAR-MELDUNGEN AUF BASIS VON TAF-MELDUNGEN UND HISTORISCHEN WETTERDATEN,“ Studien-Arbeit, TU Dresden, 2016.
- [5] G. D. Clerq, „Maximizing Capacity in Low Visibility Operations,“ ICAO, Paris, 2009.
- [6] ICAO, „EUROPEAN GUIDANCE MATERIAL ON AERODROME OPERATIONS UNDER LIMITED VISIBILITY CONDITIONS,“ ICAO, 2008.