

BESTIMMUNG EINER PROGNOSEGÜTE FÜR TAF-MELDUNGEN

A. Pick, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Flugführung,
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland
T. Rasche, TU Dresden, Deutschland

Zusammenfassung

Das Wetter ist der wohl größte Unsicherheitsfaktor, durch den an Verkehrsflughäfen Verspätungen auftreten können. So bedeutet eine geringe Sichtweite höhere Staffelungsabstände gegenüber hohen Sichtweiten, Schnee und Eis sorgen für Verzögerungen durch entsprechende Anti- und De-Icing-Maßnahmen der Flugzeuge, aber auch der Pisten. Um diese Unsicherheiten im Rahmen einer prätaktischen Planung quantifizieren zu können, wurde eine Metrik für die Ermittlung der Prognosegüte einer Wettervorhersage in Form einer TAF (Terminal Aerodrome Forecast) ermittelt. Dabei werden die TAF-Meldungen, die für einen Zeitraum von 6 Stunden gelten, mit den tatsächlich eingetroffenen METAR-Meldungen verglichen. Für mehrere Wetterklassen wurden spezielle Modelle zur Bestimmung der Prognosegüte ermittelt und am Beispiel der Sichtweite ausführlich erläutert.

1. EINLEITUNG/MOTIVATION

„Steig aus, du musst dir erstmal etwas anderes anziehen!“ – „Was denn, jetzt!? Es gießt in Strömen, Doc!“ – „Warte noch fünf Sekunden.“ – 5...4...3...2...1...es hört auf zu regnen (Zurück in die Zukunft 2). Eine sekundengenaue Prognose über das Wetter zu treffen, ist und bleibt vorerst Zukunftsmusik. Aber auch langfristige Prognosen darüber wie viel Wind in 4 Stunden weht, ob in 2 Stunden ein Gewitter stattfindet oder wie hoch die Sichtweite in 5 Stunden sein wird, sind auch heute noch nicht hinreichend genau möglich. Aber genau diese Zeiträume spielen im heutigen Luftverkehr eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, frühzeitig die an einem Flughafen vorhandene wetterabhängige praktische Kapazität [1] für die startenden und landenden Mengen an Flugzeugen zu verplanen. Ändert sich zum Beispiel die Sichtweite, sind die Staffeln zwischen den an- und abfliegenden Flugzeugen anzupassen. Ist ein Flughafen ausgelastet, führt eine Einschränkung der praktischen Kapazität unweigerlich zu Verspätungen. Um die Verkehrslast zu solchen Zeiten zu verringern bzw. zu steuern, können in den unterschiedlichen Planungsebenen (strategisch, prätaktisch, taktisch) im Air Traffic Flow Management (ATFM) [2] unterschiedliche Maßnahmen vorgesehen werden. Es wäre also nur von Vorteil, möglichst genaue Prognosen über das Wetter zu haben beziehungsweise zu wissen, wie verlässlich die heutigen Prognosen sind. Im Folgenden wird eine Methodik vorgestellt, wie prognostiziertes Wetter und tatsächlich eingetretenes Wetter verglichen werden, um eine Prognosegüte für flughafenbezogene Wettervorhersagen zu bestimmen.

2. GRUNDLAGEN

2.1. Wettermeldungen

Als Basis für Wetterprognosen und Wettermeldungen werden die für die Luftfahrt regelmäßig veröffentlichten TAF und METAR Meldungen verwendet. Die Terminal Aerodrome Forecast (TAF) sowie der Meteorological Aerodrome Report (METAR) beinhalten neben dem Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung und dem ICAO-Code des Flughafens, auf den sie sich beziehen, teils unterschiedliche Informationen über die unterschiedlichen Wetter-

eigenschaften [3]. Die TAF wird in Deutschland um 5 Uhr UTC (Coordinated Universal Time) und dann alle 6 Stunden herausgegeben, ihre Gültigkeit beginnt 1 Stunde nach Herausgabe und hat eine Gültigkeit von 30 Stunden. Ein Beispiel für eine TAF wie folgt aus:

```
TAF EDDF 010500Z 0106/0212 02008KT 9999 -DZ  
BKN015
```

In TAB 1 sind die einzelnen Elemente der Meldung dekodiert dargestellt.

Code	Enthaltene Information	Enthaltener Wert
TAF	Typ der Meldung	Terminal Aerodrome Forecast
EDDF	ICAO-Flughafencode	Frankfurt/Main
010500Z	Zeitpunkt der Herausgabe	1. des Monats, 5 Uhr UTC
0106/0212	Gültigkeitszeitraum	vom 1. des Monats, 6 Uhr UTC bis zum 2. des Monats, 12 Uhr UTC
02008KT	Windrichtung/-geschwindigkeit	20° bei 8 Knoten
9999	Sichtweite	9999m = unbegrenzt
-DZ	Niederschlag	leichter Sprühregen
BKN015	Wolken	durchbrochen bei 1500 ft

TAB 1. TAF-Meldung entschlüsselt

TAF-Meldungen können auch Trends (BECMG und TEMPO, siehe auch [3]) beinhalten, deren jeweils gültigen Werte zum Vergleich herangezogen werden. Wahrscheinlichkeitsbehaftete Trends (PROB30 und PROB40) wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die METAR beinhaltet beispielsweise zusätzlich Angaben über Atmosphärendruck, Temperatur und Taupunkt. Sie wird in Deutschland zu den Minuten 20 und 50 jeder Stunde herausgegeben. Somit kann man jede TAF mit 12 METARs vergleichen.

2.2. Wetterklassen

In beiden zuvor aufgeführten Meldungen sind Wetter-

klassen vorhanden, die im folgenden Modell berücksichtigt werden sollen: Sichtweite, Windstärke, Niederschlag, Gewitterwolken.

Die Sichtweite ist in der TAF als Sichtweite und in der METAR als Runway Visual Range (RVR) angegeben [3]. Beides kann man miteinander vergleichen bzw. auch ineinander überführen (siehe hierzu [4]).

Der Wind besteht aus den beiden Komponenten Windrichtung und Windstärke. Zusätzlich kann noch eine Angabe über die Windgeschwindigkeit in Böen vorhanden sein.

Niederschlag wird im Gegensatz zu den beiden ersten Wetterklassen nicht numerisch sondern als Buchstaben-codes angegeben [3].

Gewitterwolken bzw. das Gewitter können zu einer direkten Einschränkung des Flugplatzbetriebes, zum Beispiel durch Einstellung des Betankens und anderer Vorfeldtätigkeiten führen. Dies ist in der Flughafenbenutzungsordnung (FBO) eines Flugplatzes geregelt. Aufgrund dieser Relevanz werden Meldungen mit Gewitterwolken (Towering Cumulus, Cumulusnimbus) betrachtet.

2.3. Datengrundlage

METAR und TAF Meldungen sind im Internet frei zugänglich. Für die Untersuchungen wurden aus dem Zeitraum 1. Januar 2009 bis 31. Dezember 2015 insgesamt ca. 9500 TAF und fast 123000 METAR Meldungen für den Flughafen München „Franz Josef Strauß“ (ICAO-Code: EDDM) verwendet. Hierbei wurden TAFs, die durch eine Korrektur nachträglich aktualisiert worden, nicht berücksichtigt. Auch wurden nur Meldungen berücksichtigt, bei denen zu einer TAF alle METAR vorhanden und korrekt waren.

3. MODELL

3.1. Ziel

Ziel des Modells soll es sein, durch einen paarweisen Vergleich von einem vorhergesagten Wert und seinem tatsächlich eingetretenen Wert eine Prognosegüte zu erhalten. Diese soll auch eine Aussage darüber ermöglichen, wie groß der Einfluss des Vorhersagehorizontes, die betrachtete Wetterklasse und auch die Gruppierung der Prognosen nach unterschiedlichen Zeiträumen (z.B. „vormittags“, „im Winter“) ist. Abschließend soll eine Gesamtgüte der Wetterprognose möglich sein. Frühere Arbeiten von Mahringer [5] und Damraht [6] haben nur Teile der Aussagen liefern können, da sie sich nur auf einzelne Wetterklassen begrenzt haben.

3.2. Vorüberlegungen

Als erstes stellt sich die Frage, ab wann ein vorhergesagter Wert als eingetroffen bezeichnet werden kann. Dies gestaltet sich schwierig, da neben numerischen Werten (z.B. Sichtweite) auch in Codes verschlüsselte Werte (z.B. Niederschlag) vorliegen. Betrachtet man eine Abweichung von Vorhersage und eingetroffenem Wert aus operationeller Sicht, zeigt sich, dass auch hier die Betrachtung einfacher Differenzen nicht ausreichend ist. Hierzu zeigt TAB 2 drei beispielhafte TAF-METAR-Paare für die Sichtweite, deren Differenz identisch aber deren operationelle Auswirkung grundverschieden ist. Die Differenzen sollten also auch bewertet werden.

Sichtweite TAF	100 m	3100 m	8000 m
Sichtweite METAR	1100 m	2100 m	9000 m
Differenz	1000 m	1000 m	1000 m

TAB 2. Verschiedene TAF-METAR-Paare und ihre Differenz

3.3. Definition von Werteklassen

Wie das Beispiel Sichtweite zeigt, erscheint es vorteilhaft, den Wertebereich in Klassen einzuteilen, um dann Abweichungen in der getroffenen Werteklasse weiter zu benutzen. Je singulärer Wetterklasse werden n Werteklassen definiert. Jede Wettermeldung kann bzgl. einer Wetterklasse und deren Wert eindeutig einer Werteklasse zugeordnet werden. Eine Werteklasse kann durch einen numerischen Wertebereich oder eine Menge von Codes definiert sein. Weiterhin gehört zu jeder Werteklasse eine Bewertung β . Diese Bewertung stellt den Repräsentanten der Werteklasse dar, der zum Beispiel der Mittelwert der Werteklasse oder auch ein sonstiger numerischer Wert sein kann. Die Werteklassen sind für TAF- und METAR-Meldungen identisch.

3.4. Kontingenztabelle und Eintrittswahrscheinlichkeiten

Da Wetterklassenpaare von METAR- und TAF-Meldungen betrachtet werden, kann man nun eine Häufigkeitstabelle H , auch Kontingenztabelle genannt, je Wetterklasse erstellen. Der Zähler H_{ij} erhöht sich, wenn eine TAF die Werteklasse i und eine zugehörige METAR die Werteklasse j trifft. Die absoluten Häufigkeiten lassen sich mittels der Formel

$$(1) \quad h_{ij} = \frac{H_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_{ij}}$$

in eine Kontingenztabelle der relativen Häufigkeiten h_{ij} überführen.

Zusätzlich lässt sich eine Tabelle der Eintrittswahrscheinlichkeiten einer TAF bezüglich der betrachteten Wetterklasse bestimmen. Hierzu werden die relativen Häufigkeiten in einer Zeile der Kontingenztabelle, also je TAF-Werteklasse, ermittelt.

3.5. Erstellen einer Bewertungsmatrix

Nun wird das Treffen einer Werteklassenkombination in der Kontingenztabelle durch eine Maßzahl q_{ij} bewertet, deren Wertebereich wiederum zwischen 0 und 1 liegt. In diese Maßzahl sollen zwei Faktoren eingehen. Zum einen der Wert σ , der ausdrückt, ob ein konservativ vorhergesagter Wert besser ist ($\sigma > 0,5$) als ein zu optimistischer - es erfolgt noch keine Wertung, ob das schlechter oder besser im Sinne einer Verwertbarkeit für zum Beispiel eine Planung ist - und zum anderen der Wert τ , der die Relevanz der Werteklassenbreite für die Bewertung angibt. τ ist 0, wenn die Breite einer Werteklasse ignoriert wird und 1, wenn sie vollständig einbezogen wird. Somit kann das Treffen einer schmalen Klasse durch eine Vorhersage höher bewertet werden als das Treffen einer breiten Klasse.

Beide Faktoren werden nun in Bezug zu der Bedeutung der entsprechenden Wetterklasse im Kontext Luftfahrt gesetzt. Dies ist notwendig, um einen höheren vorhergesagten als eingetretenen Wert für die Sichtweite ($\sigma < 0,5$) abzugrenzen von einem ebenso optimistisch vorhergesagten größeren Wert für z.B. die Stärke des Niederschlags. Für σ ergibt sich folgende Korrektur

$$(2) \quad \sigma'_{ij} = \begin{cases} \sigma, & \text{für } m_j \text{ "besser als" } t_i \\ 1, & \text{für } m_j = t_i \\ 1-\sigma, & \text{für } m_j \text{ "schlechter als" } t_i \end{cases}$$

wobei m_j die Bewertung der Wertklasse der METAR-Meldung und t_i die Bewertung der TAF-Meldung ist. Für m_j und t_i gilt außerdem

$$t_i, m_j \in \vec{\beta}$$

mit $\vec{\beta}$ als Vektor aller Bewertungen der Wertklasse.

Sofern die Klassenbreite eine Relevanz für die Bewertung hat ($\tau > 0$), soll auch die tatsächliche Abweichung von Vorhersage und eingetretenen Wert berücksichtigt werden können. Dafür wird die Differenz zwischen den Bewertungen der TAF und der METAR ins Verhältnis zur größtmöglichen Bewertung gesetzt. Dadurch besteht die Möglichkeit, besonders große Abweichungen in der Bewertung geringer zu bewerten als nur geringe Differenzen. Hierfür ist folgende Formel anzuwenden.

$$(3) \quad \tau'_{ij} = 1 - \frac{|m_j - t_i|}{\max(\vec{\beta})} * \tau$$

Die Gesamtbewertung q_{ij} ergibt sich nun mit σ'_{ij} und τ'_{ij} aus den obigen Formeln wie folgt

$$(4) \quad q_{ij} = \sigma'_{ij} * \tau'_{ij}$$

3.6. Korrigierte Kontingenztabelle

Das Ziel einer Prognosegüte ließe sich nun durch Ermittlung des Summenproduktes der Bewertungsmatrix mit der Kontingenztabelle erreichen. Allerdings zeigte sich im Laufe der Erstellung und Tests des Modells, dass größere Werte in der Kontingenztabelle zu dominant sind. Kleine Häufigkeiten und eventuelle Streuungen der Häufigkeiten haben ggf. nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Für die Gesamtprognosegüte sind besonders kleine Häufigkeiten mit einem hohen Bewertungswert hiervon negativ betroffen. Dementsprechend wurde eine Korrektur eingeführt. Die korrigierte Häufigkeit H'_{ij} ergibt sich aus

$$(5) \quad H'_{ij} = h_{ij} * (1 - h_{ij}) = h_{ij} - h_{ij}^2$$

Und nach der Formel

$$(6) \quad h'_{ij} = \frac{H'_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H'_{ij}}$$

wird eine korrigierte relative Häufigkeit h'_{ij} erstellt und für die folgende Ermittlung der Prognosegüte verwendet.

3.7. Berücksichtigung des Vorhersagehorizonts

Zwischen der Bekanntgabe des prognostizierten und dem entsprechend eingetretenen Wert liegen bestimmte Zeitspannen. Eine erste METAR liegt 20 Minuten nach dem Beginn der Gültigkeit der TAF vor. Dann kommt jede weitere halbe Stunde eine neue METAR hinzu. Dementsprechend kann für ein TAF-METAR-Paar immer ein Vorhersagehorizont angegeben werden. Um nun eine Prognosegüte zu ermitteln, die zum Beispiel eine Aussage darüber treffen soll, wie gut eine 1-Stunden-Vorhersage ist, müssen alle TAF und ihre entsprechenden METAR, die eine Stunde nach dem Beginn des TAF-

Gültigkeitszeitraums herauskamen, betrachtet und in eine Kontingenztabelle eingetragen werden. Damit spielt der absolute Zeitpunkt der Herausgabe der Wettermeldung im Weiteren keine Rolle, sondern nur der relative Abstand zwischen Vorhersagezeitpunkt und tatsächlicher Messung.

3.8. Ermittlung der Prognosegüte

Als Prognosegüte bezeichnet [7] „das Ausmaß der Übereinstimmung zwischen prognostizierten und realisierten Werten“. Diese kann durch eine Vielzahl von statistischen Verfahren bestimmt werden. Für die Bildung einer Prognosegüte durch den Vergleich von METAR- und TAF-Meldungen wurden hier eigene (Vor-)Berechnungen erstellt (siehe oben) und Anforderungen im Folgenden definiert [8]:

- Der Begriff Prognosegüte beschreibt das Maß des Zutreffens einer TAF-Meldung, indem TAF-Meldungen mit METAR-Meldungen verglichen werden.
- Der Wertebereich des Zutreffens einer Prognose ist definiert als 0 bis 1.
- Je besser die Prognosen, die durch eine TAF getätigt wurden, desto höher die Prognosegüte. Ein Wert von 1 beschreibt eine vollständig korrekt vorhergesagte Wettersituation, ein Wert von 0 hingegen eine vollständig inkorrekt vorhergesagte Wettersituation.
- Eine Prognosegüte gilt für:
 - einen beliebigen Flughafen,
 - eine der definierten Wetterklassen oder kombiniert für mehrere Wetterklassen,
 - einen der 12 Zeitpunkte im Gültigkeitshorizont einer TAF sowie
 - einen beliebigen Zeitraum, der sich bspw. auch auf Jahreszeiten oder Tageszeiten beschränken kann, um detailliertere Aussagen treffen zu können.
- Eine Prognosegüte berechnet sich:
 - aus den TAF- und METAR-Meldungen, die in einem beliebigen Zeitraum an einem beliebigen Flughafen herausgegeben wurden
 - für jeden Zeitpunkt nach Gültigkeitsbeginn aus allen METAR-Meldungen, die zu diesem Zeitpunkt relativ zur TAF gültig sind.

Die Prognosegüte P mit einem Bezug zur Nutzbarkeit der Prognose ermittelt sich aus dem Summenprodukt der Bewertungsmatrix und der korrigierten relativen Kontingenztabelle:

$$(7) \quad P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (q_{ij} * h'_{ij})$$

Um nun eine Prognosegüte für unterschiedliche Zeiträume zu ermitteln, werden nur die TAFs und deren zugehörige METARs verwendet, deren Gültigkeitszeitraum ganz oder teilweise im betreffenden Intervall liegen. Für eine Prognosegüte, die zum Beispiel den Morgen an einem deutschen Flugplatz betrachtet, müssten dementsprechend alle TAF, die um 5 Uhr UTC herausgegeben wurden und die von 6 Uhr bis 12 Uhr (UTC) ihre Gültigkeit besitzen, verwendet werden.

Bisher wurden alle Tabellen als eigenständige und je Wetterklasse vorhanden betrachtet. Zur Bestimmung einer Gesamtprognosegüte können die daraus resultierenden einzelnen Prognosegütwerte als gewichtete Summe zusammengefasst werden. Die Gewichtungen können

sich je Flugplatz unterscheiden, worauf hier aber nicht weiter eingegangen wird.

3.9. Modellparametrisierung

Als wichtigste Parameter des Modells sind hier die Wetterklassen, deren Werteklassen sowie Bewertung aufgeführt. Die Parameter σ und τ sind beide im Laufe der Ausarbeitung auf 0,8 festgesetzt worden, wodurch konservative Schätzungen höher bewertet werden und eine starke Einbeziehung der Klassenbreite erfolgt. Die Gewichtung, um über alle betrachteten Wetterklassen eine gewichtete Summe der Prognosegüte zu bilden, ist gleichmäßig und wird hier nicht weiter diskutiert. Im Folgenden werden beispielhaft verschiedene Wetterklassen vorgestellt und deren Parameter für das Modell diskutiert sowie deren Bewertungsmatrizen aufgestellt.

3.9.1. Sichtweite

In Wettermeldungen wird die Sichtweite s in Metern angegeben. Ein Wert von 9999 m bedeutet dabei unbegrenzte Sichtweite. In der TAF-Meldung ist die meteorologische Sichtweite, in der METAR die Runway Visual Range (RVR) angegeben. Beide Werte sind vergleichbar und können ggf. nach Tabelle 1 in [4] ineinander umgerechnet werden. Darauf wird an dieser Stelle verzichtet. Um nun eine Einteilung in Werteklassen vorzunehmen, wurden für die ersten 3 Werteklassen die Grenzen der Landekategorien für Präzisionsanflüge aus [9] verwendet. Weiterhin werden Grenzen für die Granularität der Sichtweitenangabe nach [3] genutzt, um Werteklassen bei großen Werten zu erhalten. Als Bewertung β wird jeweils die einheitslose Klassenmitte verwendet. Aus diesen Überlegungen ergeben sich die folgenden Tabellen mit den Werteklassen und die Bewertungsmatrix.

Klasse	Wertebereich für s	Bewertung β
S1	0 – 199 m	100
S2	200 – 399 m	300
S3	400 – 799 m	600
S4	800 – 4999 m	2900
S5	5000 – 9999 m	7500

TAB 3. Werteklassen der Sichtweite

METAR TAF	S1	S2	S3	S4	S5
S1	1,00	0,78	0,76	0,56	0,17
S2	0,20	1,00	0,77	0,58	0,19
S3	0,19	0,19	1,00	0,60	0,21
S4	0,14	0,14	0,15	1,00	0,41
S5	0,04	0,05	0,05	0,10	1,00

TAB 4. Bewertungsmatrix der Sichtweite

In der Bewertungsmatrix, zeilenweise gelesen, sieht man wie „hilfreich“ für eine mögliche auf ihm basierende Planung der vorhergesagte Wert ist. Je größer, desto besser. Werte rechts der Hauptdiagonale sind deutlich höher, als die links von ihr. Dies wird durch den Wert für σ gesteuert, der mit 0,8 konservative Vorhersagen höher bewertet.

3.9.2. Windgeschwindigkeit

Betrachtet man beim Wind nur die Windgeschwindigkeit w gemessen in Knoten (kn) und vernachlässigt dabei die schwer vorhersagbaren Böen-Angaben, so kann man zur Festlegung der Werteklassen und ihrer Bewertung [10] nutzen, in dem versucht wurde, ganze Verkehrstage in

Gut- bzw. Schlechtwettertage einzuteilen. Die folgenden Tabellen zeigen das Ergebnis; σ und τ sind wieder 0,8.

Klasse	Wertebereich für w	Bewertung β
W1	≤ 15 kn	0
W2	$16 \text{ kn} \leq w \leq 20$ kn	1
W3	$21 \text{ kn} \leq w \leq 30$ kn	2
W4	> 30 kn	4

TAB 5. Werteklassen der Windgeschwindigkeit (Quelle [10])

METAR TAF	W1	W2	W3	W4
W1	1,00	0,16	0,12	0,04
W2	0,64	1,00	0,16	0,08
W3	0,48	0,64	1,00	0,12
W4	0,16	0,32	0,48	1,00

TAB 6. Bewertungsmatrix der Windgeschwindigkeit

3.9.3. Niederschlag

Niederschlag wird in METAR und TAF nicht numerisch, sondern in Codes (Bedeutung siehe [3]) angegeben. Auch hier gibt es in [10] bereits einen Vorschlag für die Werteklassen. Dieser teilt die Codes in 4 Gruppen ein. Sind kombinierte Niederschlagscodes angegeben, wie zum Beispiel FZRA für „frozen rain“ - gefrierenden Regen, so wird die gravierendere Werteklasse für eine Bewertung angenommen. Die folgenden Tabellen zeigen die Parameter für den Niederschlag n bei σ und τ gleich 0,8.

Klasse	(Teil-)Werte für n	Bewertung β
N1	kein Niederschlag	0
N2	RA, UP, DZ, IC	1
N3	-SN, SG, +RA	2
N4	FZxx, SN, +SN	3

TAB 7. Werteklassen des Niederschlages (Quelle [10])

METAR TAF	N1	N2	N3	N4
N1	1,00	0,15	0,09	0,04
N2	0,59	1,00	0,15	0,09
N3	0,37	0,59	1,00	0,15
N4	0,16	0,37	0,59	1,00

TAB 8. Bewertungsmatrix des Niederschlages

3.9.4. Gewitterwolken

Gewitterwolken sind operationell für die Luftfahrt von Interesse, da sie Einfluss auf den Flug und im Flughafennahbereich auch auf die Durchführbarkeit der Bodenprozesse, im Speziellen die Abfertigung beim Turnaround, haben. Als Indikator für ein mögliches Gewitter wird das Vorhandensein bzw. die Vorhersage bestimmter Typen von Wolken, den Cumulonimbus, auch Gewitterwolke genannt [11], genutzt. Die Wettermeldungen beinhalten Meldungen über Towering Cumulus (TCU) und Cumulonimbus (CB) und zusätzlich den Bedeckungsgrad, der wie in [3] definiert von „Few Clouds“ (FEW) bis „Overcast Clouds“ (OVC) angegeben wird. Die bewerteten Kombinationen für die Gewitterwolken g finden sich in den folgenden Tabellen.

Klasse	Werte für g	Bewertung β
G1	keine Bewölkung	0
G2	FEW TCU	3
G3	FEW CB	4
G4	SCT TCU	5
G5	SCT CB	6
G6	BKN TCU	8
G7	BKN CB, OVC TCU	10
G8	OVC CB	12

TAB 9. Werteklassen der Gewitterwolken (Quelle [10])

M	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
T								
G1	1,00	0,16	0,15	0,13	0,12	0,09	0,07	0,04
G2	0,64	1,00	0,19	0,17	0,16	0,13	0,11	0,08
G3	0,59	0,75	1,00	0,19	0,17	0,15	0,12	0,09
G4	0,53	0,69	0,75	1,00	0,19	0,16	0,13	0,11
G5	0,48	0,64	0,69	0,75	1,00	0,17	0,15	0,12
G6	0,37	0,53	0,59	0,64	0,69	1,00	0,17	0,15
G7	0,27	0,43	0,48	0,53	0,59	0,69	1,00	0,17
G8	0,16	0,32	0,37	0,43	0,48	0,59	0,69	1,00

TAB 10. Bewertungsmatrix der Gewitterwolken

4. ERGEBNISSE

Anhand der Wetterklasse Sichtweite soll nun die Anwendung des Modells und dessen Ergebnisse für den Münchner Flughafen aufgezeigt werden. Die folgende Kontingenztabelle sowie die Tabelle der Eintrittswahrscheinlichkeiten ergibt sich, wenn man die verwendbaren TAF mit den entsprechenden METAR vergleicht, die 20 Minuten nach Beginn des Gültigkeitszeitraums der TAF herausgegeben wurden (Zeitpunkt 1, Prognosehorizont 1:20 h).

METAR	S1	S2	S3	S4	S5
TAF					
S1	5	0	2	0	0
S2	3	33	18	14	0
S3	3	22	39	68	13
S4	0	8	29	608	941
S5	0	2	3	121	7558

TAB 11. Kontingenztabelle der Sichtweite für Zeitpunkt 1

METAR	S1	S2	S3	S4	S5
TAF					
S1	71,43	0	28,57	0	0
S2	4,41	48,53	26,47	20,59	0
S3	2,07	15,17	26,90	46,90	8,97
S4	0	0,50	1,83	38,34	59,33
S5	0	0,03	0,04	1,57	98,36

TAB 12. Eintrittswahrscheinlichkeiten der Sichtweite für Zeitpunkt 1 in Prozent

Die weiterhin folgende relative Kontingenztabelle lässt erkennen, wie oft die einzelnen Werteklassenpaare tatsächlich vorkamen. Auffällig ist die Zelle S5-S5, auf die knapp 80% aller Werte fallen.

METAR	S1	S2	S3	S4	S5
TAF					
S1	0,05	0	0,02	0	0
S2	0,03	0,35	0,19	0,15	0
S3	0,03	0,23	0,41	0,72	0,14
S4	0	0,08	0,31	6,41	9,92
S5	0	0,02	0,03	1,28	79,64

TAB 13. Relative Kontingenztabelle der Sichtweite für Zeitpunkt 1 in Prozent

Durch die zuvor vorgestellte Korrektur der Tabelle soll der

starke Einfluss dieses Wertes auf das Gesamtergebnis relativiert werden. Wie die folgende korrigierte Tabelle zeigt, hat sich nun der S5-S5-Wert auf ca. 46% reduziert, alle anderen Werte haben sich etwa verdreifacht. Dies hat natürlich direkten Einfluss auf den Prognosegütwert, der sich aus dem Summenprodukt dieser Tabelle und der Bewertungsmatrix ergibt, erlaubt aber eine Sensitivität. Auch selten vorkommende Wertepaare haben nun einen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

METAR	S1	S2	S3	S4	S5
TAF					
S1	0,15	0	0,06	0	0
S2	0,09	0,99	0,54	0,42	0
S3	0,09	0,66	1,16	2,02	0,39
S4	0	0,24	0,87	17,06	25,41
S5	0	0,06	0,09	3,58	46,12

TAB 14. Korrigierte relative Kontingenztabelle der Sichtweite für Zeitpunkt 1 in Prozent

Aus dieser Tabelle ermittelt sich für die Prognose der Sichtweite für den Zeitpunkt 1 zu $P=0,785$. Analog wird die Prognosegüte für die anderen Zeitpunkte berechnet. Die folgende Graphik zeigt die Werte.

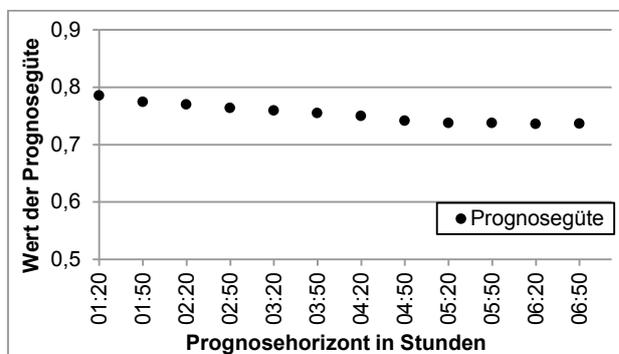


BILD 1. Gesamtprognosegüteverlauf der Sichtweite

Zu erkennen ist die geringe Schwankung zwischen den Werten. Sie beträgt 0,05. Zum Vergleich wurde auch die Güte für die nicht korrigierte relative Kontingenztabelle ermittelt. Dieser Wert schwankt sogar nur um 0,03. Die Sichtweite kann also über den gesamten Prognosehorizont im gleichen Maße und auf einem hohen Niveau vorhergesagt werden.

Unterteilt man nun die Wettermeldungen in die Gruppen „morgens“, „mittags“, „abends“ und „nachts“, zeigt sich für den Verlauf der Prognosegüte folgendes Bild.

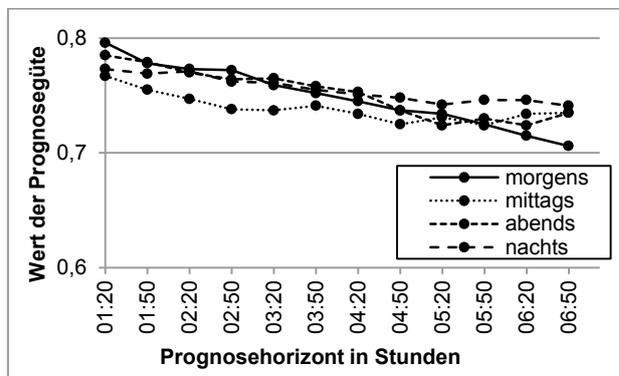


BILD 2. Prognosegüteverlauf der Sichtweite für unterschiedliche Tageszeiten

Am deutlichsten ist eine Verschlechterung der Güte für die „morgens“-Prognose zu erkennen. Vermutlich ist hierfür

der Grund, dass der Münchner Flughafen unter den deutschen Großflughäfen derjenige mit den häufigsten Nebelereignissen ist und der generellen Schwierigkeit der Vorhersage von Nebel [12].

Auch im Wechsel der Jahreszeiten ändert sich die Prognosegüte. Hierfür wurden die Meldungen aus den 4 Jahreszeiten analog der Tageszeiten zuvor verglichen und in der folgenden Darstellung zusammengefasst.

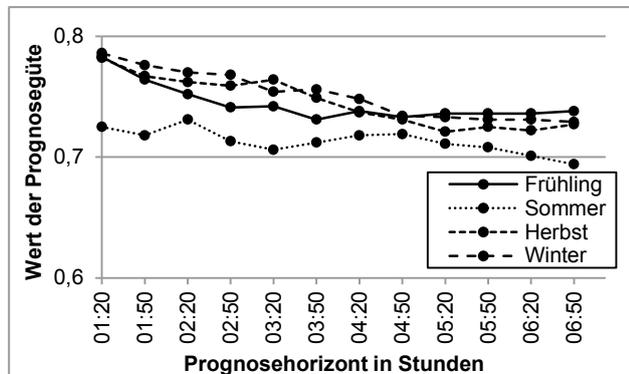


BILD 3. Prognosegüteverlauf der Sichtweite für die Jahreszeiten

Hier wirkt sich die Korrektur der Kontingenztabelle verzerrend auf die Prognosegüte aus, da eine starke Konzentration auf die Zelle S5-S5 (92 %) besteht und ein kleiner Wert aus S4-S5 (6 %) auf etwa 38 % erhöht wird. Im Ergebnis sinkt die Prognosegüte für den Sommer und den Zeitpunkt 1 so auf 0,73.

Für den Flughafen München liegen auch die weiteren Wetterklassen in ähnlichen Gütebereichen [8]. Nur die Gewitterwolken lassen sich mit einer Güte von 0,645 relativ schlecht vorhersagen.

Abschließend werden stark abweichende TAF und METAR näher betrachtet. Bezüglich der Sichtweite war ein Tag auffällig (1. Oktober 2010), bei dem sich innerhalb eines kurzen Zeitraumes von 3 Stunden der gemessene Wert von 9999 m, also unbegrenzte Sicht, auf 300 m verringert hat. Die kurz zuvor bekannt gegebene TAF hatte unbegrenzte Sicht angegeben. Da im Modell die Änderungen einer TAF nicht berücksichtigt wurden, verschlechtern solche Ereignisse das Ergebnis entsprechend. Auch schnell auf- bzw. abziehender Nebel kann einen Einfluss auf das Ergebnis haben, wenn die TAF-Meldung keine dementsprechende Information beinhaltet.

5. OFFENES UND VERBESSERUNGEN

Wie zum Abschluss des Ergebnis-Kapitels gezeigt wurde, ist es notwendig, auch Aktualisierungen der TAF-Meldungen in die Auswertung aufzunehmen. Dadurch wird ein höherer Prognosegütewert für Wetterklassen erwartet, die sich schnell ändern können. Auch die Berücksichtigung der in einer TAF ggf. beinhalteten absehbaren wahrscheinlichkeitsbehafteten Angaben dürfte einen positiven Effekt auf die Prognosegüte haben.

Die Korrektur der Kontingenztabelle, um die Dominanz von häufig auftretenden TAF-METAR-Paaren bei der Bildung der Prognosegüte zu relativieren, bedarf einer kritischen Betrachtung und detaillierteren Ausarbeitung. Schwächt man Werte mit einer hohen Bewertung an dieser Stelle zu sehr ab, resultiert dass in einer geringeren Prognosegüte. Korrigiert man nicht, könnten Streuungen für das Ergebnis unbedeutend werden und eine zu verlässliche Prognose suggerieren. Eine differenzierte

Bestimmung der Prognosegüte, zum Beispiel je Werteklasse einer Wetterklasse, kann helfen.

Natürlich sollte man in weiteren Untersuchungen die Einflüsse der Bewertungsparameter in diesem vorgestellten Modell betrachten und/oder weitere Wetterklassen hinzuziehen, wie zum Beispiel die Windrichtung.

Zumindest für München blieb die Prognosegüte über den Prognosehorizont von fast 6 Stunden recht gut und stabil. Dadurch kann man sich in der Planungsphase am Flughafen für diesen Zeitraum auch entsprechend auf die prognostizierten Wettererscheinungen verlassen. Eventuell ergibt sich für andere Flugplätze hier ein nicht so eindeutiges Bild.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] J. Reichmuth u.a., „Konfigurationsanalyse in Bezug auf Bahnkapazität und Windverhältnisse, Flughafen München,“ DLR, Braunschweig, 2006.
- [2] International Civil Aviation Organization (ICAO), „DOC 4444 Air Traffic Management, Procedures for Air Navigation Services,“ 2001.
- [3] World Meteorological Organization, Aerodrome Reports and Forecast, A Users Handbook to the Codes, Genf, 2014.
- [4] *Richtlinien für den Allwetterflugbetrieb*, Deutschland, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 1998.
- [5] G. Mahringer, „Terminal aerodrome forecast verification in Austro Control using time windows and ranges of forecast conditions,“ *Meteorological Applications, Volume 15, Issue 1*, 2008.
- [6] U. Damraht, „Verifikation von Wettervorhersagen,“ *promet, 28. Jahrgang, Heft 1/2*, 2002.
- [7] P. Andres und M. Spiwoks, „Prognosegütemaße, State of the Art der statistischen Expost-Beurteilung von Prognosen,“ Sonderforschungsgruppe Institutionenanalyse, 2010.
- [8] T. H. Rasche, *Vorhersage von METAR-Meldungen auf Basis von TAF-Meldungen und historischen Wetterdaten*, Dresden: Studienarbeit, TU Dresden, Institut für Luftfahrt und Logistik, 2016.
- [9] N. Klußmann und A. Malik, *Lexikon der Luftfahrt*, Springer, 2012.
- [10] ATMAP MET working group, „Algorithm to describe weather conditions at European airports,“ 2011.
- [11] R. P. Frey, *Donnerwetter - Flugmeteorologie von A bis Z*, Books on Demand, 2016.
- [12] C. Mohr u.a., „Nebelbildung am Flughafen München: Klimatologie und Modellierung,“ Universität Bonn,

Bonn, 2009.