

F. KEIS, A. TAFFERNER

19 Nowcasting von Winterwetter am Flughafen München

Nowcasting Winter Weather at Munich Airport

Zusammenfassung

Winterliche Wetterbedingungen an Flughäfen haben maßgeblichen Einfluss auf die Pünktlichkeit, die Effizienz und letztendlich auch die Sicherheit des Luftverkehrs. Um den ökonomischen Schaden in solchen Situationen zu minimieren und die Sicherheit zu gewährleisten ist es nötig, die Winterwetterverhältnisse in der Terminal Manoeuvring Area (TMA) um den Flughafen so präzise wie möglich zu erfassen und vorherzusagen. Vor allem die Niederschlagsart und Menge sowie der zeitliche Ablauf sind für Flughafenbetreiber wie auch für Straßenbetriebsdienste elementare Informationen. Das Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) nahm sich diesen Bedarf zum Anlass, das Winterwetter-Nowcasting-System Winter Hazards in Terminal Environment (WHITE) zu entwickeln. Auf der Grundlage von Expertenwissen werden die verfügbaren Beobachtungs- und Vorhersagedaten mithilfe von Fuzzy-Logik miteinander verknüpft. Das Ziel ist, Winterwetter Szenarien wie Schneefall oder Vereisung zu bestimmen und für die nahe Zukunft vorherzusagen. Die Information wird in Form von Winterwetterobjekten ausgegeben, die zusammen genommen den dreidimensionalen Gefährdungsraum durch Winterwetterbedingungen für den Flugverkehr in der TMA repräsentieren.

Summary

Winter weather conditions at airports have a significant impact on the accuracy, the efficiency and the safety of air traffic. In order to minimize economic loss and to maintain safety, winter weather situations within the Terminal Manoeuvring Area (TMA) around an airport have to be detected and forecasted as precisely as possible. Especially onset, duration, precipitation type and intensity of winter weather events are fundamental information for airport and road-service operators. Driven by this demand the winter weather nowcasting system Winter Hazards in Terminal Environment (WHITE) is under development at the German Aerospace Center's (DLR) Institute of Atmospheric Physics. An expert system based on fuzzy logic combines available observation and forecast data to compute winter weather objects representing various weather scenarios. These objects render the most likely analyzed and nowcasted state of winter weather within the investigation area.

1 Winterwetter an Flughäfen

Winterliche Wetterbedingungen haben vielfältige Auswirkungen auf den Alltag des Menschen. So führen verschneite oder vereiste Verkehrswege regelmäßig zu erheblichen Beeinträchtigungen im Straßenverkehr. Pünktlichkeit, Effizienz und letztendlich auch die Sicherheit des Luftverkehrs werden durch Winterwetterbedingungen an Flughäfen maßgeblich beeinflusst. Die Statistiken in Abbildung 16-1 verdeutlichen, welchen Einfluss das Wetter generell auf die Abläufe an Flughäfen hat. Im Jahr 2011 waren am Flughafen München über 70 % der Verspätungen auf das Wetter zurückzuführen (Abbildung 19-1 a). Auch für die Jahre zuvor wurden ähnliche Werte ermittelt. In den Wintermonaten waren diese Anteile jeweils sogar noch höher.

So wurden allein im Winter 2011/2012 über 1000 Verspätungen am Flughafen München gezählt (Abbildung 16-1 b). Ein Großteil davon war eine direkte Konsequenz von Winterwetterverhältnissen im Flughafenbereich.

Da An- und Abflüge an Flughäfen einem straffen Zeitplan unterworfen sind, zieht die Verspätung einzelner oder weniger Flüge oft eine Umstrukturierung des kompletten Flughafenablaufs nach sich. So müssen Flugzeuge sich in Warteschleifen begeben oder auf ihre Lande- beziehungsweise Starterlaubnis warten. In schweren Fällen müssen Flüge auf andere Flughäfen ausweichen oder sie werden ganz gestrichen. Die zusätzlichen Kosten, die dabei entstehen, sind vielfältig. Sie reichen von zusätzlichem Kerosinverbrauch über Umbuchungen und zusätzlicher Bereitstellung

von Flugzeugen und Personal, bis hin zu den Schadensansprüchen der Passagiere. Zudem führt die Verschiebung des Zeitplans zwangsläufig zu einer erhöhten Aktivität im weiteren Verlauf des Tages, welche den Flughafen nicht selten an seine Kapazitätsgrenzen bringt und weitere Verspätungen nach sich zieht. Am Flughafen München werden beispielsweise auf nur zwei Landebahnen im Schnitt 90 Flüge pro Stunde abgewickelt. Jede Störung des Ablaufs hat weitreichende Konsequenzen und muss daher bestmöglich vermieden werden. Für Wettereinflüsse bedeutet das, eine exakte und zutreffende Vorhersage zu haben, um entsprechende Gegenmaßnahmen bereits im Vorfeld einleiten zu können und nicht auf die Bedingungen im Nachhinein reagieren zu müssen. Nur so kann zum Beispiel die Räumung von Landebahnen und Zufahrtswegen sowie die Enteisung von Flugzeugen vor dem Start rechtzeitig organisiert und in die Wege geleitet werden.

Neben den offenkundigen Behinderungen durch schneebedeckte Start- und Landebahnen sowie Sichteinschränkungen aufgrund von Schneefall oder Nebel (Abbildung 19-2), ist die Vereisung ein typisches Phänomen des Winterwetters. Sie tritt sowohl am Boden, auf Straßen, Landebahnen und parkenden (Luft-) Fahrzeugen auf, und kann auch fliegende Flugzeuge gefährden. Der Eisansatz während des Fluges kann vor allem bei kleineren Maschinen die Strömungs- und Gewichtsverhältnisse signifikant modifizieren und unter Umständen sogar zum Strömungsabriss führen. Schneefälle und die Kontamination von Bewegungsflächen und Straßen der Flughäfen mit Schnee oder Eis und deren Bekämpfung führen, wie bereits erwähnt, zu kostspieligen Verspätungen und Flugausfällen. Außerdem gefährdet die damit verbundene Veränderung der Reibungswerte auf den

Start- und Landebahnen das Steuerungsverhalten von fahrenden Fahrzeugen und damit die Sicherheit der betroffenen Maschinen. Um den ökonomischen Schaden in solchen Situationen zu minimieren und die Sicherheit aufrechtzuerhalten ist es nötig, die Winterwetterverhältnisse in der Terminal Manoeuvring Area (TMA) so präzise wie möglich zu erfassen und vorherzusagen. Vor allem der exakte zeitliche Ablauf sowie die Beschaffenheit und Intensität eines Winterwetter Szenarios sind für Flughafenbetreiber oder Straßenbetriebsdienste elementare Informationen.

Das Hauptaugenmerk bei der Untersuchung von Winterwetter muss also auf der genauen Bestimmung von Schneefallereignissen und gefrierenden Niederschlägen liegen. Eine Befragung an der Verkehrsleitzentrale am Münchner Flughafen ergab dabei als entscheidende Fragestellungen (TAFFERNER und KEIS 2012):

- Wann und wo entstehen Niederschläge?
- Wie andauernd und wie intensiv sind die Niederschläge?
- Welcher Niederschlagstyp liegt vor?

Weitere wichtige Punkte für Flughafenbetreiber sind die Prognosen, in erster Linie die Kurzfristvorhersage bis zu 6 Stunden, das sogenannte „Nowcasting“, von

- Vereisung am Boden,
- Flugzeugvereisung am Boden und im An- und Abflug,
- Sichtverhältnisse.

Stellvertretend und beispielhaft für vergleichbare Forschungen zu dieser Thematik wird in diesem Artikel der aktuelle Forschungsstand der Abteilung Wolkenphysik und Verkehrsmeteorologie des Instituts für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) skizziert. Mit dem Ziel die oben beschriebenen Winterwetterbedingungen detektieren und vorherzusagen zu können, wird am DLR das Winterwetter-Nowcasting-System *Winter Hazards in Terminal Environment* (WHITE) entwickelt. Im Fokus der Forschungen steht dabei die TMA des Münchner Flughafens. Durch Kombination verschiedener Daten auf Grundlage von Expertenwissen werden mithilfe von Fuzzy-Logik Winterwetterobjekte berechnet, die eine Analyse der Wettersituation im Untersuchungsgebiet erlauben. Trends an Beobachtungsstationen und extrapolierte Radar- und Satellitenfelder liefern zusammen mit Modellvorhersagen die Grundlage für die kurzfristige Vorhersage dieser Wetterobjekte, dem Nowcasting.

Die Analyse der Winterwettersituation orientiert sich an den wolkenphysikalischen Überlegungen des *Advanced diagnosis and warning system for aircraft icing environments* (ADWICE). Jedoch werden in den Algorithmen von WHITE-Indikatoren für Winterniederschläge oder Vereisung auf

FMP München

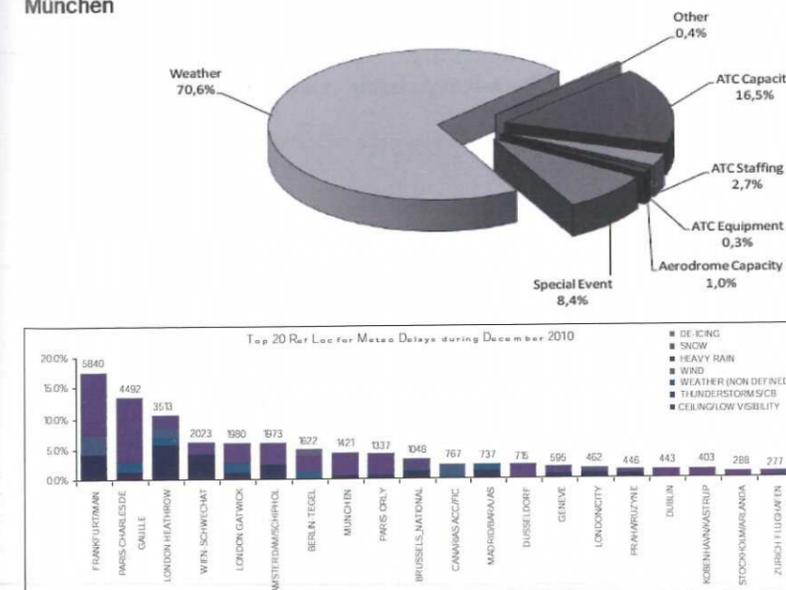


Abb. 19-1: (a) Ursachen für Verspätungen am Flughafen München 2011, Quelle: Peter Roth, DFS; (b) Ursachen für wetterbedingte Verspätungen an europäischen Flughäfen im Winter 2011/2012, Quelle: Eurocontrol - Network Operations Report, Winter 2011-2012.



Abb. 19-2: Winterwetter am Flughafen München, Bild: Jörg Simon, Flughafen München GmbH.

Grundlage von Fuzzy-Logik berechnet, die sowohl die Datenlage als auch die spezifischen Gegebenheiten der TMA verarbeiten. Im Unterschied zu ADWICE wird in WHITE ein Nowcasting von Winterwettersituationen in Flughafennähe zur Verfügung gestellt. In Bezug auf großräumige Vereisungssituationen im Flug in Verbindung mit stratiformer Bewölkung und großen unterkühlten Tropfen sei an dieser Stelle auf das Kapitel 15 dieses Heftes verwiesen. Die Untersuchung anderer Gefahrensituationen, wie Beeinträchtigung der Sicht aufgrund von Nebel, wurde bisher bei der Winterwetteranalyse des DLR nicht berücksichtigt. Entscheidende Parameter bei der Entstehung von Nebel wie Strahlungsflüsse, Bodenfeuchte oder Windgeschwindigkeit, sind oft nicht in ausreichender Qualität oder in Echtzeit verfügbar. Eine dahingehende Erweiterung des Systems könnte in Zukunft aber zum Forschungsthema am DLR werden.

2 Fuzzy-Logik

Im Gegensatz zur klassischen binären Logik, in der nur die beiden Aussagen „wahr“ oder „falsch“ zulässig sind, verwendet die Fuzzy-Logik auch Bedingungen die nur teilweise wahr oder falsch sind. Da in diesem Fall nicht mehr mit scharf abgegrenzten Mengen gerechnet wird, wird die Fuzzy-Logik oft auch als unscharfe Logik bezeichnet. Diese unscharfe Logik bietet aber in gewissen Situationen größere Möglichkeiten als die binäre Logik und wird im alltäglichen Umgang oft wie selbstverständlich angewandt. So wäre in der klassischen Logik auch bei wenigen Schneeflocken nur die Aussage „es schneit“ und nicht „es schneit nicht“ zulässig, während in der Fuzzy-Logik auch Aussagen wie „es schneit kaum“, „es schneit etwas“ oder „es schneit stark“ möglich sind. ZADEH (1965) entwickelte bereits vor gut 50 Jahren mathematische Modelle, um den alltäglichen sprachlichen Umgang der Fuzzy-Logik auch in mathematischen Größen ausdrücken zu können. Seitdem hat die Fuzzy-Theorie in vielen Bereichen des täglichen Lebens, wie der Regelungstechnik, der Verkehrstechnik und eben auch der Meteorologie Einzug gehalten.

3 Nowcasting System WHITE – Winter Hazards in Terminal Environment

Zu Forschungszwecken wird das am DLR entwickelte Nowcasting-System WHITE für ein Gebiet um die TMA des Flughafen Münchens kompiliert. Ein ausreichende verfügbare Datenpalette vorausgesetzt, könnte ein Einsatz des Systems aber auch für beliebige andere Regionen realisiert werden.

3.1 Gebiet

Die Koordinaten der Grenzen des Untersuchungsgebiets werden bei 9° Ost und $13,75^\circ$ Ost sowie $47,25^\circ$ Nord und $49,75^\circ$ Nord (vergleiche Abbildung 19-3) festgelegt. Das Gebiet deckt einen großen Teil Südbayerns inklusive der nördlichen Alpen ab und reicht im Westen bis nach Stuttgart sowie im Osten bis nach Passau. Die nördliche Grenze liegt in der Nähe von Nürnberg. Neben Oberschleißheim befinden sich mit Hohenpeißenberg, Kümmerbruck und Stuttgart-Schnarrenberg drei weitere aerologische Messstationen mit regelmäßigen Radiosondenaufstiegen innerhalb des Untersuchungsgebiets. Zusätzlich bietet das Gebiet neben den aerologischen Stationen auch eine hohe Anzahl synoptischer Stationen und diverse atmosphärische Messgeräte der DLR-Niederlassung in Oberpfaffenhofen. Diese Datenvielfalt ermöglicht unter anderem eine effektive Verifikation des Systems.

3.2 Lokale Beobachtungs- und Vorhersagedaten

Die im Untersuchungsgebiet verfügbaren Daten sind:

- Beobachtungsdaten der Wetterstationen (SYNOP/METAR): Messung von mehreren meteorologischen Größen, zeitliche Auflösung: 60 beziehungsweise 30 Minuten.
- Glatteisfrühwarnsystem (GFS): Messungen von Bodentemperaturen und -zuständen auf den Betriebsflächen des Flughafens, zeitliche Auflösung: 10 Minuten.

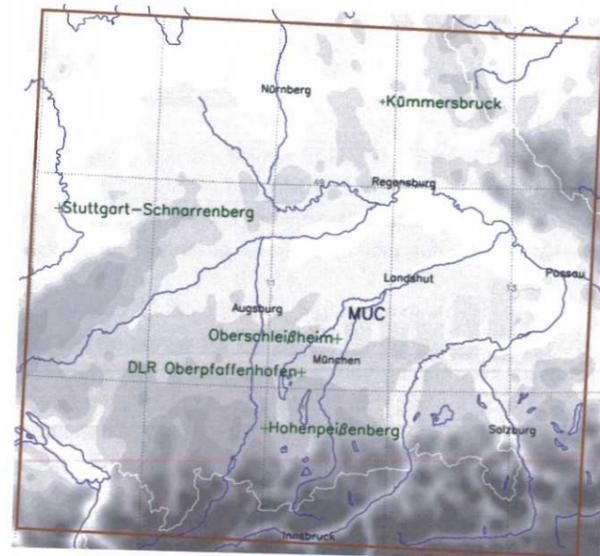


Abb. 19-3: Schematisierte Karte des Untersuchungsgebiets.

- Straßenwetterinformationssystem (SWIS), betrieben von DWD: Messungen von verschiedenen Parametern (inklusive Lufttemperatur, Bodentemperatur, Straßenzustände) an wichtigen Verkehrsstraßen, zeitliche Auflösung: 15 Minuten.
- Micro-Regen-Radar (MRR), betrieben vom DLR: vertikal gerichtetes Doppler-Radar am Flughafen, Messung von Geschwindigkeitsspektren fallender Niederschlagspartikeln, Ableitung von Größenverteilung und Niederschlagsraten.
- Parsivel-Disdrometer, betrieben vom DLR: Messung der Größe und Fallgeschwindigkeit von Niederschlagspartikeln mithilfe eines schmalen Laserstrahls am Flughafen, Ableitung von Niederschlagsrate und Niederschlagstyp.
- POLDIRAD, betrieben vom DLR (nicht operationell): polarimetrisches Forschungsradar in Oberpfaffenhofen, Messung diverser wolkenphysikalischer Parameter.
- AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay): Messung diverser Parameter (inklusive Temperatur, Feuchte, Druck, geographische Koordinaten) von Flugzeugen während des Flugs, Vorteil am Flughafen: Ableitung von Profilen aus Daten der startenden beziehungsweise landenden Maschinen.
- COSMO-DE: operationelles numerisches Wettervorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes (DWD), horizontale Auflösung: 2,8 km, Modell wird alle 3 Stunden gestartet und erstellt jeweils eine Vorhersage für die folgenden 18 Stunden.
- Radarkomposit RX: operationelles deutschlandweites Radarkomposit des DWD, horizontale Auflösung: 1 km, zeitliche Auflösung: 5 Minuten.
- MSG (Meteosat Second Generation): stationärer Wettersatellit, mehrere Beobachtungskanäle in unterschiedlichen Spektralbereichen, horizontale Auflösung etwa 4 km in den mittleren Breiten, zeitliche Auflösung: 15 Minuten.

3.3 Entwicklung von Winterwetterobjekten

Für die Beurteilung von Winterwetter am Flughafen reicht es nicht aus, lediglich die bodennahen Verhältnisse zu betrachten. Es muss immer auch die Atmosphäre

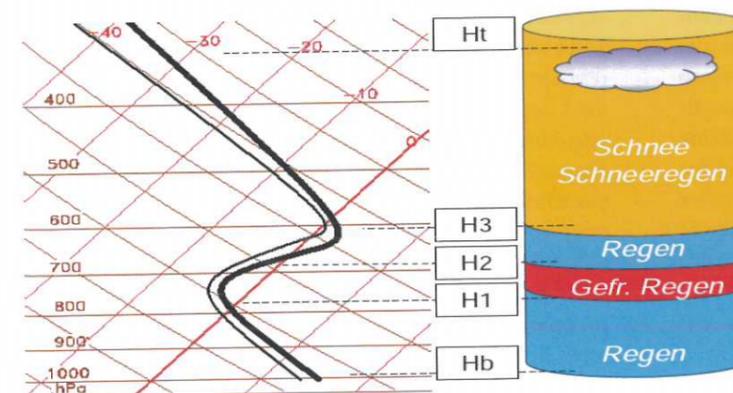


Abb. 19-4: Winterwetterobjekt (schematisch). Temperatur- und Feuchteprofil mit analysierten Niederschlagsformen.

darüber betrachtet werden, denn hier, in der bodennahen Luftschicht, spielen sich die entscheidenden Prozesse ab. Dort entstehen die Niederschläge, dort durchlaufen sie Phasenumwandlungen und dort entscheidet sich auch das für den Alltag wichtige Wetter am Boden. Um eine korrekte Aussage über das Bodenwetter zu erzielen, ist es also unbedingt notwendig, auch die darüber liegenden Luftschichten in die Untersuchung miteinzubeziehen. Besonderer Fokus liegt dabei auf der Erkennung von Wolken mit Schnee oder unterkühltem Flüssigwasser sowie der Detektion potentieller Schmelz- oder Gefrierzonen in der Atmosphäre. Auch das Wissen über die Wolkenphase ist dabei ein elementarer Baustein. Nur so können Aussagen über den Niederschlagstyp getroffen und zum Beispiel zwischen nassem Schnee, trockenem Schnee oder gefrierendem flüssigen Niederschlag unterschieden werden.

Da sich die atmosphärischen Verhältnisse auch im Winter sehr kurzfristig ändern können, ist es zudem notwendig, den atmosphärischen Zustand möglichst häufig zu analysieren, um ein exaktes Bild der aktuellen Wettersituation zu erhalten. Auch eine korrekte kurzfristige Vorhersage ist letztendlich von der Aktualität der Situationsanalyse abhängig. Um die Analyse und das Nowcasting von Winterwettersituationen bestmöglich zu realisieren, wird der Begriff des Winterwetterobjekts eingeführt. Ein Winterwetterobjekt an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit ist definiert als Luftvolumen bestehend aus mehreren Schichten, die sich durch ihre Information bezüglich Winterwetter, dem „Wettergehalt“, unterscheiden. Die geometrischen Eigenschaften können dabei als Polygon zusammen mit den Höhen der einzelnen Schichten beschrieben werden. Ferner kommen Attribute hinzu, wie zum Beispiel Datum und Gültigkeitszeitraum, Ausbreitungsgeschwindigkeit und -richtung oder Update-Rate.

Anhand Abbildung 19-4 kann der schematische Ansatz eines Winterwetterobjekts erklärt werden. Grundlage für dieses Beispiel ist ein für gefrierenden Regen typisches Profil von Temperatur und Feuchte mit einer sogenannten warmen Nase. Entscheidend bei der Definition des Objekts ist die Einteilung der unterschiedlichen Schichten. Die oberste Schicht reicht von der Wolkenobergrenze (Ht) bis zur Oberkante der warmen Nase (H3). In dieser Schicht sind die Temperaturen stark negativ, so dass mit hoher Wahrscheinlichkeit fester oder zumindest gemischter Niederschlag zu erwarten ist. Innerhalb der warmen Nase (H3 bis H2) wird der feste Niederschlag bei entsprechenden warmen Temperaturen zu Regentropfen aufschmelzen, um anschließend in der Schicht mit negativen Temperaturen (H2 bis H1) zu unterkühlten Tropfen zu werden. Liegt diese unterkühlte Schicht am Boden auf, muss dort mit der Gefahrensituation gefrierender Regen gerechnet werden. Im Beispiel sind die Tem-

peraturen in der bodennahen Schicht (HI bis Hb) aber wieder positiv. Der Niederschlag kommt als Regen am Boden an.

Die grundlegende Information zur Berechnung der Winterwetterobjekte wird durch das numerische Wettervorhersagemodell COSMO-DE bereitgestellt. Im Untersuchungsgebiet um die TMA Flughafen München bietet das Modell durch seine gute horizontale räumliche Auflösung von 2,8 km 125 mal 103 = 12 875 Gitterpunktsäulen. Für die Berechnung der Wetterobjekte werden die untersten 31 Schichten des Modells herangezogen, was einer Höhe von etwa 8 km entspricht. Weil COSMO-DE im operationellen Vorhersagebetrieb nur stündlichen Output liefert, werden die Modellprognosen in 15-minütigen Zwischenschritten linear interpoliert und mit aktuellen Messwerten korrigiert. Zusätzlich werden auch aktuelle Radarmessungen und Satellitendaten berücksichtigt, die im Vorhersagelauf von COSMO-DE nicht assimiliert werden.

Durch die Kombination der verschiedenen Daten erhält man einen detaillierteren Blick auf die momentanen atmosphärischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet. Angelehnt ist diese Idee an der Vorgehensweise eines Meteorologen im operationellen Dienst, der sich bei der Erstellung seiner Prognose ebenfalls nicht auf eine Datenquelle allein verlässt, sondern immer auf alle ihm zur Verfügung stehenden Informationen zugreifen wird.

Das Vorgehen in WHITE ist demnach wie folgt: In einem ersten Schritt werden die Modelldaten an allen Zeitpunkten mithilfe aktueller Beobachtungsdaten der SYNOP-Stationen, SWIS-Sensoren sowie AMDAR-Messungen korrigiert. Zusätzlich werden durch gewichtete Kombination von Trends an den Messstationen und Modellvorhersagen Datenfelder für die Nowcasting-Zeitpunkte berechnet. Anschließend wird an jeder Gitterpunktsäule eine Profilanalyse durchgeführt mit dem Ziel, für den Flughafen problematische Winterwettersituationen zu identifizieren. Für verschiedene Wetterszenarien werden dabei durch Fuzzy-Logik-Indikatoren ermittelt, die das Eintrittsrisiko des jeweiligen Szenarios bewerten. In einem weiteren Schritt, werden benachbarte Gitterpunkte mit ähnlichen Indikatoren zu Wetterobjekten mit den oben beschriebenen Eigenschaften verknüpft. Als finaler Schritt wird eine sogenannte Szenario-Korrektur durchgeführt. Dabei werden die Objekte mit Wetterbeobachtungen der SYNOP-Stationen sowie der speziell für das WHITE-System in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für mobile und verteilte Systeme des Instituts für Informatik der Ludwig-Maximilians-Universität München entwickelten *Web Applikation Weather Report Application (WRAP)* verglichen, um unzutreffende Objekte zu korrigieren.

3.4 Die Winterwetterszenarien

Potentiell kritische atmosphärische Situationen werden anhand unterschiedlicher Winterwetterszenarien untersucht. Diese Szenarien berücksichtigen beispielsweise die Nie-

derschlagsbildung sowohl über den sogenannten Warmen-Regen-Prozess, als auch über die Beteiligung der Eisphase. Der Warmer-Regen-Prozess beschreibt das Phänomen, dass Wolkentropfen nicht automatisch bei negativen Temperaturen in die Eisphase übergehen. Bei Abwesenheit von Gefrierkernen können Wolkentropfen bei einer Temperatur von bis zu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der flüssigen Phase verbleiben. Gefrierkerne sind, ähnlich wie die Kondensationskeime der Tropfenentstehung, Fremdkörper in der Atmosphäre wie Aerosole, Salzpartikel oder Staub, die bei spezifischen Temperaturen zu Eiskeimen aktiviert werden. Bei Temperaturen von knapp unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist die Anzahl der Eiskeime so gering, dass nur vereinzelt ein Eiskeim zum Gefrieren eines Tröpfchens zur Verfügung steht. Die Existenz von unterkühlten Tropfen und den für die Vereisung besonders kritischen Supercooled Large Droplets (SLD) ist daher bei diesen Temperaturen ein normaler Zustand. Die Eiskeimkonzentration nimmt mit abnehmender Temperatur exponentiell zu, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von unterkühlten Tropfen nimmt im selben Maße ab. Bei einer Temperatur von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ kommt es schließlich zum homogenen Gefrierprozess, das heißt die Tropfen gefrieren auch bei Abwesenheit von jeglichen Eiskeimen. Die unterkühlten Tropfen, die während des Warmen-Regen-Prozesses entstehen können, führen oft zu Vereisungsrisiken in der Atmosphäre.

Sind dagegen ausreichend Eiskeime vorhanden, kann die heterogene Nukleation an eisbildenden Kernen bereits bei wenigen Minusgraden auftreten. Generell kann dieser Gefrierprozess in drei Varianten eingeteilt werden. In der ersten Variante wirkt ein Aerosol zunächst als Kondensationskern und bei weiterer Abkühlung anschließend als Gefrierkern. Bei der zweiten Möglichkeit wird ein Aerosol in einen bestehenden warmen Tropfen eingebaut und dient dort bei einem Temperaturrückgang als Eiskeim. Bei der dritten Variante friert ein unterkühlter Tropfen bei mechanischem Kontakt mit einem Aerosol. Diese Variante wird als Kontaktgefrieren bezeichnet. In der Regel beginnt die Vereisung in den höchsten und damit kältesten Teilen einer Wolke. Die Eisteilchen wachsen dort einerseits durch Akkretion und Aggregation sowie andererseits durch Wasserdampfdiffusion. Aufgrund des Sättigungsdampfdruckes über Eis im Vergleich zu Wasser wachsen die Eisteilchen bei Koexistenz beider Phasen auf Kosten der Wassertropfen. Dieser Effekt wird als Bergeron-Findeisen-Effekt bezeichnet. Mit der Zeit nehmen Größe und Gewicht der Eisteilchen zu, so dass sie in die niedrigeren Bereiche der Wolke fallen und dort ebenfalls den Vereisungsprozess veranlassen können. Eine zweite Möglichkeit stellt der sogenannte Seeder/Feeder-Effekt dar. Er beschreibt den Vorgang, wenn Eisteilchen oder Schnee aus höherliegenden Wolken in tieferliegende unterkühlte Wolken fallen und dort die Vereisung initiieren (HAUF und BROWN 1998). Der Prozess über die Eisphase produziert bei entsprechender vertikaler atmosphärischer Schichtung festen Niederschlag in Form von Schnee, aber auch flüssigen Niederschlag in Form von Regen oder gefrierenden Regen, oder eine Mischform. Entscheidend dabei sind beispielsweise die vertikalen Temperatur- und

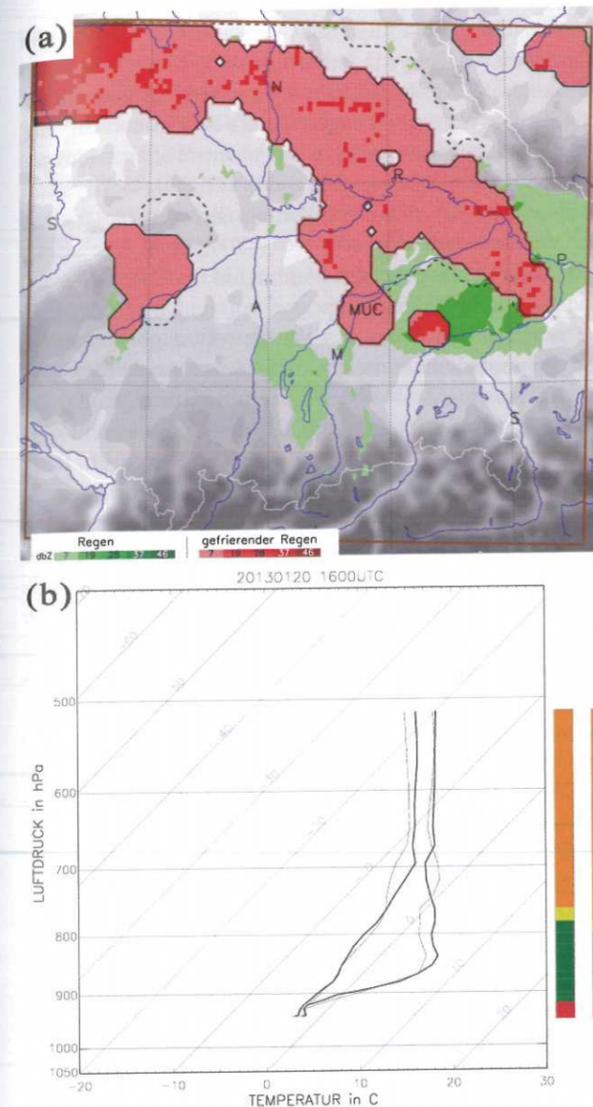


Abb. 19-5: (a) Darstellung der Winterwetterobjekte in einer bodennahen Luftschicht, Beispiel vom 20.01.2013, 16:00 UTC, Beschreibung siehe Text; (b) Skew-T-Diagramm und Winterwetterobjekte für den Flughafen München am 20.01.2013, 16:00 UTC, Beschreibung siehe Text.

Feuchteverteilungen innerhalb der bodennahen Atmosphäre oder die Temperatur der Wolkenobergrenze sowie die Wolkenmächtigkeit. An jedem Modellgitterpunkt im Untersuchungsgebiet werden Profilanalysen durchgeführt, um unter anderem die Höhe der Nullgradgrenze, warme, unterkühlte oder trockene Schichten und die Temperatur an der Wolkenobergrenze zu erkennen. So können kritische Wetterlagen wie Schneefall, Mischniederschlag, Graupel, gefrierende Niederschläge und Vereisung mit SLDs in stratiformer Bewölkung identifiziert werden.

4 Analyse und Nowcasting

Um rechtzeitig auf Winterwetter reagieren zu können oder um sogar bereits im Vorfeld Gegenmaßnahmen einleiten zu können, ist es für Flughafenbetreiber und auch für Straßen-

betriebsdienste nicht ausreichend, eine Analyse der Wetersituation vorliegen zu haben. Sie benötigen dafür eine möglichst präzise Vorhersage mit maximaler Vorlaufzeit. In WHITE wird versucht, beide Bedürfnisse durch ein Nowcasting von bis zu zwei Stunden zu befriedigen. Dabei werden Vorhersagen für die folgenden 15 Minuten, 30 Minuten, 60 Minuten und 120 Minuten berechnet. Grundlage dafür bilden die oben beschriebenen kombinierten Datenfelder sowie für die Nowcasting-Schritte extrapolierten Radarmessungen und Satellitendaten. Dabei kommt das Pyramidal-Image-Matching-Verfahren zum Einsatz, welches für den Vergleich von Satellitendaten am DLR entwickelt wurde und bereits in den Gewitter-Nowcasting-Systemen CB-Tram (ZINNER et al. 2008) und Rad-Tram (KOBBER und TAFFERNER 2008) erfolgreich zum Einsatz kommt.

Das Pyramidal-Image-Matching-Verfahren liefert Verschiebungsvektoren für das Reflektivitätsfeld des Radar-komposit. Durch Vergleich aufeinanderfolgender Radar-bilder wird für jedes Pixel ein Verschiebungsvektor berechnet. Für die Vorhersagezeitpunkte werden die Pixelpositionen mit den berechneten Verschiebungsvektoren in die Zukunft extrapoliert. So erhält man für jeden Nowcasting-Schritt ein Reflektivitätsfeld. Ein analoges Vorgehen wird für die Satellitendaten durchgeführt. Wie bereits erwähnt liefern diese extrapolierten Felder zusammen mit den gewichteten und korrigierten Modell- und Beobachtungsdaten die Grundlage für das Nowcasting der Winterwetterobjekte.

Die Abbildungen 19-5 (a) und 19-5 (b) zeigen schematisch den Output des WHITE-Systems in Form von Winterwetterobjekten am Beispiel des 20. Januar 2013, 16:00 UTC. An diesem Tag hatten weite Teile Deutschlands mit den Folgen von gefrierenden Niederschlägen zu kämpfen. Am Flughafen Frankfurt beispielsweise wurden rund 300 Starts und Landungen gestrichen. Auch am Flughafen München wurde am späten Nachmittag gefrierender Niederschlag beobachtet. Dort hatten sie allerdings keine größeren Auswirkungen auf den Flugbetrieb. Dennoch kann an diesem Beispiel ein Teil des Ansatzes und der Methodik der WHITE-Algorithmen gut veranschaulicht werden.

In Abbildung 19-5 (a) sind die Winterwetterobjekte in einer bodennahen Luftschicht gezeigt. Rot markierte Flächen repräsentieren dort Gitterpunkte, an denen WHITE gefrierenden Niederschlag identifiziert. Grüne Flächen sind Niederschlagsgebiete, an denen kein Winterwetterobjekt berechnet wurde und wo mit Regen gerechnet werden kann. Alle Gitterpunkte mit Winterwetter sind durch die schwarze durchgezogene Linie zu einem Objekt zusammengefasst. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt die von WHITE prognostizierte Position der Objekte für die nächste Stunde.

Die atmosphärische Situation zu diesem Zeitpunkt war wie folgt: Eine deutliche Luftmassengrenze verlief quer durch Südbayern. Von Südwesten strömte warme und durch Föhn-effekte teilweise auskondensierte Luft ins Untersuchungsgebiet und bildete durch Aufsteigen an der vorherrschenden

Kaltluft eine ausgeprägte Warmfront. Im Zuge dieser Front wurde der in höheren Luftschichten entstandene feste Niederschlag in der warmen Luftschicht aufgeschmolzen und in der noch darunter liegenden, bodennahen Kaltluftschicht unterkühlt. Gut zu erkennen ist dies auch in Abbildung 19-5 (b). Dort sind das Temperatur- und Taupunktprofil für den Flughafen München in einem vereinfachten logarithmischen Skew-T-Diagramm dargestellt. Die schwarz gezeichneten Profile zeigen die vertikale Verteilungen zum Analysezeitpunkt, die braun gezeichneten Profile die Situation für den Vorhersagezeitraum von 60 Minuten. Rechts neben dem Diagramm ist der WHITE-Output für den Flughafen anhand farbiger Balken illustriert. Schnee aus den höheren Luftschichten – in den Balken mit der Farbe Orange gekennzeichnet – erfährt bei etwa 800 hPa eine Phasenumwandlung von fest zu flüssig mit dem Zwischenschritt der Mischphase (gelb). Innerhalb der warmen Nase ist der Niederschlag flüssig und warm (grün), ehe er in der kalten Schicht, ohne eine erneute Phasenumwandlung zu durchlaufen, unterkühlt wird und deshalb als gefrierender Regen (rot) am Boden ankommt. Der linke farbige Balken zeigt den Analysezeitpunkt, der rechte Balken das Nowcasting. Zu erkennen ist bereits hier das leichte Absinken der warmen Nase mit fortschreitender Warmfront. Im weiteren Verlauf des Abends wurde auch die bodennahe Kaltluftschicht von der vorrückenden warmen Luft verdrängt.

5 Verifikation des Systems – Die DLR Winterwetterkampagne

In den Wintermonaten 2012/2013 wurde das DLR-Winterwetter-Nowcasting-System WHITE in einem quasioperationellen Betrieb getestet. Ziel war zum einen die Evaluierung der Produkte und zum anderen die Intensivierung der Zusammenarbeit mit dem Flughafen München und anderer Nutzer (DWD Regionalzentrale Süd, DFS). Zu diesem Zweck wurde ein Internetauftritt erstellt, in dem die Ergebnisse des quasioperationellen Betriebs in Graphiken bereitgestellt wurden.

Für drei Horizontalschnitte in unterschiedlichen Höhenstufen wurden jeweils die aktuellen Analysen sowie die Nowcasting-Schritte im Untersuchungsgebiet gezeigt. Auf Anregung von Mitarbeitern des Flughafen Münchens, die vor allem an einer möglichen Neuschneebedeckung oder an Glatteisgefahr interessiert sind, wurde zudem eine Aussage über den Zustand am Boden in das System integriert.

Zusätzlich zum Internetauftritt wurde für die Winterwetterkampagne eine Online-Verifikationsmethodik entwickelt, die den einfachen Feedback-Austausch mit den Teilnehmern der Kampagne ermöglicht hat. Mit Hilfe der Web-Applikation WRAP übermittelte ein Nutzer Informationen über den aktuellen Niederschlagszustand an seiner Position an das DLR. Die Koordinaten der Position und die aktuelle Uhrzeit wurden von der Applikation automatisch bestimmt und an die Meldung angefügt. Nach der erfolgreichen Übertragung der Information, wurden dem Nutzer die

aktuellen WHITE-Ergebnisse für seine Position auf sein Mobilgerät übertragen. Jeder Teilnehmer der Kampagne war auf diese Weise eine Art mobile Wetterstation und die stündlichen Wettermeldungen der SYNOP-Stationen wurden um die unregelmäßigen variablen Wettermeldungen der Applikation erweitert. Für die Verifikation des Systems sind diese Daten von hohem Wert, da naturgemäß vor allem bei entsprechenden Winterwettersituationen eine relativ hohe Dichte an abgesetzten Meldungen zu beobachten war. Nach Abschluss der Kampagne wurde damit begonnen die gesammelten Daten des Winterwetteralgorithmus mit den gesammelten Wettermeldungen zu vergleichen, um das Nowcasting-System zu verifizieren und die Qualität der Produkte steigern zu können. Für den kommenden Winter 2013/2014 ist ein weiterer Testlauf des Systems in Form einer Winterwetterkampagne am Flughafen München geplant. Hier wird dann auch die während der letzten Kampagne noch nicht realisierte Szenario-Korrektur zum Einsatz kommen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination verschiedener Daten und die Definition von Wetterobjekten ist am DLR seit Jahren eine bewährte Nowcasting-Methode und weiterhin Thema aktueller Forschungsarbeiten. So wurden die Algorithmen RADTRAM und CB-TRAM entwickelt, die eine Gewitterprognose mithilfe von Wetterobjekten ermöglichen. Durch die Weiterentwicklung des Nowcasting-Systems WHITE für Winterwetter werden am DLR nun auch die für den Verkehr kritischen Winterszenarien thematisiert und untersucht. Die Entwicklung der Algorithmen kann aber nur der erste Schritt hin zu einem ausgereiften System sein. Weitere Forschungsarbeiten sowie eine ausführliche Evaluierung der während der Winterwetterkampagnen gesammelten Daten sind notwendig, um eine Optimierung der originalen Algorithmen möglich zu machen.

Auch eine Verifikation anhand der DLR eigenen Messgeräte POLDIRAD, MRR und PARSIVEL wird Aufschluss über die Qualität des gegenwärtigen Systems liefern. Zudem wäre es möglich, durch Integration zusätzlicher Daten die Qualität grundsätzlich zu steigern. Für den kommenden Winter konkret angedacht ist die Verwendung von MSG-Satellitendaten, die für den quasioperationellen Betrieb während der Kampagne 2012/2013 noch nicht zu realisieren war, aber bereits für einige historische Fälle getestet wurde. Damit könnten beispielsweise wolkenfreie Gebiete mithilfe einer Wolkenmaske bestimmt werden. Auch die Ableitung von Temperaturen an der Wolkenobergrenze der unterschiedlich hohen Wolkenschichten ist aktuelles Forschungsthema am DLR und könnte in das System mit einfließen. Ein weiterer Ansatzpunkt zur Verbesserung des Systems ist die Integration von Ensemble Vorhersagen aus COSMO-DE oder die Verwendung des am DLR aufgesetzten COSMO-MUC-Modells, eine spezielle Version des COSMO-DE-Modells, das ein Gebiet von 300 mal 300 km rund um

den Flughafen München erfasst und künftig mit höherer horizontalen Auflösung als das COSMO-DE betrieben werden wird. Außerdem wird COSMO-MUC stündlich gestartet werden und die Output Frequenz an die Winterwetteranalysezeitpunkte angepasst. So wäre es zum Beispiel möglich für jeden der viertelstündigen Analysezeitpunkte eine „Time-lagged“-Ensemblevorhersage zu erhalten. Außerdem kann das Modell aktuelle Radardaten und AMDAR Messungen assimilieren (GERZ et al. 2012). Angedacht ist zudem auch eine Revision der durchgeführten Modellkorrektur im Winterwetteralgorithmus. Hier bietet sich an, die GFS-Daten von Temperatur und Feuchte für den Gitterpunkt Flughafen operationell zu integrieren. Auch das von der Universität Wien entwickelte System VERA (STEINACKER et al. 1997) zur Analyse der meteorologischen Felder aus SYNOP-Meldungen, das bereits am DLR installiert und getestet wurde, könnten dazu beitragen, die unterste Luftschicht genauer zu analysieren. Für die Zukunft könnten schließlich auch weitere Winterwetterthemen in den Fokus der Forschungen am DLR rücken. Vor allem die eingeschränkte Sicht aufgrund von Nebel aber auch aufgrund von Schneefall ist ein von der Verkehrsleitzentrale des Münchner Flughafens oft angesprochenes Problem und führt regelmäßig zu Verspätungen oder Flugstreichungen. Ob diese Problematik innerhalb des DLR-Winterwetter-Nowcasting-Systems behandelt werden kann, oder ob dafür eventuell ein anderer Ansatz sinnvoller wäre, muss anhand weiterer Forschungen erst noch geklärt werden.

Im Großen und Ganzen analysiert und prognostiziert WHITE bereits jetzt die wichtigsten für den Flughafen problematischen Winterwettersituationen. Das Nutzer-Feedback der Web Applikation ist durchaus positiv und

erste Evaluierungen des Systems sind vielversprechend. Eine detailliertere Beschreibung des Systems und der zugrundeliegenden wolkenphysikalischen und thermodynamischen Vorgänge sind der Inhalt der Dissertation des Erstautors und werden in naher Zukunft veröffentlicht werden.

Literatur

- GERZ, T., DENGLER, K., TAFFERNER, A., HOLZÄPFEL, F., 2012: Limited Area Numerical Weather Prediction. *DLR-Projekt Wetter & Fliegen*, Final Report, 58–64.
- HAUF, T., BROWN, R., 1998: Meteorological analysis of icing events. *EURICE Tech. Rep. DL 14 TR 07*, 28 pp.
- KOBER, K., TAFFERNER, A., 2008: Tracking and nowcasting of convective cells using remote sensing data from radar and satellite. *Meteorolog. Zeitschrift* **18**, 75–84.
- STEINACKER, R., PÖTTSCHECHER, W., DORNINGER, M., 1997: Enhanced Resolution Analysis of the Atmosphere over the Alps Using the Fingerprint Technique. *Annalen der Meteorologie* **35**, 235–237.
- TAFFERNER, A., KEIS, F., 2012: Nowcasting Winter Weather at Munich Airport. *DLR-Projekt Wetter & Fliegen Final Report*, 46–57.
- ZADEH, L. A., 1965: Fuzzy Sets. *Information and Control* **8**, 338–353.
- ZINNER, T., MANNSTEIN, H., TAFFERNER, A., 2008: Cb-Tram: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multichannel Meteosat-8 SEVERI data. *Meteor. Atmos. Phys.* **101**, 191–210.